

# Modellierung verbal repräsentierter Geoinformation

im Anwendungsbeispiel des Katastrophenmanagements

---

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Christian Lucas  
aus Sangerhausen

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Februar 2010

Referent: Prof. Dr.-Ing habil. Hans-Peter Bähr

Korreferentin: Prof. Dr.-Ing habil. Monika Sester

Korreferent: Prof. Dr.-Ing habil. Stefan Hinz

Karlsruhe (2010)



## Kurzfassung

Um die Integration sprachlicher Information<sup>1</sup> in geographische Informationssysteme zu ermöglichen, wird eine Methodik zur Überführung verbal repräsentierter räumlicher Zusammenhänge in eine formale Darstellung vorgestellt. Diese umfasst neben einer funktionalen, ebenfalls eine semantische Modellierungsebene. Begründet wird dies durch die differenzierten Betrachtungen, welche für eine zuverlässige und robuste Verarbeitung unscharfer Geoinformation notwendig sind. So erfordern die verschiedenen Abstraktionsstufen der verbalen Repräsentation semantische Modellierungsstrukturen. Diese erlauben es ebenfalls, fehlende Information durch einschränkende Bedingungen sowie heuristische Annahmen zu ergänzen. Ferner wird die der Information zugrunde liegende Raumvorstellung, sowie die Semantik der zur Beschreibung genutzten linguistischen Terme einbezogen. Die Berücksichtigung der semantischen und topologischen Objektrelationen bei der Modellbildung ermöglicht es indes, die sprachlich bedingten semantischen Mehrdeutigkeiten aufzulösen. Formalisiert werden diese Aspekte in einer ontologischen Wissensbasis, unter Nutzung der Web-Ontologie Sprache, welche es in Form einer Beschreibungslogik erlaubt, eine konkrete Domäne semantisch korrekt abzubilden. Die Nutzung einer Inferenzmaschine gestattet es, ausgehend von dem modellierten Wissen, erforderliche Zusammenhänge abzuleiten.

Die quantitative Beschreibung der verbalen Information erfolgt auf Basis eines funktionalen Modells. Dieses ermöglicht es, unter Berücksichtigung diverser Einflusssterme, einen Gültigkeitsraum der verbalen Information aufzuspinnen. Ausgehend von diesem Gültigkeitsraum wird ein konkretes intervallwertiges Bewertungsmaß für ein beschriebenes, intendiertes Objekt abgeleitet. Einbezogen werden dabei die Art und Aktualität der Erfassung, die Glaubwürdigkeit des Verfassers sowie die räumliche Unschärfe der Information. Überdies wird die wiederholte Beschreibung der Lage eines intendierten Objektes stützend berücksichtigt. Der konkrete Einfluss der jeweiligen Terme konnte auf Basis eines vorliegenden Meldungskorpus sowie einer statistischen Erhebung bestimmt werden. Das eingeführte Bewertungsmaß gestattet es im Weiteren für jedes Objekt die Konsistenz mit der Meldungsmenge zu bestimmen. Dies erfolgt intervallwertig im Sinne einer positiv und negativ Hypothese, sowohl für als auch gegen die Konsistenz mit der Meldungsmenge.

Eine konkrete Anwendungsschale des Verfahrens bietet die raumbezogene Auswertung freitextlicher Meldungen von katastrophalen Ereignissen. Der eigens entwickelte Prototyp namens Seneca wertet unter Nutzung des vorgestellten Verfahrens die textuell vorliegenden Meldungen vollautomatisch aus und generiert die entsprechende Lagedarstellung. So ist es dem Stabspersonal möglich, auf Basis des Bewertungsmaßes konkrete Entscheidungen zu treffen.

---

<sup>1</sup> Information wird vorliegend als nicht quantifizierbares Gut verstanden. Entsprechend ist eine Pluralisierung, im Sinne von „die Informationen“, unzulässig.



## Summary

To improve the formal integration of verbally given spatial information in a GIS (geographical information system), a methodology was developed for converting such information to a graphical representation. This was applied to examples of a spatial-related analysis of natural language text messages in the disaster management domain.

Within this domain, visualizing detailed information of the current situation is fundamental. Thereby the situation map is first of all the decision base for the emergency operation center and additionally provides information sharing between the management staff. The data acquisition of up-to-date information is based on hundreds of written free-form text messages from damage sites, given by several on-site units and passer-by. This variety of incoming reports has to be analyzed for visualization by a single operator of the managing staff. With regard to digitally distributed situation maps and in order to assist the updates, the work aims to apply an automated system in order to simplify and speed up the process of analyzing these messages.

Fundamental for processing, in particular for semantic augmentation, is the knowledgebase, an ontology which is designed with domain specific considerations to provide the necessary knowledge. The developed ontology, named Disaster Management Data Model (DM<sup>2</sup>), is focused on modeling the important aspects of objects. This includes background and context information of objects as well as the relations between them. In this manner the common spatial attributes of objects are the location as well as the geometric attributes of form, size and feature alignment. These elementary attributes are traditionally supported in spatial ontologies and geographical information systems and allow describing discrete objects unambiguously by their dimension and location in space. Nevertheless, in order to support a spatial reasoning process for disaster events based on textual descriptions, a more comprehensive level of spatial information is necessary. The method of object modeling within the ontology has to be similar to the mental model of the reporting person. This mental model contains, beside discrete objects, spatial scenes with interactions of two or more spatial objects.

Modeling orientation aspects for characterization of a spatial scene is quite complex as the orientation of objects depends on the reference frame. Thus the types of reference differ as follows: *intrinsic* (orientation is given by an inherent property), *extrinsic* (external objects impose an orientation) and *deictic* (orientation is imposed by the point of view). According to that, the intrinsic reference is given by an inherent property of the object like the front or back side of a building. Such knowledge is a priori available and can be included in the domain ontology as a specific feature. Extrinsic and deictic references are mutable, that is why they require a reference in time, like the speaker's point of view during the observation time. The basis for analyzing such references within the DM<sup>2</sup> is already given by the explicit modeling of time by tuple of object-time-location. Further aspects of orientation descriptions are the canonical identifier like *in front of*, *to the right of*, or cardinal points like *north of* which also exist in free text reports. But solving such identifier is not task of the ontology because of the inherent given deictic references.

Distance aspects also have to be considered for characterizing spatial scenes and analyzing spatial descriptions. As a basic principle quantitative and qualitative descriptions of distance parameters have to be distinguished. Quantitative descriptions are based on units of lengths (meters). In contrast qualitative distance descriptions are terms like *quite near* or *far away*. Such descriptions depend on the observer, position, size, visibility, dominance and a lot of other features.

Both aspects of distance and orientation are modeled mathematically by fuzzy logic membership functions derived from a survey of the spatial perception of persons. Moreover, a formal representation based on the possibility theory was defined to handle the contained spatial uncertainty adequately.



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	11
1.1	Forschungshypothesen.....	11
1.2	Wissenschaftlicher Kontext und Zielstellung.....	11
1.3	Domänenbeschreibung des Katastrophenmanagements.....	12
1.4	Aufbau der Ausarbeitung.....	13
Teil I		
2	Raumkognition und Modellierung qualitativer Räume.....	14
2.1	Charakterisierung des Wissens.....	14
2.2	Raumkognitive Grundlagen.....	15
2.2.1	Räumliches Referenzieren.....	15
2.2.2	Referenzrahmen.....	16
2.2.3	Raumrelationen.....	17
2.3	Metrik zur Bewertung qualitativer Räume.....	17
2.3.1	Distanzmetrik.....	17
2.3.2	Winkelmetrik.....	18
2.3.3	Topologische Metrik.....	18
2.4	Existente Verfahren zur Modellierung qualitativer Räume.....	19
2.4.1	Modellierung qualitativer Entfernungssysteme.....	19
2.4.2	Modellierung qualitativer Richtungssysteme.....	23
2.4.3	Qualitative Modellierung der Topologie.....	28
2.4.4	Kombinierte Verfahren.....	30
2.5	Zusammenfassung und Diskussion der existenten Verfahren.....	31
3	Semantische Modellierung des Raumes.....	33
3.1	Semantische Wissensmodellierung.....	33
3.2	Standards zur Modellierung von Domänenwissen.....	36
3.3	Entwickeltes ontologisches Daten-Modell.....	37
3.4	Zusammenfassung.....	42
Teil II		
4	Mathematische Modellierung unscharfer Konzepte.....	43
4.1	Unscharfe Mengen.....	43
4.2	Possibilitätstheorie.....	45
5	Entwickelte Bewertungsmethodik.....	49
5.1	Multikriterieller Bewertungsansatz.....	49
5.2	Funktionales Modell.....	50
5.3	Funktionale Beschreibung räumlicher Unschärfe.....	51
5.3.1	Erhebung zur raumkognitiven Wahrnehmung.....	51
5.3.2	Ableitung der Distanzrelationen.....	52

5.3.3	Ableitung der Richtungsrelationen.....	58
5.3.4	Räumliche Relationen.....	59
5.3.5	Ableitung qualitativer Objektrelationen.....	64
5.4	Resultierende Vagheit und temporale Gültigkeit.....	65
5.5	Funktionale Abhängigkeiten.....	67
5.6	Clustern abhängiger Fakten.....	68
5.7	Zusammenfassung.....	70
Teil III		
6	Verifikation der entwickelten Bewertungsmethodik.....	71
6.1	Verifikation der räumlichen Modellierung.....	71
6.2	Verifikation der Bewertungsparameter.....	75
6.3	Verifikation des Clusteralgorithmus.....	75
6.4	Zusammenfassung.....	77
7	Validierung der Methodik durch den operationellen Prototyp Seneca.....	78
7.1	Realisierung des Prototypen.....	78
7.2	Nutzerschnittstelle des Prototypen.....	80
7.3	Visualisierung.....	80
7.4	Datenhintergrund.....	81
7.5	Zusammenfassung.....	81
8	Ausblick.....	82
9	Verzeichnisse.....	84
9.1	Literaturverzeichnis.....	84
9.2	Abbildungsverzeichnis.....	88
9.3	Tabellenverzeichnis.....	91
9.4	Algorithmenverzeichnis.....	91
10	Anhang.....	92
10.1	Anhang A: Räumliche Beispielszene.....	92
10.2	Anhang B: Geometrische Grundlagen.....	92
10.2.1	$L_p$ -Metrik zur Distanzbestimmung.....	92
10.2.2	Winkelbestimmung im Polar- und Vektorraum.....	92
10.3	Anhang D: Prädikatenlogik erste Stufe.....	93
10.4	Anhang E: IDEF1X Notation.....	94
10.5	Anhang F: Wertetabellen zur Verifikation (Kapitel 6).....	95

*„Der Teufel ist ein Eichhörnchen“*

Sprichwort, Autor unbekannt



# 1 Einleitung

Für menschliche Operatoren ist die Verarbeitung imperfekten Wissens sehr intuitiv, da dieses der eigenen Wissensrepräsentation entspricht. Im Bereich der künstlichen Intelligenz hingegen ist die Modellierung und Verarbeitung imperfekten Wissens in all seinen Facetten seit Jahrzehnten ein weites Forschungsfeld. Mit den räumlichen Aspekten einer imperfekten, primär aber unscharfen Wissensrepräsentation beschäftigt sich schwerpunktmäßig auch diese Arbeit. Im Mittelpunkt stehen dabei die verschiedenen Stufen der Wissenstransformation, die durch den Verlauf von der physikalischen Welt (*Realität*) über die ikonische Ebene hin zur symbolischen Ebene verkörpert werden. Im vorliegenden Fall wird dieser Verlauf, ausgehend von der subjektiven Wahrnehmung einer räumlichen Szene durch menschliche Operatoren (*Realität*) über den frei formulierten Fließtext (*ikonische Ebene*) hin zur Repräsentation der Szene in einem Geoinformationssystem (*symbolische Ebene*) dargestellt (vgl. [Bähr, 2005]).

## 1.1 Forschungshypothesen

Um diese Ebenen übergreifende Wissenstransformation geschlossen formalisieren zu können, bedarf es einer *ganzheitlichen* Modellierung der verbal repräsentierten Geoinformation. Dies umfasst, um dem ganzheitlichen Anspruch gerecht zu werden, neben einer funktionalen auch eine semantische Modellierung der Domäne. So wurden zwei Thesen formuliert, welche diese Aspekte abbilden.

### These I

*Die der verbalen Repräsentation inhärente Abstraktion bedingt widersprüchliche und fehlende Information, welche durch Hintergrundwissen, Bedingungen und heuristische Annahmen weitgehend ersetzt werden kann.*

### These II

*Die automatisierte Verarbeitung verbal repräsentierter Geoinformation<sup>2</sup>, speziell der darin enthaltenen räumlichen Unschärfe, ist durch ein entsprechendes funktionales Modell möglich.*

Gelingt der Nachweis dieser Thesen, so sei ebenfalls der Nachweis erbracht, dass eine flexible Verarbeitung und Integration von verbalem, räumlichem Wissen in Geoinformationssystemen möglich ist. Sprache kann folglich als Datentyp der Fernerkundung verstanden werden (vgl. [Bähr, 2005], [Bähr und Lenk, 2002]). Entsprechend bilden diese Thesen sowohl die Grundlage wie auch den „*roten Faden*“ dieser Ausarbeitung.

## 1.2 Wissenschaftlicher Kontext und Zielstellung

Relevante Arbeiten mit dem Ziel, einen geschlossenen Ablauf von der textuell repräsentierten, raumbezogenen Information<sup>3</sup> bis zur Darstellung in einem Geoinformationssystem abzudecken, beschränken sich auf wenige Prototypen, wie *CarSim* (vgl. [Johansson et al., 2004]), *Locotagger* (vgl. [Leidner et al., 2003]) und *Sokrates* (vgl. [Schade et al., 2006]). Die Zielsetzung der verschiedenen Systeme ist jedoch sehr unterschiedlich sowie domänenspezifisch.

So generiert das System *CarSim* auf der Grundlage sprachlicher Beschreibungen animierte, dreidimensionale Darstellungen standardisierter Autounfälle. Das System *Locotagger* hingegen ermöglicht es, die durch Zeitungsartikel gegebenen Geobezüge (primär Städtenamen) in einer Karte zu visualisieren. Ähnlichkeiten zwischen dem Funktionsumfang dieser beiden Systeme und den vorliegenden Zielvorstellungen sind auf Grund der verschiedenen Niveaus räumlicher Informationsverarbeitung überwiegend formaler Natur. Der von dem Fraunhofer-

<sup>2</sup> Unter *verbal repräsentierter Geoinformation* wird vorliegend textuell repräsentierte sowie strukturierte Geoinformation subsumiert.

<sup>3</sup> Information wird vorliegend als nicht quantifizierbares Gut verstanden. Entsprechend ist eine Pluralisierung, im Sinne von „*die Informationen*“, unzulässig.

Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie<sup>4</sup> (FKIE) entwickelte militärische Prototyp *Sokrates* visualisiert die durch Meldungen der Soldaten gegebene Information von Truppenstandorten und Truppenbewegungen in einer Lagekarte. Diese Anwendung bildet zwar die Verarbeitung sprachlicher Information geschlossen ab, beachtet jedoch keine räumlichen Aspekte.

Zum derzeitigen Stand der Forschung berücksichtigt kein geschlossenes Verfahren die Aspekte der mentalen Modellbildung, der semantischen und topologischen Raumrelationen, des räumlichen Schließens sowie der sprachlichen Unschärfe bei der Verarbeitung verbaler, räumlicher Information umfassend. Diese Aspekte erscheinen jedoch unverzichtbar, um zuverlässige Ergebnisse bei der Auswertung räumlicher Referenzierungen zu erhalten. So wird folgend eine Zielstellung formuliert, welche im Sinne eines konkreten Anforderungskatalogs hinsichtlich der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodik zu verstehen ist. Es ist ein Verfahren zu entwickeln, dass:

- Domänen- und Weltwissen so umfänglich wie möglich einbezieht.
- die Semantik der räumlichen Basisrelationen, wie auch die Objekttopologie berücksichtigt.
- die räumliche Wahrnehmung des Sprechers<sup>5</sup> berücksichtigt.
- stochastisch fundiert ist.
- die primären beeinflussenden Parameter berücksichtigt.
- eine Quantifizierung der Unschärfe anhand eines geeigneten Bewertungsmaßes ermöglicht.
- vollautomatisch und performant hinsichtlich Speicher und Rechenaufwand ist.

Die konkrete Umsetzung dieser Anforderungen wird in den folgenden Kapiteln detailliert erläutert.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist die vorliegende Arbeit im Bereich der Geoinformatik einzuordnen. Ferner werden die Sprachwissenschaften, die Kognitionswissenschaften wie auch die Mathematik tangiert.

### 1.3 Domänenbeschreibung des Katastrophenmanagements

Eine fachpraktische Anwendungsschale des entwickelten Ansatzes ist die automatisierte Auswertung und Darstellung von Meldungsinformation im Katastrophenmanagement. Das Erfordernis ergibt sich aus dem Bedarf an aktueller Information als Voraussetzung für effektives und zielgerichtetes Handeln der verantwortlichen Entscheidungsträger im Katastrophenfall. Ein stets aktuelles Lagebild ist essentiell für die Verteilung der verfügbaren Ressourcen und somit für eine optimale Koordinierung jedes Einsatzes. Ferner ist die Führung der Rettungseinheiten ein äußerst dynamischer Vorgang, der einen sich wiederholenden Regelkreis aus Lagefeststellung, Planung und Befehlserhebung bildet (vgl. [SKK, 1999]). Die wichtigste Grundlage für die Lagefeststellung schaffen dabei Meldungen, welche Mitarbeiter des Führungsstabes manuell auswerten, um mit der so gewonnenen Information die Lagedarstellung fortzuführen. Primärer Bestandteil dieser Lagedarstellung ist, neben der tabellari-schen Einsatzübersicht, die stets aktuell zu haltenden Lagekarte. Da bei Großschadenslagen eine Vielzahl von Meldungen, sowohl von den Einsatzkräften als auch von Passanten eingehen, liegt eine Automatisierung der Lagekartenführung nahe. Problematisch dabei ist imperfektes Wissen, im Sinne ungewisser oder vager Information über das Ereignis, insbesondere aber über dessen Lokalisierung. Ein Auszug<sup>6</sup> einer bei der Feuerwehrleitstelle Karlsruhe eingegangenen Brandmeldung veranschaulicht diese Problematik. Darin beschreibt ein ortsfremder Passant anhand von Bezugsobjekten, wie einem *Hotel*, und unter Nutzung räumlicher Relationen, wie *neben*, das Ereignis bzw. dessen Position.

**Feuerwehrnotruf<sup>7</sup>** - *Ja hallo, hier ist Inge Mustermann, in der Elberstraße raucht es ganz schwarz aus einem Mehrfamilienhaus und zwar Haltestelle Elberstraße direkt neben dem Hotel<sup>8</sup>.* - **Sagen Sie mir bitte eine Hausnummer in der Elberstraße?** - *Oh, ich bin hier nur Fahrgast.* - **Das ist hier die Elberstraße in**

---

<sup>4</sup> Ehemals Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften e.V. (FGAN/FKIE).

<sup>5</sup> An dieser Stelle sei betont, dass bei geschlechtsspezifischen Termini, wie „Sprecher“, generell auf eine generische Lesart verwiesen wird.

<sup>6</sup> Entsprechend geltender Rechtsvorschriften wurde diese Meldung anonymisiert.

<sup>7</sup> **Fettgedruckt:** Aussagen des Mitarbeiters der Feuerwehrleitstelle.

<sup>8</sup> *Kursiv:* Aussagen des Anrufers.

**Karlsruhe?** - Die Haltestelle Elberstraße, nebendran ist ein Hotel und da raucht es ganz schwarz... - **Wie heißt denn das Hotel?** - Wie heißt denn das Hotel? Ich lauf mal ob ich es lesen kann. Also es kommt richtig aus diesem Fenster schwarzer Rauch raus. - **In welchem Fenster, wo kommt das raus?** - Also der Stock ist Erdgeschoss, eins, zweiter Stock und aus dem zweiten Stock kommt schwarzer Rauch raus, richtig kräftig und das Hotel heißt Vogel, Hotel Vogel. - **Hotel Vogel?** - Ja, direkt neben dran ist das Haus. - **Gut.** - Wird immer stärker der schwarze Rauch, da ist bestimmt was heftiges. - **Und Hausnummer haben Sie keine, Höhe etwa?** - Also ich sehe...momentmal...ich guck mal. Wenn die Bahn weg ist sehe ich die Hausnummer. - **Ja.** - Das ist ah...da steht ja garnichts. Ich sehe keine Nummer. Ah, neben der 13, dann ist es die 11. - **11** - Aber es wird immer schwärzer... - **Jawohl, Hausnummer 11.**

Um die Anforderungen der Domäne hinsichtlich der verbalen Referenzierungen einschätzen zu können, stand ein 40 Meldungen umfassender Korpus der Branddirektion Karlsruhe sowie ein 330 Meldungen umfassender Korpus einer operativ-taktischen Übung der AKNZ<sup>9</sup> zur Verfügung. Vor diesem Domänenhintergrund und unter fachlicher Führung der Branddirektion Karlsruhe erfolgt die Validierung des Verfahrens.

## 1.4 Aufbau der Ausarbeitung

Die vorliegende Ausarbeitung umfasst sieben thematische Kapitel (Kapitel 2 bis 8), welche strukturell in drei Abschnitte zu gliedern sind.

So behandelt der *erste Teil* ausführlich die in *These I* geforderte semantische Modellierung des Raumes. Dafür wird zu Beginn des Kapitels 2 in die notwendigen Termini eingeführt. Folgend wird eine Metrik formuliert, die es ermöglicht, die beschriebenen Verfahren zur Verarbeitung einzelner Aspekte qualitativer Räume hinsichtlich der formulierten Parameter zu bewerten. In Kapitel 3 wird nach einer kurzen Einführung in semantische Modellierungsmethoden eine konkrete Domänenbeschreibung auf sowohl generischem als auch domänenspezifischem Niveau erarbeitet, welche folgend die Basis des ganzheitlichen Ansatzes bildet. Diese konkrete Domänenmodellierung ist erforderlich, um die in *These I* geforderten Bedingungen und Annahmen formulieren zu können.

Im *zweiten Teil* dieser Ausarbeitung steht die funktionale Modellierung des Raumes, entsprechend *These II*, im Mittelpunkt. Beginnend führt Kapitel 4 in die Notation und die mathematischen Grundlagen auf Basis unscharfer Mengen und der daraus entwickelten Possibilitätstheorie ein. Darauf aufbauend wird in Kapitel 5 die entwickelte Bewertungsmethodik ausgeführt.

Im *dritten Teil* dieser Ausarbeitung erfolgt primär die Verifikation und Validierung des geschlossenen Verfahrens. So erbringt die Verifikation in Kapitel 6 den Nachweis, dass das Verfahren wahre Ergebnisse im Sinne der Zielstellung liefert. Die Validierung in Kapitel 7 wiederum zeigt anhand eines Prototyps, dass das Verfahren implementierbar ist und somit eine praktische Umsetzung ermöglicht. Den Abschluss dieser Ausarbeitung bildet ein Ausblick über mögliche Erweiterungen auf semantischer und funktionaler Ebene.

Intention des Autors ist die Darstellung eines geschlossenen Ansatzes zur Verarbeitung imperfekter, räumlicher Information. Daher sei dem Leser, trotz der thematischen Gliederung, eine geschlossene Leseweise zum umfassenden Verständnis empfohlen.

---

<sup>9</sup> AKNZ – Akademie für Krisenmanagement, Notfallplanung und Zivilschutz (Bad Neuenahr-Ahrweiler).

# Teil I

## 2 Raumkognition und Modellierung qualitativer Räume

Das Kapitel 1.2 zeigte, dass kein aktuelles Verfahren existent ist, welches geschlossen den in der Zielstellung formulierten Anforderungen genügt. Dennoch existieren verschiedene Verfahren, welche Teilaspekte räumlicher Relationen, respektive qualitativer Räume, formal abbilden. Diese werden folgend, nach einer Einführung in die erforderlichen Termini, vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet.

### 2.1 Charakterisierung des Wissens

Imperfektes Wissen im Sinne von *Vagheit* ist ein tragendes Thema dieser Arbeit. Aus diesem Grund werden einfürend die verschiedenen Aspekte bzw. Erscheinungsformen von Wissen, speziell aber ihre Abgrenzung gegeneinander charakterisiert.

Erkenntnistheoretisch ist Wissen definiert als die Summe aus Kognition und Logik (vgl. [Nagao, 1990]). Dabei ist Grundlegend jedoch zwischen *perfektem* und *imperfektem* Wissen zu unterscheiden. Um diese Unterscheidung klar formulieren zu können, muss zunächst in die Konzepte<sup>10</sup> *sicheres* und *unsicheres* Wissen, wie auch *scharfes* und *unscharfes* Wissen eingeführt werden. Dies geschieht unter der impliziten Annahme, dass das Wissen *wahr* (im Sinne von nicht *falsch*) ist, entsprechend [Borgelt und Kruse, 2001] wie folgt:

*sicheres Wissen* Definition 2.1

Sicheres Wissen ist gegeben, wenn davon ausgegangen werden kann, dass es wahr ist, also alle Alternativen ausgeschlossen werden.

*unsicheres Wissen* Definition 2.2

Unsicheres Wissen ist gegeben, wenn zweifelhaft bleibt, ob es wahr ist, also nicht alle Alternativen glaubhaft ausgeschlossen werden können.

*scharfes Wissen* Definition 2.3

Scharfes Wissen ist gegeben, wenn es klar bzw. hart abgegrenzt werden kann.

*unscharfes Wissen* Definition 2.4

*Unscharfes Wissen* ist gegeben, wenn eine Abgrenzung weich erfolgt.

Perfektes Wissen zeichnet sich nun dadurch, dass es sowohl *scharf* als auch *sicher* ist. Zudem ist *perfektes* Wissen *präzise* formuliert (vgl. [Borgelt und Kruse, 2001]). *Imperfektes* Wissen hingegen verletzt mindestens eine dieser Bedingungen und wird hinsichtlich der Ausprägung unterschieden (vgl. Abbildung 1). So wird von *Vagheit* gesprochen, sobald eine Information zwar *sicher*, aber *unscharf* ist (vgl. [Spott, 2000], [Biewer, 1997]). *Vagheit* ist aber keinesfalls nachteilig. Schon [Russell, 1923] betonte, dass es ein großer Fehler sei anzunehmen, *vages* Wissen müsse falsch sein. Im Gegenteil sei eine *vage* Aussage viel wahrscheinlicher wahr als eine präzise. Ist das Wissen sowohl *unscharf* als auch *unsicher*, wird von *Ungewissheit* gesprochen.

Diese abstrakt formulierten Konzepte lassen sich durch einige Beispiele veranschaulichen. So präsentiert die Aussage „*der Baum ist 7,3 Meter vom Haus entfernt*“ *perfektes* Wissen im Sinne der Definition, da die Aussage *sicher*, *präzise* und *scharf* ist. Wird die exakte Entfernungsangabe nun durch einen Intervall ersetzt, ist die Aussage „*der Baum ist zwischen 7 und 8 Meter vom Haus entfernt*“ zwar noch *sicher* und *scharf*, aber auch *impräzise*. Dies kann gesteigert werden, in dem die quantitative Entfernungsangabe gänzlich durch eine qualitative ersetzt wird. So ist von *vage* repräsentiertem Wissen zu sprechen, wenn es heißt „*der Baum ist nahe des Hauses*“. Gänzli-

---

<sup>10</sup> Im Folgenden werden zur besseren Kenntlichkeit alle Konzepte kursiv hervorgehoben.

che Sicherheit kann der Aussage genommen werden, indem sie um ein entsprechendes Adverb ergänzt wird. Die Beispielaussage hieße dann „*der Baum ist möglicherweise nahe des Hauses*“.

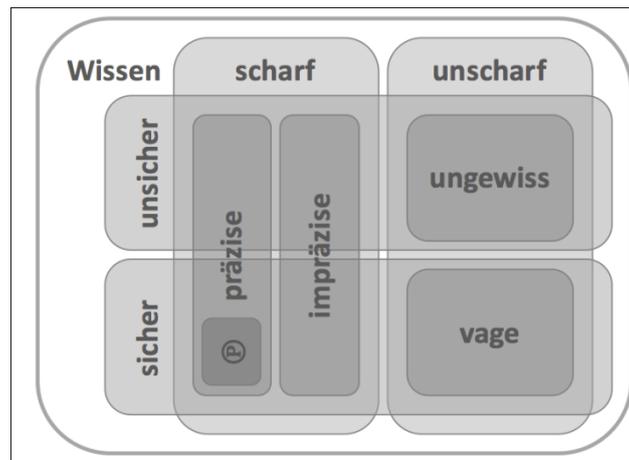


Abbildung 1: Erscheinungsformen von perfektem (©) und imperfektem Wissen

## 2.2 Raumkognitive Grundlagen

Das Verbalisieren einer räumlichen Szene, sogenanntes sprachliches Lokalisieren, zu einer Aussage wie „*der Baum steht vor dem Haus*“ beginnt entsprechend vorherrschender sprachpsychologischer Vorstellung mit einer konzeptionellen Planung. Dabei vergegenwärtigt sich der Sprecher, dass der Baum vor dem Haus steht (vgl. [Herrmann und Schweizer, 1998]). Dieser Prozess beinhaltet eine ganze Reihe kognitiver Leistungen, die der Sprecher erbringen muss, wenn er diese Aussage formuliert. So muss sowohl das Haus, als auch der Baum vom Sprecher erkannt werden. Zudem muss er wissen, wo sich diese beiden Objekte befinden und dass sie in einer Relation zueinander stehen. Dann muss der Sprecher das räumliche Beziehungskonzept *vor* verstehen und erkennen, dass das Haus, welches er als Bezugsobjekt (im weiteren *Relatum*) wählte, eine Rück- und eine Vorderseite besitzt, an welcher der Baum steht. Nun muss der Sprecher entscheiden, ob die sprachliche Übermittlung der Sachlage, dass der Baum vor dem Haus steht, hinreichend klar und eindeutig ist. Aus diesem sogenannten *Protoinput* kann nun die Aussage in der Zielsprache, hier deutsch, erzeugt werden (vgl. [Herrmann und Schweizer, 1998]).

Unter dem Begriff *Raumkognition* wird folgend diese Prozesskette, welche zur Erzeugung des Protoinput notwendig ist, subsumiert. Fraglich bleibt jedoch, was den Sprecher konkret zur Wahl der Referenzobjekte, des Referenzrahmens oder der Raumrelation bewog. Dies wird nicht zwingend auf der Ebene real existierender Objekte entschieden. Oft wird diese konzeptionelle Entscheidung auf der Ebene der gedanklichen Abbilder der Objekte, in einem mentalen Modell getroffen (vgl. [Barkowsky, 2001]). Dieser kognitiven Karte wird eine sogenannte naive Geographie zugrunde gelegt, welche die Ebene des durchschnittlichen räumlichen Verständnisses definiert (vgl. [Egenhofer und Mark, 1995]).

### 2.2.1 Räumliches Referenzieren

Beim sprachlichen Lokalisieren ergibt sich die räumliche Referenzierung aus der mentalen Rotation des eigenen Bezugssystems in ein externes Objekt, das Relatum (vgl. [Herrmann und Schweizer, 1998]). Problematisch dabei ist jedoch die Objektwahl. So könnte die in der Kapiteleinleitung gegebene Beispielaussage auch „*der Baum steht vor dem Eichhörnchen*“ lauten. Dies scheint jedoch ungeeignet zum räumlichen Referenzieren, da bedingt durch die außerordentliche Dynamik eines Eichhörnchens diese Aussage nur eine kurze Gültigkeit besäße. Im Umkehrschluss ist es dennoch nicht zweckmäßig die Referenzwahl mit den statischen Eigenschaften eines Objektes zu begründen. Unter der Annahme, dass Sprecher und Hörer vor Ort sind und mehrere Bäume und Häuser Teil der beschriebenen Szene sind, kann besagtes Eichhörnchen eine durchaus geeignete Referenz sein. Die Frage, welche Objekte sich nun als Relatum eignen, beantworten [Herrmann und Schweizer, 1998] wie folgt:

„Man kann die (...) R-Wahl damit begründen, daß der Sprecher möglichst so formuliert, daß damit die Inhalte des Partnerbewußtseins zielführend und informativ modifiziert werden. Man kann auch sagen: Man wählt  $O_i$  und R um dem Partner das Verständnis zu ermöglichen beziehungsweise zu erleichtern.“<sup>11</sup>

Diese Aussage wird gestützt durch die vier Konversationsmaximen, die [Grice, 1975] formulierte. Diese Maximen der Psycholinguistik besagen, dass Partner in einer Konversation grundsätzlich kooperativ handeln. Im Einzelnen lauten diese:

- *Quantitätsmaxim*: Der Sprecher formuliert seine Aussage genau so informativ wie es die gemeinsamen Kommunikationsziele der Gesprächspartner verlangen. Es wird also weder wichtige Information zurückgehalten, noch überflüssige gegeben.
- *Qualitätsmaxim*: Der Sprecher formuliert nur das, wofür er Evidenz besitzt. Demnach werden Vermutungen explizit als solche gekennzeichnet.
- *Relationsmaxim*: Der Sprecher schließt an den Verlauf an, der durch die Diskursituation vorgegeben wird. Dieses Maxim besagt, dass ein Sprecher dem Gesprächsfluss folgt und auf Fragen antwortet.
- *Modalitätsmaxim*: Der Sprecher formuliert klar und deutlich und versucht so Mehrdeutigkeiten zu vermeiden.

Demnach ist die Wahl des Relatum situativ und von den jeweiligen Gesprächszielen bzw. dem jeweiligen Kontext abhängig. Dennoch stellen [Herrmann und Schweizer, 1998] heraus, dass es durchaus vorteilhaft ist, das Relatum standpunktinvariant zu wählen. Diese Standpunktinvarianz ist durch sogenannte Landmarken gegeben, wie sie aus Referenzierungen bei Routenbeschreibungen hinreichend bekannt sind (vgl. [Raubal und Winter, 2002],[Elias, 2006],[Klippel und Winter, 2005] und [Klippel, 2003]).

Die Wahl des intendierten Objektes hingegen ergibt sich in der Regel aus dem Sachzusammenhang. So handelt es sich bei dem intendierten Objekt um das Objekt, dessen Lage oder Entfernung gerade von Interesse ist. In der Regel ist dies aus dem Diskurs eindeutig ableitbar. In der vorangegangenen Beispielaussage könnte die intendierende Frage lauten: „*Wo auf dem Anwesen steht der Baum?*“. Damit ist unabhängig von der Wahl des Relatums der *Baum* als intendiertes Objekt fixiert.

## 2.2.2 Referenzrahmen

Beim räumlichen Referenzieren wird mental ein Bezugssystem in das Relatum rotiert, welches als Koordinatensprung fungiert. Um räumliche Szenen widerspruchsfrei referenzieren zu können, ist es notwendig dieses Blickpunktsystem eindeutig zu orientieren. Es wird ein sogenannter Referenzrahmen festgelegt, in dem die Achsausrichtung eindeutig fixiert ist. Dabei kann entsprechend [Clementini et al., 1997] zwischen den folgenden drei Referenzrahmen unterschieden werden (vgl. [Barkowsky, 2002], [Hernandez, 1994]).

### *intrinsischer Referenzrahmen*

Definition 2.5

Beim *intrinsischen Referenzrahmen* wird das Bezugssystem entsprechend der intrinsischen Eigenschaften des Relatums orientiert.

Damit werden die Objekteigenschaften, wie Vorder- und Rückseite des Relationsobjektes zum Referenzieren genutzt. So ist die Beispielaussage „*der Baum steht vor dem Haus*“ orientiert an der Vorderseite, im Sinne des Eingangs des Hauses, welches als Relatum fungiert. Diese Referenzierung ist standpunktinvariant, da der Beobachter unberücksichtigt bleibt.

### *extrinsischer Referenzrahmen*

Definition 2.6

Beim *extrinsischen Referenzrahmen* wird die Orientierung des Bezugssystems durch externe Faktoren bestimmt.

Um dies anschaulich erklären zu können wird die räumliche Beispielszene, bisher bestehend aus Haus, Baum und Eichhörnchen, um ein Auto ergänzt. Ein extrinsischer Referenzrahmen ergibt sich nun aus der Bewegungs-

<sup>11</sup> Zitat [Herrmann und Schweizer, 1998] Seiten 44 - 45, Abkürzungen: R - Relatum und  $O_i$  - intendiertes Objekt.

richtung des Autos<sup>12</sup>, welches als Relatum fungiert. So könnte der *vor dem Auto stehende Baum* nicht nur frontal angefahren werden, sondern auch wenn dies *rückwärts* einparkt. Diese Referenzierung ist ebenfalls standpunktinvariant, aber dennoch nicht sehr stabil, da sie zeitlich begrenzt gültig ist.

#### deiktischer Referenzrahmen

Definition 2.7

Beim *deiktischen Referenzrahmen* wird die Orientierung des Bezugssystems an dem Beobachter selbst orientiert. Seine Ausrichtung zum Relatum ist demnach achsbestimmend.

Diese Art der Referenzierung wird vorwiegend genutzt, wenn das Relatum keine intrinsische Orientierung zulässt. So ist die Beispielaussage „*das Haus befindet sich hinter dem Baum*“ nur im deiktischen Sinne, vom Beobachterstandpunkt aus, zu interpretieren. Diese Art der Referenzierung ist somit nicht standpunktinvariant. Jedoch gibt es eine standpunktinvariante Interpretationsmöglichkeit deiktischer Referenzen, die aber explizit zu formulieren ist. So wäre die Beispielaussage „*von Westen aus gesehen steht das Haus hinter dem Baum*“ durch die explizite und unabhängige Blickpunktvorgabe standpunktinvariant.

### 2.2.3 Raumrelationen

Beim räumlichen Referenzieren werden Raumrelationen genutzt, um die Position zwischen dem intendierten Objekt und dem Relatum zu beschreiben. Dies sind in der Regel Lokative, also Präpositionen, welche die topologischen Richtungs-, Distanz- oder Objektrelationen definieren. Eine explizite Untersuchung bezüglich der formalen und funktionalen Auflösung dieser Relationen folgt in Kapitel 2.4.

## 2.3 Metrik zur Bewertung qualitativer Räume

Eine Metrik ist nach [Stegmüller, 1970] eine quantitative Beschreibung vorwiegend qualitativer Merkmale, was explizit als mathematische Definition messbarer Eigenschaften verstanden wird. In dieser allgemein formulierten Funktion können Metriken beispielsweise dazu dienen, die Qualität von Graphen zu beurteilen (vgl. [Bridgeman und Tamassia, 1998]). Im vorliegenden Fall wird nun eine Metrik formuliert, die es ermöglicht, anhand definierter Parameter die zur Verarbeitung räumlicher Konstellationen notwendigen Distanz-, Orientierungs- und Topologie-Systeme zu bewerten.

### 2.3.1 Distanzmetrik

Es entspricht eine Abbildung  $d := P \times \dots \times P \in \mathbb{R}^n$  einer beliebigen Punktmenge  $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$  der Distanzmetrik, wenn für die Punkte  $p_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$  im  $n$ -dimensionalen Vektorraum die folgenden axiomatischen Bedingungen erfüllt sind:

$$d(p_i, p_j) = 0 \Rightarrow p_i = p_j \quad \text{Reflexivität} \quad 2.1$$

$$d(p_i, p_j) = d(p_j, p_i) \quad \text{Symmetrie} \quad 2.2$$

$$d((p_i, p_j) \circ (p_j, p_k)) = d(p_i, p_j) + d(p_j, p_k) \quad \text{Additionstheorem}^{13} \quad 2.3$$

Um nun eine Bewertung im Sinne der Metrik auf qualitativen Distanzmaßen durchführen zu können, ist es notwendig das, jeweilige Distanzsystem in dem Vektorraum abzubilden, sofern es nicht originär in diesem definiert ist. Da eine spätere Verarbeitung der räumlichen Relationen jedoch ebenfalls im Vektorraum stattfindet, kann eine solche Projektion ferner als Bedingung im Sinne der Metrik betrachtet werden.

<sup>12</sup> Losgelöst von der intrinsischen Orientierung des Autos.

<sup>13</sup> Es wird in Formel 2.3 die in [Stegmüller, 1970] vorgeschlagene „ $\circ$ “ Notation statt des arithmetischen Symbols „+“ gewählt, da die Semantik der Addition  $d((p_1, p_2) + (p_2, p_3))$  eine andere ist. Während das arithmetische „+“ die klassische Summe zweier abstrakter Zahlenwerte meint, steht das „ $\circ$ “ für die Kombination konkreter Objekte.

### 2.3.2 Winkelmetrik

Eine Abbildung  $\varphi := V \times \dots \times V \in \mathbb{R}^n$  einer beliebigen Vektormenge  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  entspricht der Winkelmetrik, wenn für die Vektoren  $v_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  im n-dimensionalen Vektorraum<sup>14</sup> die folgenden axiomatischen Bedingungen erfüllt sind:

$$-\sin \varphi_i = \sin(-\varphi_i) \text{ sowie } \cos \varphi_i = \cos(-\varphi_i) \quad \text{Symmetrie} \quad 2.4$$

$$\varphi_i = 2\pi \pm \varphi_i \quad \text{Normierung} \quad 2.5$$

$$\varphi(v_i, v_j) = \pi \pm \varphi(v_j, v_i) \quad \text{inverse Winkelbeziehung} \quad 2.6$$

Die Winkelsysteme sind zur Bewertung im Sinne der Metrik ebenfalls im Vektorraum abzubilden, sofern sie nicht schon in diesem definiert sind.

### 2.3.3 Topologische Metrik

Eine Relation  $R$  aus dem Universum  $\Omega_R$  zwischen Objekten einer beliebigen Objektmenge  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_n\}$  heißt topologische Metrik, wenn für die Objekte  $o_i$  folgende axiomatische Bedingungen erfüllt sind:

$$\forall o_i \in O | o_i R o_i \quad \text{Reflexivität} \quad 2.7$$

$$\forall o_i, o_j \in O | o_i R o_j = o_j R^{-1} o_i \quad \text{Symmetrie}^{15} \quad 2.8$$

$$\Omega_R \in \{\text{disjunkt}, \text{schneidet}, \text{enthalten}, \text{enthält}, \text{gleich}\} \quad 2.9$$

$$\forall R \in \Omega_R | \{\text{skaleninvariant} \wedge \text{rotationsinvariant} \wedge \text{translationsinvariant}\} \quad 2.10$$

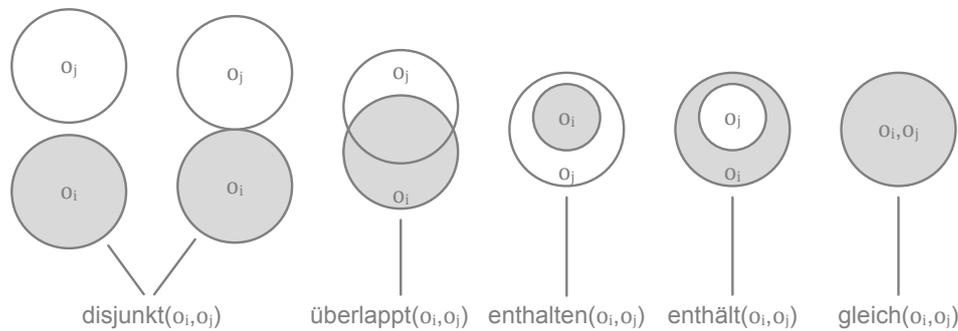


Abbildung 2: graphische Repräsentation der entsprechend der Metrik zulässigen topologischen Relationen von  $\Omega_R$

Das in Formel 2.9 formulierte Universum  $\Omega_R$  lässt in der Form die Semantik offen. Da diese jedoch nicht vernachlässigt werden darf, wird ergänzend für jede topologische Relation die Semantik durch topologische Zwänge definiert. Dabei ist  $o_i$  ein reguläres geschlossenes Objekt, bestehend aus einem Inneren  $\delta o_i$  und einem Rand  $o_i^\circ$ , für das gilt  $o_i = \delta o_i \cup o_i^\circ$ . Die Relationen sind demnach definiert durch:

$$\text{disjunkt}(o_i, o_j) := \delta o_i \cap \delta o_j = \emptyset \quad 2.11$$

$$\text{schneidet}(o_i, o_j) := \delta o_i \cap \delta o_j \neq \emptyset, o_i \not\subseteq o_j, o_j \not\subseteq o_i \quad 2.12$$

$$\text{enthalten}(o_i, o_j) := o_i \subset o_j \quad 2.13$$

<sup>14</sup> Hier im Sinne eines Prähilbertraumes, also eines speziellen Vektorraumes in dem das Skalarprodukt  $\langle v_i, v_j \rangle$  definiert ist und somit auch Winkelbeziehungen zulässig sind.

<sup>15</sup> Die Symmetrie ist hinsichtlich der Relationsinversen  $R^{-1}$  definiert. So bildet bspw. die Relation *disjunkt* hinsichtlich der Inversen auf sich selbst ab, die Relation *enthalten* jedoch auf *enthält*.

$$\text{enthält}(o_i, o_j) := o_i \supset o_j \quad 2.14$$

$$\text{gleich}(o_i, o_j) := o_i = o_j \quad 2.15$$

Zur Veranschaulichung wird die Menge zulässiger Topologiekonzepte in Abbildung 2 illustriert.

## 2.4 Existente Verfahren zur Modellierung qualitativer Räume

Folgend wird dargestellt, welche Möglichkeiten zur Verfügung stehen, um qualitative Räume formal und funktional zu beschreiben. Dabei wird thematisch zwischen Entfernung, Richtung und Topologie unterschieden. Dieser Abschnitt kann demnach als Überblick über den derzeitigen Stand der Wissenschaft verstanden werden. Abschließend, nach Vorstellung eines Verfahrens, wird jeweils eine Einschätzung hinsichtlich der Metrik vorgenommen. Dadurch wird ermöglicht die Eignung eines Verfahrens konkret abzuschätzen.

### 2.4.1 Modellierung qualitativer Entfernungssysteme

Der Umgang mit qualitativen Entfernungen ist für menschliche Operateure sehr viel intuitiver als der Umgang mit quantitativen Distanzangaben, da dies der menschlichen Vorstellung von Entfernungen besser entspricht. Von entscheidender Bedeutung ist jedoch die Skalierung. So trifft, bezogen auf das Beispiel aus Abschnitt 2.2, die Aussage „*der Baum befindet sich nahe des Hauses*“ zu. Bezogen auf den Kontinent Europa ist jedoch die Aussage „*Karlsruhe befindet sich nahe München*“ ebenfalls richtig. Um dieses Paradoxon aufzulösen, beschrieb [Montello, 1993] ein räumliches Skalensystem, das vier psychologische Räume unterscheidet. Darin setzte er die Größe des jeweiligen Skalenraumes bei der projektiven Wahrnehmung mit dem menschlichen Körper in Relation. Folgend sind diese Skalenräume beschrieben<sup>16</sup>:

- *figural space*: Dieser Skalenraum ist kleiner als der menschliche Körper, veränderbar und lässt sich vollständig überblicken, ohne dass der Betrachter den Kopf drehen müsste. Damit ist dieser Skalenraum etwa mit der Ausdehnung eines Schreibtisches vergleichbar.
- *vista space*: Dieser Skalenraum ist vergleichbar mit der Größe des menschlichen Körpers und ist ohne größeren Aufwand erfassbar. Damit hat er in etwa die Ausdehnung von Zimmern, Hallen oder kleineren Stadtplätzen.
- *environmental space*: Dieser Skalenraum umgibt den menschlichen Körper und besitzt etwa die Dimension von Gebäuden bzw. Städten. Dadurch ist dieser Skalenraum prinzipiell in Gänze erfahrbar.
- *geographical space*: Dieser Skalenraum besitzt die Dimension von Regionen, Kontinenten und im Grunde auch Sonnensystemen. Dieser Raum ist nicht mehr erfahrbar, sondern einzig auf symbolischer Ebene wahrzunehmen.

Entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit beziehen sich die Betrachtungen auf innerstädtische Szenen. Diese sind, gemäß der Einteilungen Montellos, dem *environmental space* zuzuordnen. Für die folgenden Betrachtungen erfährt der Skalenbereich jedoch noch eine weitere Einschränkung, welche sich durch den Ereignishorizont eines Beobachters im innerstädtischen Raum begründet. Dieser ist an den Sichtachsen orientiert und ergibt sich demnach aus dem, von einem Standpunkt aus maximal beobachtbaren bzw. einsehbaren Raum. Das ist jedoch nicht bezogen auf einen konkreten Standpunkt, sondern im abstrakten Sinne zu interpretieren.

Es beziehen sich die folgenden Betrachtungen einzig auf nulldimensionale Objekte, was sich durch den aktuellen Forschungsstand begründet. Demnach werden mehrdimensionale Objekte auf Ihren Schwerpunkt reduziert.

#### *Entfernungsbereiche nach Clementini*

Die Definition der Entfernungsbereiche entsprechend [Clementini et al., 1997] basiert auf einem Selbstbezug der Distanzen, also einer vergleichenden Betrachtung. Dafür werden beginnend eindimensionale Systeme definiert, welche die Abgrenzungen der jeweiligen Bereiche beschreiben. Die Systeme bilden nun disjunkte Intervalle  $\delta_n$  über den Definitionsbereich, wodurch jeder diskrete Punkt eindeutig einem Intervall zuzuordnen ist. Ferner unterliegen diese Intervalle einer Ordnung, so dass  $\delta_o$  das dem Relatum nächste Intervall und  $\delta_n$  das dem

<sup>16</sup> Aus Ermangelung einer adäquaten Übersetzung werden die englischsprachigen Skalenbezeichnungen beibehalten.

Relatum entfernteste ist. Die Systeme werden als homogen angenommen, was bedeutet, dass zu jedem System eine Regel formuliert werden kann, nach der sich die Intervallgröße bestimmt.  $\Delta_n$  beschreibt ein Intervall mit der Länge, die sich aus der Summe aller Intervalle  $\delta_i$  kleiner  $\delta_n$ , inklusive  $\delta_n$  ergibt ( $\Delta_n = \delta_0 + \delta_1 + \dots + \delta_n$ ).

Wird  $\Delta_n$  als Abstand vom Relatum zum intendierten Objekt interpretiert, welcher die bekannte Relation *fern* belegt, kann dem Distanzsystem folgend diese Relation zugewiesen werden. Beispielhaft modelliert hieße das  $fern \geq \Delta_n$ . [Clementini et al., 1997] definierte einige Entfernungssysteme, von denen eines exemplarisch dargestellt wird. Durch die formale Bedingung 2.16 definiert er Bereiche  $\delta$ , die jeweils größer als die Summe ihrer Vorgänger sind.

$$\delta_n \geq \Delta_{n-1}, \forall n > 0 \tag{2.16}$$

Er intendiert mit dieser Art der quantitativen Distanzinterpretation die vermeintlich heterogene Entfernungsvorstellung menschlicher Operateure besser abbilden zu können. Begründet wird dies damit, dass nah am Relatum liegende Distanzen feingliedriger kogniziert werden als entferntere Distanzen.

Dieses Distanzsystem gilt im Sinne der Distanzmetrik als reflexiv und symmetrisch. Auf Grund der intervallwertigen Definition ist es jedoch nicht zwingend additiv. So wird eine konkrete Distanz zwischen zwei Objekten nicht exakt repräsentiert, sondern durch das Intervall in dessen Bereich sie fällt. Bei der Addition zweier derart repräsentierter Distanzen können, bei ungünstiger Lage der jeweiligen Objekte, Fehlzuordnungen durch die Summation auftreten.

*Distanzkalkül nach Frank*

Das Kalkül von [Frank, 1992] basiert auf der Festlegung einer Wertmenge  $D$ , die den Wertebereich, auf dem abgebildet werden soll, definiert. Für diese Wertmenge ist ebenfalls eine Ordnung festzulegen. Eine qualitative Distanz definiert nun, wie eine euklidische auch, die Entfernung zwischen zwei realen Punkten, dem Relatum und dem intendierten Objekt. Demzufolge müssen qualitative Distanzen auch bijektiv auf euklidischen Distanzen abbildbar sein. Zur Gewährleistung dessen formulierte Frank die Eigenschaften euklidischer Distanzen für den qualitativen Fall, unter Nutzung eines Additionsoperators  $+_d$  und eines Vergleichsoperators  $\geq_d$ . Entsprechend dieser Festsetzungen ergibt sich die Definition des sogenannten *Distanzsystems* (vgl. Formel 2.17). Dieses ermöglicht es, gleich gerichtete qualitative Distanzen primär additiv zu verarbeiten.

$$d_1 +_d d_2 \geq_d \max_d(d_1, d_2) \tag{2.17}$$

Problematisch sind dabei jedoch Operationen auf sogenannten multi-step Distanzen. Damit sind Wertmengen bezeichnet, die mehr als zwei Elemente besitzen. Für den Fall formulierte Frank drei separate Distanzsysteme (vgl. 2.18, 2.19, 2.20). Diese ermöglichen es, durch den Additionsoperator  $+_d$ , basierend auf Kombination der Maximumfunktion und der Nachfolgerfunktion<sup>17</sup> Operationen auf diesen multi-step Distanzen auszuführen.

Systemwahlbedingt resultieren daraus jedoch Unterschiede in der Ergebnismenge. Am Beispiel der vierteiligen Wertmenge  $D_4 = \{sehr\ nah, nah, fern, sehr\ fern\}$ , deren Ordnung sich aus der Reihenfolge ergibt, seien diese Unterschiede in Tabelle 1 aufgezeigt.

$$d_1 +_d d_2 = \max_d(d_1, d_2) \quad \text{erstes Distanzsystem} \tag{2.18}$$

$$d_1 +_d d_2 = \begin{cases} d_1 & \text{wenn } d_2 = 0 \\ d_2 & \text{wenn } d_1 = 0 \\ succ_d(d_1) & \text{wenn } d_1 = d_2 \\ \max_d(d_1, d_2) & \text{wenn } d_1 \neq d_2 \end{cases} \quad \text{zweites Distanzsystem} \tag{2.19}$$

$$d_1 +_d d_2 = succ_d(\max_d(d_1, d_2)) \quad \text{drittes Distanzsystem} \tag{2.20}$$

<sup>17</sup> Nachfolgerrelation *successor*, def.:  $succ(q_i) = q_{i+1} \mid \forall i < n$ .

	<i>Distanzsystem 1</i>	<i>Distanzsystem 2</i>	<i>Distanzsystem 3</i>
<i>nah +<sub>d</sub> nah</i>	<i>nah</i>	<i>fern</i>	<i>fern</i>
<i>nah +<sub>d</sub> fern</i>	<i>fern</i>	<i>fern</i>	<i>sehr fern</i>
<i>fern +<sub>d</sub> fern</i>	<i>fern</i>	<i>sehr fern</i>	<i>sehr fern</i>

Tabelle 1: Ergebnisunterschiede der Operationen *nah +<sub>d</sub> nah*, *nah +<sub>d</sub> fern* sowie *fern +<sub>d</sub> fern* bei der Nutzung der drei Distanzsysteme, angewandt auf die vierteilige Wertmenge  $D_4 = \{\text{sehr nah, nah, fern, sehr fern}\}$

Frank schlägt ebenfalls eine geometrische Interpretation seines Distanzkalküles zur Verarbeitung konkreter Distanzen vor. Dafür werden die qualitativen Distanzen lückenlos auf die positiven reellen Zahlen  $\mathbb{R}^+$  inklusive 0 abgebildet. Dies erfolgt durch die Bildung disjunkter Intervalle, entsprechend Formel 2.21.

$$\mathbb{R}_0^+ = [a_0 = 0, e_0) \cup [a_1 = e_0, e_1) \cup \dots \cup [a_{n-1} = e_{n-2}, \infty) \text{ mit } 0 < e_0 < \dots < e_{n-2} \quad 2.21$$

Um nun Operationen auf diesen Intervallen abzubilden, weicht Frank im geometrischen Fall von seinem Distanzsystem ab und definiert die durchführbaren Operationen entsprechend der Vektoralgebra (vgl. Formel 2.22).

$$d_i +_d d_j = [a_i, e_i) +_v [a_j, e_j) = [a_i + a_j, e_i + e_j) \quad 2.22$$

Um jedoch das Ergebnisintervall  $[a_i, e_i)$  scharf auf eine quantitative Distanz abbilden zu können, wird eine Kategorisierungsfunktion  $f$  benötigt (vgl. Formel 2.23). Diese ordnet ein Ergebnisintervall anhand des Intervallschwerpunktes einem Distanzintervall der Wertmenge scharf zu. Beispielhaft ist dies für die Wertmenge  $D_d = \{\text{nah, mittel, fern}\}$  in Tabelle 2 dargestellt.

$$f: [a_i, e_i) \rightarrow \{\text{nah, mittel, fern}\} \quad 2.23$$

$+_v$	$[0, 2) \rightarrow \text{nah}$	$[2, 4) \rightarrow \text{mittel}$	$[4, \infty) \rightarrow \text{fern}$
$[0, 2) \rightarrow \text{nah}$	$[0, 4) \rightarrow \text{nah}$	$[2, 6) \rightarrow \text{mittel}$	$[4, \infty) \rightarrow \text{fern}$
$[2, 4) \rightarrow \text{mittel}$	$[2, 6) \rightarrow \text{mittel}$	$[4, 8) \rightarrow \text{fern}$	$[6, \infty) \rightarrow \text{fern}$
$[4, \infty) \rightarrow \text{fern}$	$[4, \infty) \rightarrow \text{fern}$	$[6, \infty) \rightarrow \text{fern}$	$[8, \infty) \rightarrow \text{fern}$

Tabelle 2: geometrische Interpretation der Relationenaddition angewandt auf die dreiteilige Wertmenge  $D_d = \{\text{nah, mittel, fern}\}$

Frank selbst bewertete sein Distanzkalkül als „recht gut“. Dabei führte er an, dass bei einer Verifikation ausgehend von einer dreiteiligen Wertmenge mehr als 80 % der Resultate als richtig anzusehen sind, bei zweiteiligen Wertmengen mehr als 85 %.

Das Distanzkalkül ist bezüglich der Distanzmetrik differenziert zu betrachten. Der qualitative Ansatz des Kalküls von Frank ist zwar reflexiv und symmetrisch, aber auf Grund der neutralwertigen Interpretation der Relation *nah* nicht additiv. Dieses neutrale Element ist bei jeder Operation wirkungslos, woraus sich ein Grenzwertproblem ergibt, da die beliebige Wiederholung der Operation (*nah +<sub>d</sub> nah*) gegen *nah* konvergiert<sup>18</sup>. Der quantitative Ansatz des Kalküls ist ebenfalls reflexiv und symmetrisch, jedoch auch additiv. Dies begründet sich durch den auf Basis der Vektoralgebra definierten Operanden.

<sup>18</sup> Formal dargestellt durch:  $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_0^n \text{nah} = \text{nah}$ .

## Vergleichende Verfahren zur Verarbeitung qualitativer Distanzen

### $\Delta$ -Kalkül

Das  $\Delta$ -Kalkül (vgl. [Zimmermann, 1995]) basiert, ähnlich den Entfernungsbereichen Clementinis, auf einer relativen Betrachtung der Distanzen zueinander. So baut das  $\Delta$ -Kalkül darauf auf, dass ein menschlicher Operateur Distanzen die unterschiedlich lang sind auch als unterschiedlich lang erkennt. Formal existieren demnach zwei Strecken  $d_i$  und  $d_j$ , wobei  $d_i$  um den Betrag  $\Delta$  länger sei als  $d_j$  (vgl. Formel 2.24).

$$d_i > d_j \wedge (d_i = \Delta + d_j) \quad 2.24$$

Wenn nun der Betrag  $\Delta$  bekannt ist, folglich  $\Delta = x$  gilt, kann in der von Zimmermann vorgeschlagenen binären Notation geschrieben werden:

$$d_i(>, x) d_j \quad 2.25$$

Zur Kombination mehrere Aussagen stehen die Relationen  $>$ ,  $<$  und  $=$ <sup>19</sup> zur Verfügung, was ebenfalls die Formulierung mehrstelliger Relationen ermöglicht und somit die Ausdrucksstärke erhöht. Auf dieser Basis kann auf räumliche Verhältnismäßigkeiten geschlossen werden. So vermag, basierend auf der Aussage, dass  $d_i$  um  $x$  länger als  $d_j$  ist und der Aussage, dass  $d_k$  kürzer als  $d_j$  ist, geschlossen werden, dass  $d_i$  um den Betrag  $x$  und  $\Delta$  länger als  $d_k$  ist (vgl. Formel 2.26).

$$d_i(>, x) d_j \wedge d_k(<, \Delta) d_j \Rightarrow d_i(>, (x, \Delta)) d_k \quad 2.26$$

Zur Ermittlung von konkreten Distanzen werden nun Referenzentfernungen benötigt. Sind diese ausreichend vorhanden, kann über den Rückbezug auf die konkrete Länge der Zieldistanz geschlossen werden.

Im Sinne der Metrik ist das  $\Delta$ -Kalkül reflexiv und symmetrisch. Die Additivität ist jedoch nicht nachweisbar. Unter der Annahme das  $d_i(<, \Delta_i) d_r$  und  $d_j(<, \Delta_j) d_r$  bekannt sind, ist die Addition  $d_k = d_i + d_j$  durch dieses Kalkül nicht darstellbar, da weder Aussagen über das Verhältnis von  $d_k$  zur Referenzdistanz  $d_r$ , noch Aussagen über das Verhältnis  $d_i$  zu  $d_j$  möglich sind.

### Größenvergleichsverfahren

Das Größenvergleichsverfahren nach [Mavrouniotis und Stephanopoulos, 1990] basiert auf dem gleichen Ansatz wie das  $\Delta$ -Kalkül und vergleicht Distanzen relativ zu einander, nutzt dabei jedoch Kompositionen von Relationen. So wird ein Basissatz von sieben primitiven binären Relationen definiert, die Tabelle 3 darstellt. Zur Erhöhung der Granularität der darstellbaren Relationen können diese durch den Verknüpfungsoperator  $\sim$  kombiniert werden. So stellt sich die Relation  $d_i$  ist größer als, oder etwa gleich  $d_j$  dar durch Formel 2.27.

$$d_i \sim \langle \dots \rangle d_j \quad 2.27$$

Bei der Kombination bestehen jedoch logische Restriktionen. So dürfen keine Relationen verknüpft werden die sich gegenseitig ausschließen bzw. Redundanz schaffen. Ebenfalls ausgeschlossen sind Negationen im Sinne von  $d_i$  ist nicht viel größer als  $d_j$ . Resultierend ergeben sich damit 21 weitere zulässige Kompositionen, welche zur Beschreibung qualitativer Distanzen genutzt werden können. Über den Vergleich verschiedener qualitativer Distanzen besteht, dem  $\Delta$ -Kalkül gleich, die Möglichkeit neue Abhängigkeiten zu definieren. Der darauf aufbauende Schlussmechanismus entspricht somit auch dem Prinzip des Modus Barbara<sup>20</sup>.

Basierend auf der konzeptionellen Nähe dieses Distanzsystems zum  $\Delta$ -Kalkül ist die Bewertung bezüglich der Metrik übertragbar. So ist sowohl die Reflexivität, als auch die Symmetrie gegeben, die Additivität ist jedoch nicht anzunehmen.

<sup>19</sup> Formal dargestellt durch:  $d_i(=, \emptyset) d_j$ .

<sup>20</sup> Modus Barbara, als Spezialfall des Kettenschlusses: Wenn  $A \rightarrow B$  und  $B \rightarrow C$ , dann  $A \rightarrow C$ .

Relation	Auslegung
$d_i \ll d_j$	$d_i$ ist viel kleiner als $d_j$
$d_i \sim < d_j$	$d_i$ ist mäßig kleiner als $d_j$
$d_i - < d_j$	$d_i$ ist ein wenig kleiner als $d_j$
$d_i = = d_j$	$d_i$ ist genau gleich zu $d_j$
$d_i > - d_j$	$d_i$ ist ein wenig größer als $d_j$
$d_i > \sim d_j$	$d_i$ ist mäßig größer als $d_j$
$d_i \gg d_j$	$d_i$ ist viel größer als $d_j$

Tabelle 3: Basisrelationen des Größenvergleichsverfahrens nach [Mavrovouniotis und Stephanopoulos, 1990]

### Wegkostenfunktionen

In der Informatik werden Kostenfunktionen oft genutzt, um semantische Distanzen zu beschreiben. So lassen sich Erreichbarkeit oder Wegaufwand im idealisierten Fall durch eine Wegkostenfunktion der Form 2.28 abbilden.

$$d_w(p_i, p_j) = k_c \cdot d_{\text{euklidisch}}(p_i, p_j) \quad 2.28$$

Der Kostenfaktor  $k_c$  kann beispielhaft durch die verrichtete Arbeit  $W$  in Kilojoule spezifiziert werden. So ist der Wegaufwand zum Besteigen eines Berges ein größerer als der Wegaufwand des Abstieges. Qualitativ lassen sich derart anisotrope Distanzen modellieren, welche der Wahrnehmung menschlicher Operateure entsprechen.

Im Sinne der Metrik sind Wegkostenfunktionen jedoch ungeeignet. Zwar sind sie additiv und reflexiv, aber sie sind, wie das oben beschriebene Beispiel verdeutlicht, nicht zwangsweise symmetrisch. Das ist erwartungsgemäß, da sich semantische Distanzen im Allgemeinen nicht auf zweidimensionale Punkte, sondern auf Objekte höherer Dimension beziehen.

## 2.4.2 Modellierung qualitativer Richtungssysteme

Zum eindeutigen verbalen fixieren räumlicher Szenen sind Richtungsbeschreibungen unverzichtbar. Diese werden allerdings intuitiv ausnahmslos qualitativ abgegeben. So ist kaum vorstellbar, dass ein Aussage wie „*der Baum steht, vom Haus aus gesehen, etwa 278° verschränkt zu Koordinatennord*“ frei formuliert werden würde. Sehr viel intuitiver ist da das qualitative Komplement „*der Baum steht westlich des Hauses*“ unter Nutzung der Kardinalrichtungen. Dennoch ist die räumliche Auslegung dieser qualitativen Angabe nicht eindeutig. Noch unbestimmter ist jedoch die räumliche Interpretation der kanonischen Bezeichner wie *rechts von* oder *vor*.

### Orientierungen nulldimensionaler Objekte

Bei sogenannten nulldimensionalen Objekten handelt es sich um Schwerpunkte, welche die Lage mehrdimensionaler Objekte repräsentieren. Diese Schwerpunktreduktion hat den Vorteil, dass sich keine Entscheidungsprobleme ergeben und die getroffene Orientierungsentscheidung in der Regel für mehr als 50 % eines trivialen Objektes zutrifft.

#### Sektor basiertes Orientierungskonzept

Zur Definition der räumlichen Gültigkeit qualitativer Orientierungen schlägt [Haar, 1976]<sup>21</sup> eine sektorale Interpretation der Richtungsbezeichner in beliebiger Ausdruckstiefe vor. Diese werden Level genannt, ergänzt um eine Indexnummer, welche in der Notation zur eindeutigen Identifizierung geführt wird.  $Level_1$  stellt nun eine sehr grobe Unterteilung dar und unterscheidet einzig zwischen den zwei Kardinalrichtungen *nördlich<sub>1</sub>* und *süd-*

<sup>21</sup> Zitiert nach [Hernandez, 1994].

*lich*<sub>1</sub> oder *westlich*<sub>1</sub> und *östlich*<sub>1</sub> (vgl. Abbildung 3, links). Dieses Konzept kann natürlich bedeutungsgleich auf die vorwiegend intrinsischen Orientierungskonzepte *vor*<sub>1</sub> und *hinten*<sub>1</sub>, sowie *rechts*<sub>1</sub> und *links*<sub>1</sub> angewandt werden. Für den seltenen Fall, dass das intendierte Objekt keiner der beiden Orientierungen zuzuordnen ist, sich folglich auf der Referenzlinie selbst befindet, wird es als *kollinear*<sub>1</sub> bezeichnet.

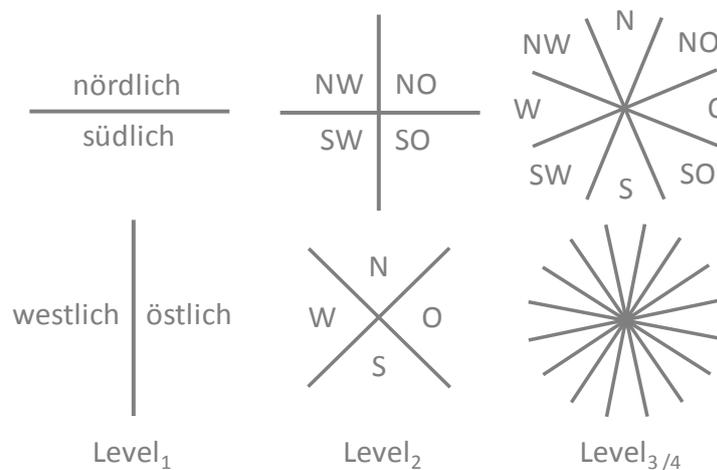


Abbildung 3: Unterteilung der Kardinalrichtungen in Level<sub>1-4</sub>

Die Orientierungsrelationen des Level<sub>2</sub> ergeben sich durch schlichte Überlagerung der beiden Orientierungskonzepte des Level<sub>1</sub>. Dabei entstehen die vier Richtungsrelationen *nordwestlich*<sub>2</sub>, *nordöstlich*<sub>2</sub>, *südöstlich*<sub>2</sub> und *südwestlich*<sub>2</sub> (vgl. Abbildung 3, mittig oben). Ferner wird noch eine zweite Interpretation der Level<sub>2</sub> Richtungsrelationen vorgeschlagen, welche durch eine Drehung um 45° erreicht wird. Dabei entstehen die Relationen *nördlich*<sub>2</sub>, *östlich*<sub>2</sub>, *südlich*<sub>2</sub> und *westlich*<sub>2</sub> (vgl. Abbildung 3, mittig unten). Die dazu komplementären intrinsischen Richtungsrelationen ergeben sich ebenfalls durch Überlagerung der jeweiligen Level<sub>1</sub> Relationen.

Durch weitere Teilung der Quadranten lassen sich die acht Level<sub>3</sub> Richtungsrelationen *nördlich*<sub>3</sub>, *nordöstlich*<sub>3</sub>, *östlich*<sub>3</sub>, *südöstlich*<sub>3</sub>, *südlich*<sub>3</sub>, *südwestlich*<sub>3</sub>, *westlich*<sub>3</sub> sowie *nordwestlich*<sub>3</sub> erzeugen (vgl. Abbildung 3, rechts oben). Abgebildet auf die vorwiegend intrinsischen Richtungsrelationen ergeben sich nun die Orientierungen *vor*<sub>3</sub>, *rechts-vorn*<sub>3</sub>, *rechts*<sub>3</sub>, *rechts-hinten*<sub>3</sub>, *hinten*<sub>3</sub>, *links-hinten*<sub>3</sub>, *links*<sub>3</sub> sowie *links-vorn*<sub>3</sub>. Die sich aus Mischung der üblichen *vorn-hinten* und *rechts-links* Konzepte ergebenden Orientierung erscheinen dabei jedoch als nicht intuitiv.

Durch erneutes teilen der jeweiligen Sektoren lassen sich Richtungskonzepte beliebiger Leveltiefe erzeugen. Dies ist exemplarisch für die Richtungsrelationen des Level<sub>4</sub> in Abbildung 3 (rechts unten) dargestellt. Dieses Level bildet damit Orientierungen der Art *nordnordwest*<sub>4</sub> ab. Die Sinnhaftigkeit weiterer Leveltiefen bleibt jedoch fraglich, da unter anderem adäquate sprachliche Konzepte fehlen.

Um die Eigenschaften bezüglich der Metrik zu bewerten, wird ein konkreter Sektor im Vektorraum abgebildet. Werden nun die Operationen entsprechend der Metrik im polaren Raum ausgeführt und zurück in den Modellraum projiziert, zeigt sich, dass dieses sektorale Orientierungskonzept symmetrisch, normierbar und invertierbar ist.

#### Orientierungskonzept mit neutraler Zone

[Frank, 1992] entwickelte ein Orientierungskonzept, welches bei den *zwei* und *vier* Richtungen umfassenden Konzepten äquivalent zu den von Haar formulierten Level<sub>1</sub> und Level<sub>2</sub> Konzepten ist (vgl. Abbildung 3). Die Betrachtungen weichen jedoch bei dem acht Richtungen umfassenden Konzept, respektive Level<sub>3</sub>, entscheidend ab. So definiert Frank eine neutrale Zone, die das Relatum unmittelbar umgibt (vgl. Abbildung 4). Begründet wird dies mit einer mangelnden Entscheidbarkeit der Kardinalrichtungen im Nahbereich. So neigen, entsprechend [Frank, 1992], menschliche Operateure dazu in diesem Bereich einzig auf die Entfernungsrelation *nah* zu verweisen. Die exakte Ausdehnung dieser neutralen Zone wird jedoch nicht spezifiziert. So ist diese „weich“ definiert, was Frank dadurch begründet, dass ein menschlicher Operateur außerhalb der neutralen Zone automatisch eine entsprechende Richtungsrelation zur Beschreibung nutzt. Zudem wird darauf verwiesen, dass die in Abbildung 4 illustrierte Aufteilung der Richtungsrelationen lediglich eine Abstraktion zur Verdeutlichung der neutralen Zone

darstellt und keinesfalls eine konkrete Einteilung der Richtungskonzepte. Ferner bleibt unklar ob dieses Orientierungskonzept auch auf die intrinsischen Richtungsbezeichner abbildbar ist.

NW	N	NO
W	∅	O
SW	S	SO

Abbildung 4: Unterteilung der acht Kardinalrichtungen mit neutraler Zone (∅)

Dieses Richtungskonzept ist entsprechend der Metrik symmetrisch und normierbar. Die Richtungsinverse der neutralen Zone wird auf sich selbst abgebildet und stellt somit keine reguläre Inverse dar.

*Vektorbasiertes Orientierungskonzept*

Der Ansatz von [Freksa, 1992] basiert auf einer vektoriellen Sichtweise. So wird ausgehend vom Relatum ein der intrinsischen Orientierung entsprechender Vektor definiert. Aus dieser Gerichtetheit des Vektors lassen sich per se die Orientierungen *selbe Richtung*, *Gegenrichtung*, *links* und *rechts* ableiten (vgl. Abbildung 5 links). Durch Definition weiterer räumlicher Richtungsrelationen lassen sich diese auf die acht Relationen *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)* erweitern (vgl. Abbildung 5 mittig). Dabei wird nicht einzig die Orientierung, sondern auch die Länge des Vektors berücksichtigt. Dies kann jedoch erst mit Hilfe der Matrixschreibweise der Richtungsrelationen abgebildet werden (vgl. Formel 2.29). Diese leitet sich zum einen aus der räumlich erweiterten Vektordefinition der Richtungen ab und zum anderen aus den dazu inversen Richtungsrelationen (vgl. Abbildung 5 rechts). So repräsentiert jedes Element der Matrix eine zweistellige Relation bestehend aus Vor- und Rückblick (vgl. Formel 2.29, Vor- und Rückblick getrennt durch | ).

$$dir_{R,O_i} = \begin{pmatrix} 7|3 & 0|4 & 1|5 \\ 6|3 & 0_i|4 & 2|5 \\ 5|3 & 4|4 & 3|5 \\ 5|2 & 4|R & 3|6 \\ 5|1 & 4|0 & 3|7 \end{pmatrix} \tag{2.29}$$

Eine Abbildung dieser intrinsischen Richtungsrelationen auf die Kardinalrichtungen gelingt durch die Ausrichtung des Referenzvektors parallel zum Nordvektor. Nun kann die Relation *rechts* mit der Kardinalrichtung *östlich* gleichgesetzt werden.

Der hier formulierte Richtungsvektor ist, entsprechend der Vektoralgebra, symmetrisch und normierbar. Die Bildung der Winkelinverse wird jedoch durch die Menge der definierten Vektorrichtungen stark eingeschränkt und ist per se aus der Richtungsmatrix ableitbar. So stellt das Konzept *rechts hinten* die Inverse zu dem Richtungskonzept *links vorne* dar, wie auch zu den Konzepten *neutral links* sowie *hinten links*. Dies zeigt eine Mehrdeutigkeit, die mit der Metrik unvereinbar ist.



Abbildung 5: vektorbasierte Richtungsrelationen zwischen Relatum R und intendiertem Objekt O<sub>i</sub> (links), räumliche Richtungsrelationen mit 8 Richtungen in Vektorsicht (mittig) sowie deren inverse Relation (rechts)

### Orientierungen mehrdimensionaler Objekte

Mehrdimensionale Objekte sind räumliche Objekte mit Ausdehnung. Diese können durchaus unregelmäßig geschnitten sein, ohne jedoch eine komplexe Form zu besitzen.

#### Orientierungen durch Relationenverschiebung

Schwerpunktbasierte Orientierungskonzepte liefern unter bestimmten Objektkonstellationen Falschaussagen bezüglich der identifizierten Relation. Ein solcher Grenzfall ist gegeben, sowie sich ein Objekt geringer Größe nahe einem ausgedehnten Objekt befindet. So zeigt Abbildung 6 ein kleines östlich des Relatum  $R$  gelegenes Objekt  $O$ , welches jedoch falsch in den Gültigkeitsbereich der Relation *nördlich* fällt.

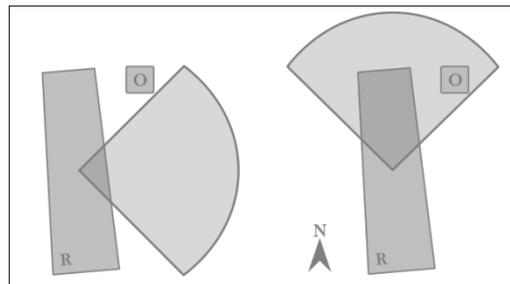


Abbildung 6: ein östlich des Relatum  $R$  gelegenes Objekt  $O$  liegt im Gültigkeitsbereich der Relation *nördlich*

Um diesem Problem zu begegnen schlagen [Peuquet und Ci-Xiang, 1987] eine Verschiebung der Richtungsrelation entlang der jeweiligen Relationenachse vor. Dafür wird beginnend eine Umrandungsrechteck<sup>22</sup> um das eventuell unregelmäßige Objekt generiert. Diese muss jedoch entsprechend lotrecht zur jeweiligen Relationenachse ausgerichtet werden. Nun wird die Relation entlang der Relationenachse verschoben, bis die Gültigkeitsgrenzen die Eckpunkte der Umrandungsbox schneiden (vgl. Abbildung 7).

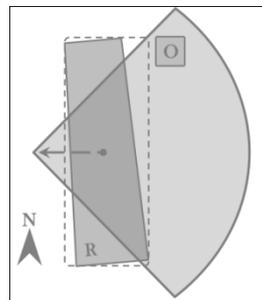


Abbildung 7: Verschiebung der Richtungsrelation entlang der Relationenachse (gestrichelter Pfeil) bis zum Schnitt mit den Eckpunkten der Umrandungsbox (gestrichelt)

Erreicht wird mit diesem Vorgehen eine objektgemäße Anpassung der jeweiligen Richtungsrelation, welche mit der Objektgröße skaliert, ohne die Semantik zu verlieren. Doch auch diese Orientierung der Richtungsrelationen wird approximiert, nähert sich aber deutlich einer intuitiven Interpretation an (vgl. Abbildung 7).

Dieses Verfahren stellt einzig eine Erweiterung des sektorbasierten Orientierungskonzeptes dar. Entsprechend übertragbar ist auch das Verhalten bezüglich der Metrik (vgl. Abschnitt: sektorbasiertes Orientierungskonzept, Seite 23, symmetrisch, normierbar und invertierbar).

#### Orientierungen komplexer Objekte

Komplexe Objekte im Sinne dieses Abschnittes sind mehrdimensionale Objekte, deren Zuschnitt keine Orientierungsbestimmung unter Nutzung einer Trivialgeometrie zulässt. Dies betrifft des Weiteren geometrische Szenen, in denen das Relatum vom intendierten Objekt auf mehr als einer Seite umschlossen wird. Abbildung 8 illustriert dies anhand einer verhältnismäßig simplen Objektkonstellation, welche im Weiteren als Beispiel dient.

<sup>22</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *bounding box*.

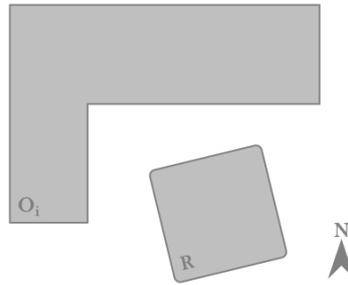


Abbildung 8: komplexe Objektszene mit Relatum  $R$  und intendiertem Objekt  $O_i$

#### Morphologisches Orientierungskonzept mit der Richtungs-Relationen-Matrix

Ein auf den topologischen Betrachtungen von [Egenhofer et al., 1994] aufbauendes Verfahren zur Orientierungsbestimmung zwischen komplexen Objekten schlägt [Goyal, 2000] vor. Dafür wird eine Umrandungsbox um das Relatum generiert, über welcher folgend ein die räumliche Szene einschließendes Raster der acht Kardinalrichtungen positioniert wird (vgl. Abbildung 9).

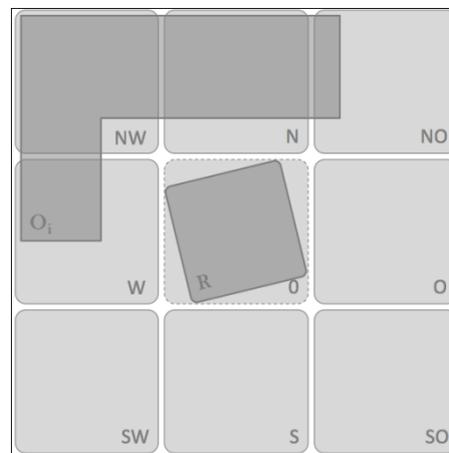


Abbildung 9: Relatum  $R$  wird von einer Umrandungsbox (gestrichelt) umschlossen, welche den Mittelpunkt des umgebenden Orientierungsregionenmodelles bildet

Nun kann eine Richtungs-Relationen-Matrix, entsprechend der Formel 2.30, aufgestellt werden, welche die Schnittmengen der Richtungsregionen und dem intendierten Objekt bestimmt. Die betroffenen Richtungen lassen sich durch nicht leere Schnittmengen identifizieren (vgl. Formel 2.30). Somit kann zwischen 218 Richtungskonzepten unterschieden werden.

$$dir_{R,O_i} = \begin{pmatrix} NW_R \cap O_i & N_R \cap O_i & NO_R \cap O_i \\ W_R \cap O_i & O_R \cap O_i & O_R \cap O_i \\ SW_R \cap O_i & S_R \cap O_i & SO_R \cap O_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \neg\emptyset & \neg\emptyset & \neg\emptyset \\ \neg\emptyset & \emptyset & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \emptyset \end{pmatrix} \quad 2.30$$

Um zwischen den betroffenen Richtungen jedoch exakter bzw. quantitativ unterscheiden zu können, wird vorgeschlagen, die Flächenanteile in die Betrachtungen einzubeziehen. Dafür werden, Formel 2.31 entsprechend, die in der jeweiligen Region befindlichen Flächenanteile des intendierten Objektes durch die Gesamtfläche des Objektes normiert.

Ein darauf aufbauender Ansatz von [Sun, 2008] definiert die Richtungskonzepte als unscharfe Mengen und interpretiert die Flächenanteile als Zugehörigkeitsfunktionen zu diesen. Dadurch wird die Entscheidungsfindung bei der Orientierungsbestimmung erleichtert.

Eine Bewertung im Sinne der Metrik fällt uneingeschränkt positiv aus, da dieses Richtungskonzept symmetrisch, normierbar sowie invertierbar ist.

$$dir_{R,O_i} = \begin{pmatrix} \frac{\zeta(NW_R \cap O_i)}{\zeta(O_i)} & \frac{\zeta(N_R \cap O_i)}{\zeta(O_i)} & \frac{\zeta(NO_R \cap O_i)}{\zeta(O_i)} \\ \frac{\zeta(W_R \cap O_i)}{\zeta(O_i)} & \frac{\zeta(O_R \cap O_i)}{\zeta(O_i)} & \frac{\zeta(O_R \cap O_i)}{\zeta(O_i)} \\ \frac{\zeta(SW_R \cap O_i)}{\zeta(O_i)} & \frac{\zeta(S_R \cap O_i)}{\zeta(O_i)} & \frac{\zeta(SO_R \cap O_i)}{\zeta(O_i)} \end{pmatrix} \quad 2.31^{23}$$

### 2.4.3 Qualitative Modellierung der Topologie

Topologische Relationen sind ein impliziter Bestandteil der relativen Orientierung räumlicher Szenen. Als implizit gilt die Topologie, da sie nicht zwingend explizit ausgewiesen werden muss. So ist bei der Beispielaussage „der Baum steht 7,3 Meter vor dem Haus“ explizit Distanz und Orientierung spezifiziert, es wird aber implizit Kenntnis darüber vorausgesetzt, dass die beiden Objekte disjunkt sind. Wäre dies nicht bekannt, könnte diese Szene von einem menschlichen Operateur nicht intuitiv aufgelöst werden. Dementsprechend wichtig ist auch die Topologie für die automatisierte Verarbeitung räumlichen Wissens.

#### *Punktmengenbasierte Topologiebetrachtung*

[Güting, 1988] definierte mit der geo-relationalen Algebra eines der ersten automatisierten Verfahren zur Beschreibung topologischer Relationen. Dabei werden Objekte  $O_i$  durch Punktmengen  $\Theta_i$  approximiert, zwischen welchen sich anhand definierter Operatoren die Relation bestimmen lässt (vgl. Formeln 2.32 bis 2.36).

$$R \text{ gleich } O_i := \Theta_R = \Theta_{O_i} \quad 2.32$$

$$R \text{ ungleich } O_i := \Theta_R \neq \Theta_{O_i} \quad 2.33$$

$$R \text{ enthalten } O_i := \Theta_R \subseteq \Theta_{O_i} \quad 2.34$$

$$R \text{ disjunkt zu } O_i := \Theta_R \cap \Theta_{O_i} = \emptyset \quad 2.35$$

$$R \text{ überlappt } O_i := \Theta_R \cap \Theta_{O_i} \neq \emptyset \quad 2.36$$

Ein kritisches Problem bei diesem Modell ergibt sich aus der Einschränkung auf fünf identifizierbare Relationen. Infolgedessen besteht eine unscharfe Semantik, da beispielsweise die Bedingung  $\theta \cap \theta \neq \emptyset$  für die topologischen Relationen *überlappt*, *berührt* und *enthält* Gültigkeit besitzt.

Die Reflexivität, Symmetrie, Skalen-, Rotations- und Translationsinvarianz kann für diese Definition der Topologie als gegeben betrachtet werden. Die Semantik weicht jedoch entscheidend von der geforderten ab, da die Topologie auf divergenten Konzepten abgebildet wird.

#### *Kalkülbasierte Topologiebetrachtung*

[Randell et al., 1992] beschreiben mit der Intervalllogik zum räumlichen Schließen den sogenannten *region connection calculus* (RCC, vgl. [Renz, 2002]). Dieser basiert auf dem Verbindungskalkül (*connection calculus*) von [Clarke, 1981], welches die sehr allgemeine Relation  $C(R, O)$ , im Sinne von *die Regionen<sup>24</sup> R und O sind verbunden*, definiert. Sehr allgemein ist diese Relation, da *verbunden* nicht spezifiziert wird. So kann es bedeuten, dass  $R$  und  $O$  einen gemeinsamen Punkt besitzen, sich überschneiden, oder gar deckungsgleich sind. Die einzigen zwingenden Bedingungen der Relation  $C$  sind Reflexivität und Symmetrie. Durch die in Formeln 2.37 bis 2.41 dargestellten Zwänge können fünf topologische Relationen definiert werden (RCC5).

$$\text{disjunkt}(R, O) \equiv DR(R, O) := \neg O(R, O) \quad 2.37$$

$$\text{überlappt}(R, O) \equiv PO(R, O) := O(R, O) \wedge \neg P(R, O) \wedge \neg P(O, R) \quad 2.38$$

<sup>23</sup> Der  $\zeta$  Operator bezeichnet hier eine Funktion, welche die Schnittfläche bestimmt.

<sup>24</sup> *Regionen* sind hier gleichbedeutend mit Objekten.

$$\text{enthalten}(R,O) \equiv PP(R,O) := P(R,O) \wedge \neg P(O,R) \quad 2.39$$

$$\text{enthält}(R,O) \equiv PP^{-1}(R,O) := PP(O,R) \quad 2.40$$

$$\text{gleich}(R,O) \equiv R = O := P(R,O) \wedge P(O,R) \quad 2.41$$

$$\text{mit: } O(R,O) := \exists Z | P(Z,R) \wedge P(Z,O)$$

$$P(R,O) := \forall Z | C(Z,R) \rightarrow C(Z,O)$$

Die dargestellten Relationen  $P$  und  $PP$  (2.39) sind, abweichend von allen anderen, nicht symmetrisch, was die Nutzung der Inversen  $P^{-1}$  sowie  $PP^{-1}$  zur Definition von konkreten Relationen begründet. Insgesamt lässt sich mit dem RCC eine Menge von 15 theoretischen Relationen zweier Regionen, respektive Objekte, unterscheiden. So kann mit den RCC auch eine erweiterte Anzahl von acht topologischen Relationen semantisch korrekt definiert werden (RCC8). Dafür wird zusätzlich zwischen den Relationen *tangent*, *enthalten am Rand* und *enthält am Rand* unterschieden. Durch die Definition von Summen, Differenz und Komplementbildung lässt sich mit dem RCC ferner die Topologie mehrteiliger Regionen betrachten. Dies ist jedoch im Sinne der vorliegenden Zielstellung nicht relevant.

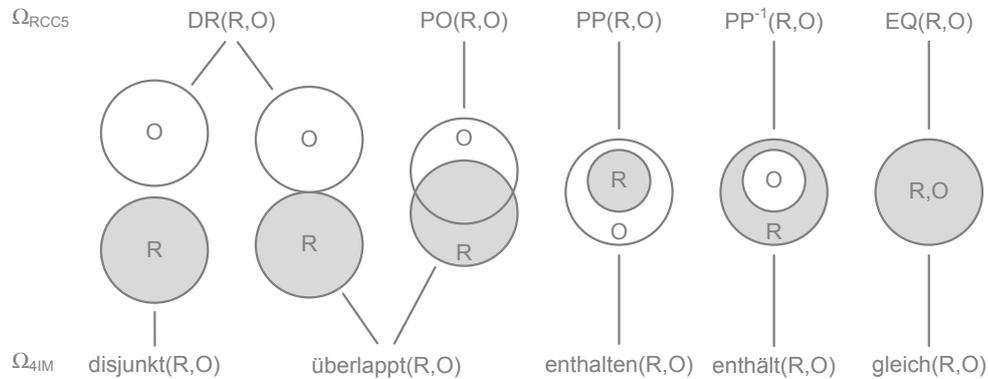


Abbildung 10: Semantik der durch den RCC5 definierten topologischen Relationen ( $\Omega_{RCC5}$ , oben) sowie die Relationensemantik des regionenbasierten Schnittmengenmodells ( $\Omega_{4IM}$ , unten)

Den Bedingungen der Metrik entspricht der RCC umfassend. So sind die Relationen reflexiv, symmetrisch, skalen-, rotations- und translationsinvariant. Der geforderten Semantik wird auch entsprochen, was graphisch durch Abbildung 10 (oben) als nachgewiesen gilt.

### Regionbasierte Topologiebetrachtung

Einen regionbasierten Ansatz stellten [Egenhofer und Franzosa, 1991] mit dem 4-Schnittmengen-Modell<sup>25</sup> vor. Dieses basiert auf der Schnittmengenbestimmung zwischen Regionen, bezogen auf deren Rand  $\delta R$  und deren Innenbereich  $R^\circ$  mit  $R = \delta R \wedge R^\circ$  (vgl. Formel 2.42).

$$R(R,O) = \begin{pmatrix} \delta R \cap \delta O & R^\circ \cap \delta O \\ \delta R \cap O^\circ & R^\circ \cap O^\circ \end{pmatrix} \quad 2.42$$

Für regulär geschlossene Objekte lassen sich acht mögliche Kombinationen leerer und nicht leerer Schnittmengen bestimmen, welchen binäre topologische Relationen gleichgesetzt werden können. Eine alternative Betrachtungsmöglichkeit erlaubt die Unterscheidung eines verminderten Satzes von lediglich fünf topologischen Relationen, wie in der Metrik gefordert.

Erweitert wurde dieses Verfahren durch [Egenhofer und Herring, 1991] um die ergänzende Betrachtung des Außenbereichs  $R^-$  einer Region, woraus sich  $R = \delta R \wedge R^\circ \wedge R^-$  ergibt. Dadurch konnte die theoretische Menge beschreibbarer topologischer Relationen auf 33 erhöht werden, welches das Verfahren robuster für die Betrachtung irregulärer Regionen macht.

<sup>25</sup> Englischsprachiger Fachterminus : 4-intersection modell (4IM).

Entsprechend der Metrik sind die definierten topologischen Relationen reflexiv, symmetrisch, skalen-, rotations- und translationsinvariant. Der geforderten Semantik der Relationen genügt dieses Verfahren jedoch nicht. So wird die Relation *überlappt* auf Basis des Randes und des Inneren einer Region bestimmt, was dazu führt, dass sich tangierende Objekte der Relation *überlappt* entsprechen (vgl. Abbildung 10, oben).

#### 2.4.4 Kombinierte Verfahren

Bisher wurden Beschreibungen räumlicher Szenen in ihre Bestandteile zerlegt und differenziert betrachtet. Folgend werden Verfahren aufgezeigt, welche die qualitativen Beschreibungen im Verbund verarbeiten.

##### *Die Punkt-Radius Methode*

Ein kombiniertes Verfahren zur Verarbeitung von Richtungs- und Entfernungsschätzungen stellen [Wieczorek et al., 2004] mit der sogenannten Punkt-Radius Methode<sup>26</sup> vor. Ausgehend von dem Schwerpunkt des Relatum wird beginnend sowohl die Richtungs- als auch die Entfernungsangabe scharf verarbeitet. Um diesen exakt berechneten Punkt werden folgend alle Fehler bzw. Unsicherheiten als Umring angebracht. Der Radius des Umrings bestimmt sich nun durch den totalen Fehler, welcher sich aus der Wurzel der summierten quadratischen Einzelfehlersummen  $e_i$  ergibt (vgl. Formel 2.43, Abbildung 11).

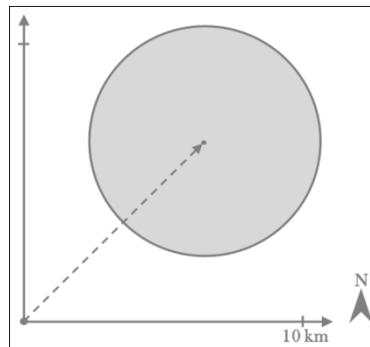


Abbildung 11: durch die Punkt-Radius Methode bestimmter Unsicherheitsbereich der Beispielaussage 9 km nordöstlich von Bakersfield im lokalen Koordinatensystem, mit Bakersfield im Ursprung

$$\text{totaler Fehler} = \sqrt{\sum_{i=0}^n e_i^2} \quad 2.43$$

Durch die Einzelfehler wird versucht, die einer Beschreibung inhärente Unsicherheit und Unschärfe so umfassend wie möglich zu berücksichtigen. So finden neben den genutzten räumlichen Bezeichnern ebenfalls die Lageunsicherheit und die Ausdehnung des Relatums sowie die Unsicherheit des geodätischen Datums Berücksichtigung. Demnach berechnet sich der totale Fehler bei der konkreten Beispielaussage 9 km nordöstlich von Bakersfield zu einem Radius von 4,12 km (vgl. [Wieczorek et al., 2004], Abbildung 11).

Als kombiniertes Verfahren zur Distanz- und Richtungsbestimmung hat es auch den entsprechenden Metriken zu genügen. Dies kann aber als gegeben gesehen werden, da die Distanz- und Richtungsbestimmung scharf im euklidischen Raum erfolgt, welcher die Bedingungen der Metriken erfüllt.

##### *Wahrscheinlichkeitstheoretisches Verfahren*

Das von [Guo et al., 2008] entwickelte wahrscheinlichkeitstheoretische Verfahren zur Verarbeitung von Richtungs- und Entfernungsschätzungen basiert auf einem numerischen Ansatz unter Nutzung einer Monte-Carlo Simulation. Das Relatum wird bei diesem Verfahren zweidimensional, als unbestimmte Punktmenge  $Q = \{q_0, q_1, \dots, q_n\}$ , approximiert. Basierend auf Wahrscheinlichkeitsdichten jeder Unsicherheitsquelle wird nun ausgehend von beliebigen Punkten  $q_i$  der Menge beliebig oft die Zielposition angenähert, woraus ein Wahrscheinlichkeitsfeld für das intendierte Objekt resultiert. Dabei ergibt sich die Wahrscheinlichkeit  $p_j$  eines konkreten Punktes  $(x_j, y_j)$  des intendierten Objektes aus der schlichten Summation aller von den Punkten  $q_i$  aus berechneten Einzelwahrscheinlichkeiten (vgl. Formel 2.44).

<sup>26</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *point-radius method*.

$$p_j = \sum_{i=1}^n q_i p_i(x, y) \quad 2.44$$

Berücksichtigung durch Wahrscheinlichkeitsdichten finden dabei die Lageunsicherheit des konkreten Relatum und dessen Ausdehnung, die Unsicherheit der Koordinatenpräzision, des geodätischen Datum und die genutzten räumlichen Relationen, hier Distanz und Richtung. Jedoch basieren diese Wahrscheinlichkeitsdichten lediglich auf Annahmen. So wird die Dichte einer Richtungsschätzung des Level<sub>3</sub> (vgl. Abschnitt 2.4.2) durch Formel 2.45 abgeschätzt.

$$p_{\text{Richtung}} = \begin{cases} p_{\max} & \text{wenn } \Delta\varphi < \pi/16 \\ (2 - 16 \cdot \Delta\varphi/\pi) \cdot p_{\max} & \text{wenn } \pi/16 \leq \Delta\varphi \leq \pi/8 \\ 0 & \text{wenn } \Delta\varphi > \pi/8 \end{cases} \quad 2.45$$

Darin bezeichnet  $p_{\max}$  die maximale Wahrscheinlichkeit und  $\Delta\varphi$  den Winkel zwischen der Richtungssachse und der Zielposition. Einzige Einschränkung dieser trapezförmigen Verteilungsdichte, hinsichtlich  $p_{\max}$ , ist die Summation zu eins, welche gewährleistet sein muss.

Da die Positionsbestimmung zwar nicht exakt, aber grundsätzlich im euklidischen Raum erfolgt, entspricht dieses Verfahren auch den in den Metriken definierten Bedingungen.

Hinsichtlich der Vollständigkeit ist ebenfalls des Wahrscheinlichkeitstheoretische Verfahren von [Dehak et al., 2005] zu erwähnen. Dieses wird jedoch vorliegend nicht weiter ausgeführt da es auf primär unvollständige räumliche Information fokussiert.

## 2.5 Zusammenfassung und Diskussion der existenten Verfahren

Die in Kapitel 2.4 vorgestellten Verfahren zeigen verschiedene Ansätze bei der Verarbeitung qualitativer Räume. So lässt sich an zahlreichen Methoden erkennen, dass deren Entwicklung vor dem Hintergrund der Verarbeitung von Routenbeschreibungen erfolgte. Dies begründet die primär nulldimensionale Objektsicht, wie auch die geringe Anzahl an kombinierten Verfahren, da Routenbeschreibungen eine sequenzielle Bearbeitung der Raumrelationen bedingen. Zudem sind einige Verfahren auf die qualitative Verarbeitung im Modellraum beschränkt, was die fehlende Projektivität in den euklidischen Raum zeigt. Um derartige Mängel, im Sinne der Zielstellung (vgl. Kapitel 1.2, Seite 11), zu identifizieren, wurde eine Metrik definiert, die es ermöglichte eine Eignung abzuschätzen. Darüber hinaus ermangelt es den Verfahren mehrheitlich an der Möglichkeit, die Lage von Objekten hinsichtlich der räumlichen Relationen bewerten zu können (vgl. Tabelle 4 bis Tabelle 7). Dies ist jedoch entsprechend der Zielsetzung von entscheidender Relevanz um im Weiteren eine Basis zur Entscheidungsfindung zu realisieren.

Den bisher genannten Aspekten wird einzig der kombinierte Wahrscheinlichkeitstheoretische Ansatz von [Guo et al., 2008] gerecht, da dieser die Ableitung einer Bewertung ermöglicht. Dennoch ist auch bei diesem Verfahren eine hinreichend empirische Basis nicht gegeben. Ein ganzheitlicher Ansatz im Sinne der Zielvorstellungen sollte neben der Empirie ferner Hintergrund- bzw. Domänenwissen in die Betrachtungen einbeziehen. So ließe sich die Ergebnismenge durch die konkrete Formulierung spezifischer Zwänge auf Basis der Objekteigenschaften weiter einschränken und somit die Qualität der räumlichen Bewertung entscheidend steigern. In Folge dessen könnte die bisher rein geometrische Bewertungsebene verlassen werden, worin eine Möglichkeit gesehen wird, das Verfahren der intuitiven menschlichen Entscheidungsfindung anzunähern.

Distanzsysteme	entspricht der Metrik	Bewertungsmaß ableitbar	empirisch begründet	abbildbar im Vektorraum
Entfernungsbereiche nach Clementini	×	×	×	×
Distanzkalkül von Frank	×/✓	×	×	✓
Δ-Kalkül	×	×	×	×
Größenvergleichsverfahren	×	×	×	×
Wegkostenfunktionen	×	×	×	✓

Tabelle 4: tabellarische Gegenüberstellung der Distanzsysteme (Bedingung: ✓- erfüllt, ×-nicht erfüllt)

Richtungssysteme	entspricht der Metrik	Bewertungsmaß ableitbar	empirisch begründet	abbildbar im Vektorraum
Sektor basiertes Orientierungskonzept	✓	×	×	✓
Orientierungskonzept mit neutraler Zone	×	×	×	✓
Vektorbasiertes Orientierungskonzept	×	×	×	✓
Orientierung durch Relationenverschiebung	✓	×	×	✓
Orientierung komplexer Objekte	✓	✓	×	✓

Tabelle 5: tabellarische Gegenüberstellung der Richtungssysteme (Bedingung: ✓- erfüllt, ×-nicht erfüllt)

Topologiesysteme	entspricht der Metrik	Bewertungsmaß ableitbar	empirisch begründet	abbildbar im Vektorraum
Punktmengenbasierte Topologiebetrachtung	×	○	○	✓
Kalkülbasierte Topologiebetrachtung	✓	○	○	✓
Regionenbasierte Topologiebetrachtung	×	○	○	✓

Tabelle 6: tabellarische Gegenüberstellung der Topologiesysteme (Bedingung: ✓- erfüllt, ×- nicht erfüllt, ○- nicht vergleichbar)

kombinierte Verfahren	entspricht der Metrik	Bewertungsmaß ableitbar	empirisch begründet	abbildbar im Vektorraum
Punkt-Radius Methode	✓	×	×	✓
Wahrscheinlichkeitstheoretisches Verfahren	✓	✓	×	✓

Tabelle 7: tabellarische Gegenüberstellung der kombinierten Verfahren (Bedingung: ✓-erfüllt, ×- nicht erfüllt)

### 3 Semantische Modellierung des Raumes

Die Diskussion der in Kapitel 2.4 vorgestellten Verfahren zur Verarbeitung räumlicher Objektrelationen zeigt, dass diese ein klares Defizit bei der Berücksichtigung von Hintergrundwissen besitzen. Um semantische sowie domänenspezifische Aspekte jedoch umfassend berücksichtigen zu können, bedarf es einer adäquaten Wissensrepräsentation (vgl. [Bähr, 2001]). Für diesen Zweck bieten sich verschiedene Modellierungsarten an, die folgend erläutert werden. Darauf aufbauend wird ein konkretes Datenmodell formuliert, welches unter Ausrichtung auf die Zielstellung entwickelt wurde.

#### 3.1 Semantische Wissensmodellierung

##### *Semantische Netze*

Eine intuitive Art die Domänensemantik zu formulieren, bieten semantische Netze. Diese repräsentieren formales Wissen durch Graphen, in denen Kanten die Relationen und Knoten die Begriffe, respektive Objekte definieren. Dabei werden jedoch nicht nur Relationen der lexikalischen Semantik, wie die Synonymie, die Hyponymie oder die Hyperonymie<sup>27</sup> genutzt, sondern beliebige Relationen zweier Objekte. Anhand der Entfernung zwischen den Knoten im Graph wird ferner repräsentiert, wie stark diese formal mit einander assoziiert sind. Die Nutzung von Graphen zur Wissensrepräsentation besitzt nun den Vorteil, dass sich diese, basierend auf leistungsfähigen Datenstrukturen, sehr effizient algorithmisch verarbeiten lassen (vgl. [Randal, 1988], [Stuckenschmidt, 2009]).

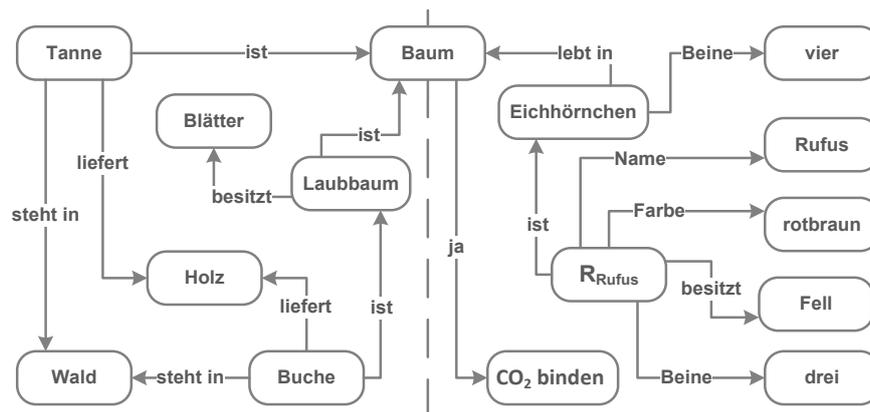


Abbildung 12: semantisches Netz als Categoriesystem (links) und mit konkreten Objekten (rechts) getrennt durch eine gestrichelte Linie<sup>28</sup>

In Anlehnung an die räumliche Beispielszene (vgl. Kapitel 2), bestehend aus Baum, Haus und Eichhörnchen zeigt Abbildung 12 (links) ein einfaches, semantisches Netz zur Kategorisierung des Baumes. Darin stellen die Knoten des Netzes Kategorien von Objekten dar. So bezeichnet der Knoten mit dem Namen *Laubbaum* die Kategorie aller Laubbäume. Die charakteristischen Eigenschaften, die den Entitäten einer Kategorie gemein sind, werden durch Relationen zu anderen Elementen des Netzes dargestellt. So wird der Besitz von Blättern als charakteristische Eigenschaft aller Laubbäume durch die Kante *besitzt* zu dem Knoten *Blätter* repräsentiert. Problematisch bei solchen Categoriesystemen ist jedoch, dass selten eine vollständige Beschreibung der hinreichenden Bedingungen vorliegt. So sind die beschriebenen Eigenschaften vielmehr als die notwendigen Bedingungen zu verstehen, die ein Objekt besitzen muss, um einer Kategorie anzugehören. Dies impliziert jedoch eine *Geschlossene-Welt Annahme*<sup>29</sup> die besagt, dass die vollständige, relevante Information im Modell dargestellt ist. Die aus Taxonomien

<sup>27</sup> Synonymie ist die Relation der Bedeutungsgleichheit, Hyponymie ist die Relation der Unterordnung und Hyperonymie ist die Relation der Überordnung.

<sup>28</sup> Angelehnt an zwei Beispielsachverhalte aus [Stuckenschmidt, 2009].

<sup>29</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *closed-world assumption*.

bekanntes Hierarchiesystem werden in Categoriesystemen durch die *ist* Beziehung repräsentiert. So kann der Tatsache, dass *Laubbaum* eine Subkategorie der Klasse *Baum* ist entnommen werden, dass alle Laubbäume auch Bäume sind. Es besteht folglich eine Teilmengenrelation.

Neben den Categoriesystemen bieten semantische Netze ebenfalls die Möglichkeit konkrete Objektsysteme darzustellen. Darin repräsentieren die Knoten konkrete Objekte und die Kanten die Relationen zwischen diesen. So zeigt Abbildung 12 (rechts) ein Objektsystem, welches das Eichhörnchen Rufus der räumlichen Beispielszene beschreibt. Dieses wird durch den Knoten  $R_{Rufus}$  repräsentiert. Die weiteren Knoten beschreiben nun dessen tatsächliche Eigenschaften, wie seine Farbe *rotbraun* oder dass es ein *Fell* besitzt. Dennoch kann ein Objektsystem auch Kategoriebeschreibungen und die damit verbundenen Hierarchiestufen enthalten. Die Semantik dieser Kategorisierung ist jedoch eine andere. Während eine Subklasse in Categoriesystemen durch eine Teilmengenrelation repräsentiert wird, repräsentiert die Subklassenrelation in Objektsystemen lediglich die Zugehörigkeit eines Objektes zur Menge aller Objekte der Superklasse, ohne Aussage hinsichtlich der Vollständigkeit.

Ferner ergibt sich durch die Kategorisierung ein Schwachpunkt semantischer Netze. So weisen die charakteristischen Eigenschaften eines *Eichhörnchens* aus, dass es vier Beine besitzen muss, um der Kategorie zugehörig zu sein, bzw. jede Instanz der Klasse Eichhörnchen diese Eigenschaft erbt. Die konkrete Instanz,  $R_{Rufus}$ , besitzt jedoch drei Beine, wodurch ein Widerspruch entsteht, der so nicht aufzulösen ist. Es fehlt demnach eine Formalisierung, um derartiges terminologisches Wissen eindeutig zu repräsentieren.

### Formalisierung semantischer Netze durch Prädikatenlogik

Eine geeignete Formalisierung semantischer Netze kann durch die Abbildung der Netzstruktur auf eine Menge logischer Formeln erfolgen. Durch die Korrespondenz der Relationen zu Prädikaten ergibt sich die direkte Möglichkeit, jede Instanz einer Relation konkret als atomare Formel zu übersetzen. Die durch Kanten verbundenen Knoten bilden dabei die Terme der atomaren Formel und die Relationen werden zu Prädikaten (vgl. [Stuckenschmidt, 2009], Anhang D: Prädikatenlogik erste Stufe, Seite 93). Das in Abbildung 12 (links) dargestellte Categoriesystem lässt sich derart durch Formel 3.1 abbilden.

$$\begin{aligned} & \text{ist}(\text{Laubbaum}, \text{Baum}) \wedge \text{ist}(\text{Tanne}, \text{Baum}) \wedge \text{ist}(\text{Buche}, \text{Laubbaum}) \\ & \wedge \text{besitzt}(\text{Laubbaum}, \text{Blätter}) \wedge \text{steht in}(\text{Buche}, \text{Wald}) \\ & \wedge \text{liefert}(\text{Buche}, \text{Holz}) \wedge \text{steht in}(\text{Tanne}, \text{Wald}) \wedge \text{liefert}(\text{Tanne}, \text{Holz}) \end{aligned} \quad 3.1$$

Der eigentliche Mehrwert der formalen Repräsentation ergibt sich jedoch erst durch die Möglichkeit ableitbares Wissen explizit zu spezifizieren. Dies erfolgt durch die Formulierung logischer Formeln, welche sich auf die verwendeten Prädikate beziehen. Damit ergeben sich die abgeleiteten Inferenzregeln der Formel 3.2.

$$\begin{aligned} & \forall x, y, z \text{ ist}(x, y) \wedge \text{ist}(y, z) \rightarrow \text{ist}(x, z) \\ & \forall x, y, z \text{ ist}(x, y) \wedge \text{steht in}(y, z) \rightarrow \text{steht in}(x, z) \\ & \forall x, y, z \text{ ist}(x, y) \wedge \text{liefert}(y, z) \rightarrow \text{liefert}(x, z) \end{aligned} \quad 3.2$$

Basierend auf diesen Inferenzregeln, sowie den atomaren Formeln 3.1 kann nun durch die formale Semantik der Prädikatenlogik eine bedingte Menge wahrer Aussagen aus dem Modell abgeleitet werden. So zeigt sich unter anderem eine Transitivität der *ist* Relation was den Schluss zulässt, dass eine *Buche* nicht nur ein *Laubbaum*, sondern auch ein *Baum* ist. Zudem ergibt sich aus den Ableitungsregeln, dass die *steht in*, wie auch die *liefert* Relation an ihre Subklasse vererbt wird, was ferner den Schluss ermöglicht, dass *Buchen Blätter besitzen*. Wie bei semantischen Netze, bestehen auch bei der Prädikatenlogik Probleme bei der Abbildung von Sachverhalten, die nicht gültig sind. So bleibt die Frage offen, ob *Tannen*, die wie *Buchen* im *Wald* stehen und *Bäume* sind, ebenfalls *Blätter* besitzen. Unter Berufung auf die *Offene-Welt Annahme*<sup>30</sup> könnte nun geschlossen werden das *Tannen* keine *Blätter* besitzen, wenn die Aussage *Tannen besitzen Blätter* widerlegt werden kann. Dieser Schluss ist im vorliegenden Fall nicht möglich, was einen Widerspruch zur Aussagenargumentation eines semantischen Netzes darstellt, da dies eine *Geschlossenen-Welt Annahme* impliziert.

Ferner ergeben sich Probleme bei der Darstellung komplexer Zusammenhänge. So würde eine prädikatenlogische Abbildung objektbasierter, semantischer Netze, wie in Abbildung 12 (rechts) gegeben, eine Vermischung

<sup>30</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *open-world assumption*.

der Kategorien und der konkreten Objekte bedeuten. Es wären formale Aussagen wie  $ist(Rufus, Eichhörnchen) \wedge lebt\ in(Eichhörnchen, Baum)$  möglich, die jedoch aus bereits genannten Gründen semantisch nicht kompatibel sind. Letztlich geht ebenfalls die assoziative Ordnung des semantischen Netzes verloren, da das Wissen über die Menge aller Prädikate verteilt ist.

### Ontologien

Der Begriff Ontologie ist der Philosophie entlehnt, die diesen als Lehre des Seins versteht (vgl. [Wolff, 1736]). In der Informatik werden Ontologien im Kontext formaler Semantik sowie formaler Logik verstanden. So formulierte [Gruber, 1993] dies durch die Aussage: *Eine Ontologie ist eine formalisierte, explizite Spezifizierung einer gemeinsamen Konzeptualisierung*<sup>31</sup>. Ferner ist eine Ontologie entsprechend [Sowa, 1995] auf die Gesamtheit aller Objekte beschränkt, die sie zu repräsentieren vermag, das sogenannte Diskursuniversum. Dem entsprechend ist es im Sinne der Informatik auch gerechtfertigt, von Ontologien im Plural zu sprechen, was die Philosophie so nicht gestattet. Gesamtheitlich gesehen können diese demnach als spezifische Wissensrepräsentationen verstanden werden.

Ontologien bilden Wissen ausdrucksstärker auf die Prädikatenlogik ab, um den erläuterten Problemen semantischer Netze und deren Formalisierung zu begegnen. So werden Objekte und konkrete Instanzen durch logische Konstanten dargestellt. Kategorien und Relationen hingegen werden durch ein- und zweistellige logische Prädikate abgebildet. Einstellige Prädikate bilden dabei die Kategorien ab und zweistellige Prädikate die Relationen. Dies gestattet eine explizite Trennung der zentralen Hierarchierelationen (vgl. [Stuckenschmidt, 2009], Anhang D: Prädikatenlogik erste Stufe). So wird, bezogen auf den Beispielsachverhalt, die Zugehörigkeit eines Objektes zu einer Klasse durch das einstellige Prädikat mit der jeweiligen Konstante in der Form:  $Eichhörnchen(Rufus)$  ausgedrückt. Die Subklassenbeziehung entspricht der Implikation. Das in den Gleichungen 3.1 und 3.2 formalisierte Wissen kann nun gebündelt durch Formel 3.3 beschrieben werden.

$$\forall x\ Laubbaum(x) \rightarrow Baum(x) \wedge \forall x\ Kiefer(x) \rightarrow Baum(x) \wedge \forall x\ Buche(x) \rightarrow Laubbaum(x) \quad 3.3$$

Zur Darstellung der charakteristischen Eigenschaften kann ebenfalls die Implikation genutzt werden. Formel 3.4 beschreibt, dass alle Objekte  $C$  die notwendige Eigenschaft  $\Phi$  besitzen. Die Umkehrung der Implikation in Formel 3.5 zeigt, dass diese Eigenschaft ferner hinreichend ist, was Formel 3.6 durch die Äquivalenz zusammenfasst.

$$\forall x\ C(x) \rightarrow \Phi(x) \quad 3.4$$

$$\forall x\ \Phi(x) \rightarrow C(x) \quad 3.5$$

$$\forall x\ C(x) \leftrightarrow \Phi(x) \quad 3.6$$

Bezogen auf den Beispielsachverhalt wäre der Besitz von Blättern für Laubbäume eine notwendige, jedoch keine hinreichende Bedingung, da neben Laubbäumen auch Sträucher oder Blumen Blätter besitzen. Formal könnte dies demnach durch Gleichung 3.7 dargestellt werden (mit  $\Phi(x)$  als Verweis auf den Besitz von Blättern). Wesentlich spezifischer und somit zu bevorzugen ist die in Formel 3.8 gewählte erweiterte Darstellung.

$$\forall x\ Laubbaum(x) \rightarrow \Phi(x) \quad 3.7$$

$$\forall x\ Laubbaum(x) \rightarrow \exists y\ besitzt(x, y) \wedge Blätter(y) \quad 3.8$$

Die eigentliche Ausdrucksstärke von Ontologien besteht jedoch in der formalen Repräsentation von Kardinal einschränkungen und konkreten Werten, was für semantische Netze bzw. deren prädikatenlogische Formalisierung ein Problem darstellte. So kann in Ontologien die Existenz von Eigenschaften gefordert werden, ohne diese beschreiben zu müssen (vgl. Beispielaussage: Bäume binden  $CO_2$ , Formel 3.9). Des Weiteren können ganz konkrete Eigenschaften festgelegt werden (vgl. Beispielaussage: Eichhörnchen sind rotbraun, Formel 3.10).

$$\forall x\ Baum(x) \rightarrow \exists y\ CO_2\ binden(x, y) \quad 3.9$$

<sup>31</sup> Übersetzung des Zitates: „An ontology is an explicit specification of a conceptualization“ [Gruber, 1993], Seite 199.

$$\forall x \text{ Eichhörnchen}(x) \rightarrow \text{Farbe}(x, \text{rotbraun}) \quad 3.10$$

Schwieriger ist hingegen die prädikatenlogische Aussage, dass ein Eichhörnchen vier Beine oder weniger besitzt. Dafür werden spezielle Prädikate definiert, welche die Gleichheit (=) oder die Ungleichheit ( $\neq$ ) von Variablen bezeichnen. So ist die Aussage  $x = y$  wahr, wenn sowohl  $x$  als auch  $y$  die gleiche Instanz eines Objektes bezeichnen. Der Sachverhalt, das ein Eichhörnchen nun vier Beine oder weniger besitzt kann darauf aufbauend durch die Formel 3.11 beschrieben werden.

$$\begin{aligned} \forall x \text{ Eichhörnchen} &\rightarrow \exists y_1, y_2, y_3, y_4 \\ &\text{Beine}(x, y_1) \wedge \text{Beine}(x, y_2) \wedge \text{Beine}(x, y_3) \wedge \text{Beine}(x, y_4) \rightarrow \\ &y_1 = y_2 \vee y_1 = y_3 \vee y_1 = y_4 \vee y_2 = y_3 \vee y_2 = y_4 \vee y_3 = y_4 \end{aligned} \quad 3.11$$

Eine verkürzte Schreibweise mit der gleichen Ausdrucksstärke stellt die Notation der Formel 3.12 bereit (vgl. [Stuckenschmidt, 2009]).

$$\forall x \text{ Eichhörnchen}(x) \rightarrow \exists^{\leq 4} y \text{ Beine}(x, y) \quad 3.12$$

Damit ist es nun möglich, den in Abbildung 12 dargestellten Sachverhalt umfassend und semantisch korrekt zu beschreiben. Diese prädikatenlogische Ausdrucksweise ist fester Bestandteil der Web-Ontologie-Sprache<sup>32</sup> (OWL, [Horrocks, 2005]), eine Beschreibungslogik, welche in verschiedenen Ausdrucksstärken eine durch das World Wide Web Consortium (W3C) standardisierte Ontologiesprache darstellt. Ein geeigneter Editor namens Protégé wird vom Stanford Center for Biomedical Informatics Research der Stanford University School of Medicine lizenzfrei bereitgestellt (vgl. [Protege, 2009]). Eine ebenfalls lizenzfreie, für OWL optimierte, Inferenzenmaschine steht in Form des *Pellet Reasoner* zur Verfügung (vgl. [Sirin et al., 2007], [Pellet, 2010]).

## 3.2 Standards zur Modellierung von Domänenwissen

Standards zur Wissensmodellierung in der Domäne des Katastrophenmanagements sind primär auf die Modellierung der Meldungsinformation fokussiert. Dafür seien beispielhaft das *Common Alerting Protocol* (CAP, vgl. [Jones und Botterell, 2005]), die *Emergency Data Exchange Language* (EDXL, vgl. [Jones et al., 2006]) oder die *MayDay Modeling Language* (vgl. [MESA, 2006]) genannt. Diese Standards definieren zumeist die Elemente XML-basierter<sup>33</sup> Meldungsformate, mit dem Ziel eine instanzübergreifende Kommunikation auf Meldungsniveau zu sichern. Eine hinreichende Beschreibung der Domänensemantik bleibt dabei jedoch weitgehend unberücksichtigt.

Basierend auf der Nähe der Domänen des Katastrophenmanagements und des Militärs wurden ebenfalls militärische Modellierungsstandards bezüglich einer Eignung betrachtet. Das *Command and Control Information Exchange Data Model* (C2IEDM, vgl. [MIP, 2005]) bzw. dessen Erweiterung, das *Joint Command, Control and Consultation Information Exchange Data Model* (JC3IEDM, vgl. [MIP, 2007]) dienen dem standardisierten Informationsaustausch zwischen Teilstreitkräften und Bündnispartnern des Nordatlantikpaktes (NATO) auf Führungs- und Leitungsebene. Diese umfänglichen Datenmodelle stellen eine beidseitig bedeutungsgleiche, herkunftsunabhängige Datenmodellierung mit dem Ziel der barrierefreien Kommunikation und Interoperabilität auf Datenbankniveau sicher.

Bei dem C2IEDM handelt es sich um ein sehr umfangreiches Datenmodell, welches die Domäne in Form einer Taxonomie abbildet. Ausgehend von 11 unabhängigen Superklassen werden in 194 Entitäten die Objekte bzw. Konzepte der Domäne samt ihrer Attribute und Relationen beschrieben. Das Datenmodell verfügt über eine unkonventionelle Struktur. So werden Objekte grundsätzlich in *Objekt-Typ* und *Objekt-Item* unterschieden. Hintergrund ist jedoch nicht die in der Objektorientierung übliche Klassen und Instanzenunterscheidung, sondern eine Differenzierung zwischen intrinsischen (*Typ*) und extrinsischen (*Item*) Objekteigenschaften. Beispielhaft erläutert entspräche die Farbe der Rinde eines Baumes einer *Objekt-Typ* Eigenschaft, da diese für jeden Baum einer

<sup>32</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *web ontology language*.

<sup>33</sup> Englischsprachiger Fachterminus der Abkürzung XML: *Extensible Markup Language*.

Gattung Gültigkeit besitzt und sich über dessen Lebenszeit nicht ändert. Die konkrete Höhe eines Baumes hingegen ist eine *Objekt-Item* Eigenschaft, da sie explizit für einen Baum zu einem Zeitpunkt Gültigkeit besitzt. Diese Art der Objektmodellierung bedingt verschiedene Hierarchien bezüglich der *Typ* und der *Item* Eigenschaften, was eine Attributvererbung entsprechend der klassischen Objektorientierung ausschließt. Hinsichtlich einer Nutzung im Sinne der Zielstellung ist des Weiteren zu bemängeln, dass Aspekte der Bereitstellung und Prozessierung, wie sie eine formale Beschreibungslogik bietet, ungenügend unterstützt werden. Ferner unterliegt das *C2IEDM* bzw. das *JC3IEDM* einer sehr starken Ressourcen- und Kommunikationsorientierung, welche vorliegend jedoch eine sekundäre Rolle spielt. Letztlich unterscheidet sich das Diskursuniversum des Katastrophenmanagements maßgeblich vom militärischen, was die Entwicklung eines spezifischen Datenmodelles unabwendbar macht. Dennoch besteht eine konzeptionelle Nähe zwischen dem *C2IEDM* und dem folgend spezifizierten *Desaster Management Daten Modell* (*DM<sup>2</sup>*).

### 3.3 Entwickeltes ontologisches Daten-Modell

Das *Desaster Management Daten-Modell* (kurz: *DM<sup>2</sup>*) stellt eine umfassende ontologische Modellierung des relevanten Domänenwissens dar. Als Beschreibungssprache dient dabei auf Grund ihrer Ausdrucksstärke die Web-Ontologie-Sprache (OWL, vgl. Kapitel 3.1). Ausgehend von zehn unabhängigen Superklassen wird durch die Gesamtheit aller Entitäten, sowohl die Domänensemantik, wie auch das benötigte Wissen beschrieben. Diese zehn Superklassen stellt Abbildung 13 inklusive ihrer Relationen in IDEF1X-Notation dar (vgl. [KBSI, 1993], Anhang E: IDEF1X Notation).

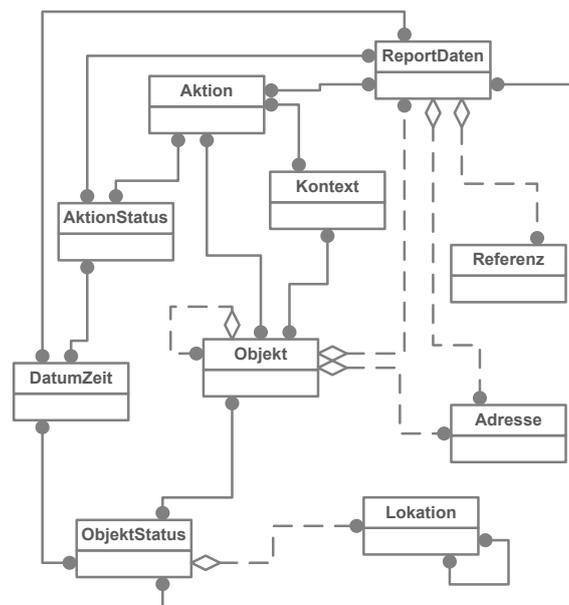


Abbildung 13: unabhängige Superklassen des *DM<sup>2</sup>* inklusive ihrer Relationen

#### Modellierungsbeispiel Gebäude

Die Eigenschaften der einzelnen Klassen werden durch Entitäten, deren Relationen und Attribute beschrieben (vgl. Abbildung 14). So wird konkret definiert, dass *Objekte* zwingend eine *ObjektID* zur eindeutigen Identifizierung (Primärschlüssel) sowie einen *Namen* benötigen, aber beliebig viele *Alternativnamen* aufweisen können. Des Weiteren bestehen Relationen zu den Subklassen *ObjektLokation* und *ReportDaten*, mit dem Ziel der eindeutigen Positionierung sowie der Referenzierung von Meldungen. Diese, in Abbildung 14 dargestellten Eigenschaften der Superklasse *Objekt*, werden entsprechend der objektorientierten Vererbung an alle Subklassen vererbt und stehen bei einer späteren Instanziierung zur Verfügung.

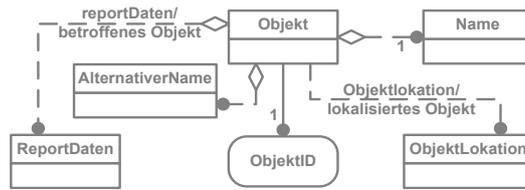


Abbildung 14: Entitäten der Superklasse Objekt

Die in Abbildung 15 dargestellten Subklassen spezifizieren die jeweiligen *Objekte* genauer und ermöglichen die Definition expliziter Eigenschaften. So weist eine Instanz der Klasse *Bauwerk* einen *Bauwerktyp* als explizite Eigenschaften aus, eine Instanz der Klasse *Organisation* hingegen *Mitglieder*. Subklassen können wiederum in weitere Subklassen unterteilt und mit spezifischen Eigenschaften ausgestattet werden. Wird ein Objekt instanziiert, so erbt es dank zulässiger Mehrfachvererbung die Eigenschaften all seiner Superklassen, welche je nach Kardinalität optional, zwingend oder multipel sind. Diese konkreten Objekteigenschaften werden in attribuierten Spalten<sup>34</sup> der Entitäten instanziiert. Dafür sind sowohl Datentyp der jeweiligen Spalte, als auch dessen Schlüssel-funktion eindeutig definiert.

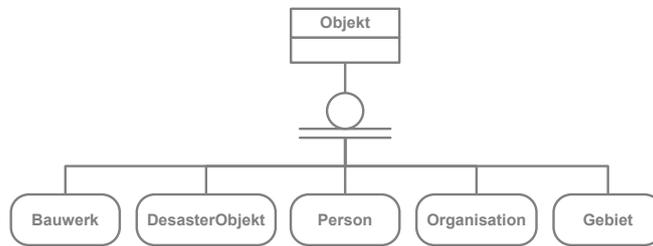


Abbildung 15: Subklassen der Superklasse Objekt

Die Domänensemantik ergibt sich durch die Gesamtheit der modellierten Eigenschaften aller Entitäten und deren Relationen, was Abbildung 16 detailliert für Objekte der Klasse *Gebäude* illustriert. So ergibt sich aus der Modellierung, dass Gebäude von Ereignissen betroffen sein können. Vorliegend sind dies ganz konkret die Ereignisse *Gebäudeschaden* und *Feuer*. Aus dieser Relation lässt sich nun explizit schlussfolgern, dass Gebäude sowohl *zerstörbar*, als auch *brennbar* sind. Aus den dazu inversen Relationen ist ferner ableitbar, welche Objekte *zerstörbar*, respektive *brennbar* sind.

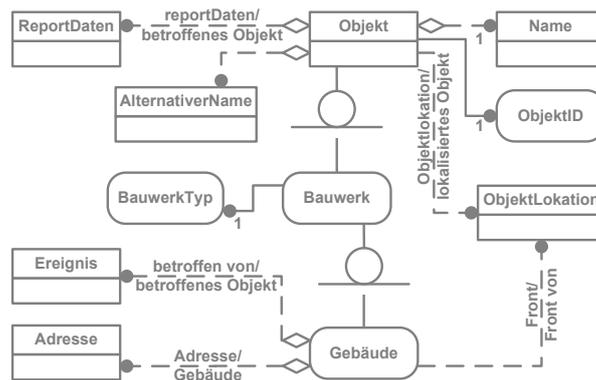


Abbildung 16: Modellierung der Objekteigenschaften eines Gebäudes

Da Ontologien entsprechend [Gruber, 1993] explizite Spezifizierungen gemeinsamer Konzeptualisierungen darstellen, sei darauf hingewiesen, dass lediglich die für das Diskursuniversum relevanten Eigenschaften modelliert wurden.

<sup>34</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *slot*.

### Charakteristik des Datenstrukturmodelles

Im Vordergrund der Wissensmodellierung steht anforderungsbedingt die Repräsentation der räumlichen Objektattribute, welche neben der Lage im Raum ebenfalls die Objektgeometrie einschließen. Dem entsprechend werden diese nicht als Attribut im Sinne der Datenbankmodellierung, sondern als unabhängige Entität umgesetzt. Dies erfolgte GIS-üblich durch die zweidimensionalen Objektprimitiven *Polygon*, *Linie* und *Punkt*, welche somit Subklassen der Superklasse *Lokation* darstellen (vgl. Abbildung 17). *Punkte* werden im Datenstrukturmodell des DM<sup>2</sup> in *absolut* und *relativ* unterschieden. Ein absoluter Punkt besteht einzig aus einer *X*- und einer *Y*-*Koordinate*, unter Verzicht auf die Erfassung des geodätischen Datums. Da alle raumbezogene Information einer einheitlichen Quelle entstammt und folglich ein einheitliches Datum besitzen, ist dies hier überflüssig. Dem entgegen stehen relative Punkte, welche sich durch die Festlegung in einem lokalen Koordinatensystem auszeichnen. Diese lokalen Systeme dienen jedoch einzig der Prozessierung und sind demnach definitionsbedingt lediglich ursprungsverschoben und nicht achsverdreht, wodurch der Verweis auf den lokalen Ursprungspunkt zur eindeutigen Datierung hinreicht. *Linien* sind, wie *Polygone* auch, über *Punkte* definiert. So zeichnet sich eine Linie durch die Festlegung eines Start und eines Endpunktes aus, wohingegen ein *Polygon* aus beliebig vielen Stützpunkten bestehen kann (vgl. Abbildung 17).

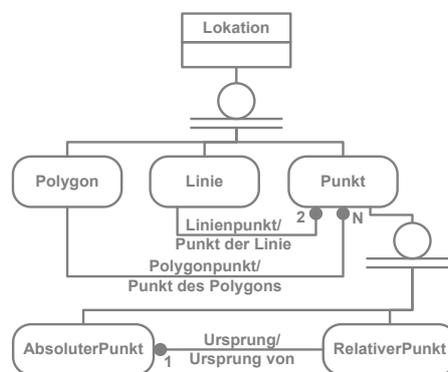


Abbildung 17: Modellierung der Objektklasse Lokation

Die Verortung eines konkreten Objektes erfolgt jedoch nicht direkt über eine Relation zwischen dem Objekt und den entsprechenden Raumprimitiven, sondern über die Entität *ObjektLokation* der Superklasse *ObjektStatus*. Dies eröffnet die Möglichkeit, neben der Lage auch Kontextinformation zur jeweiligen Position zu repräsentieren. So kann einerseits die Dynamik eines Objektes durch die zeitliche Datierung seiner Position und andererseits die Lage verschiedener Objekte am gleichen Ort transparent und redundanzfrei dargestellt werden. Neben räumlicher Statusinformation bündelt die Superklasse *ObjektStatus* alle Objekte betreffende Verlaufsinformation. Analog dazu wird in der Superklasse *EreignisStatus* alle, für Ereignisse relevante Statusinformation modelliert. Intendiert wird damit ebenfalls eine transparente und redundanzfreie Darstellung von Dynamik und Kontext. So äußert sich das Löschen eines Brandes, unter Erhalt der Historie durch die Statusänderung des Ereignisses, von Vollbrand auf gelöscht. Zudem enthält der Status einen Verweis auf die Meldung, der die Information entstammt sowie deren Zeitpunkt. Der Ereignisstatus, wie auch die Ereignisse selbst, sind gemäß der Modellierungsphilosophie für jeden Ereignistyp spezifisch in einer Subklassenhierarchie modelliert (vgl. Abbildung 18).

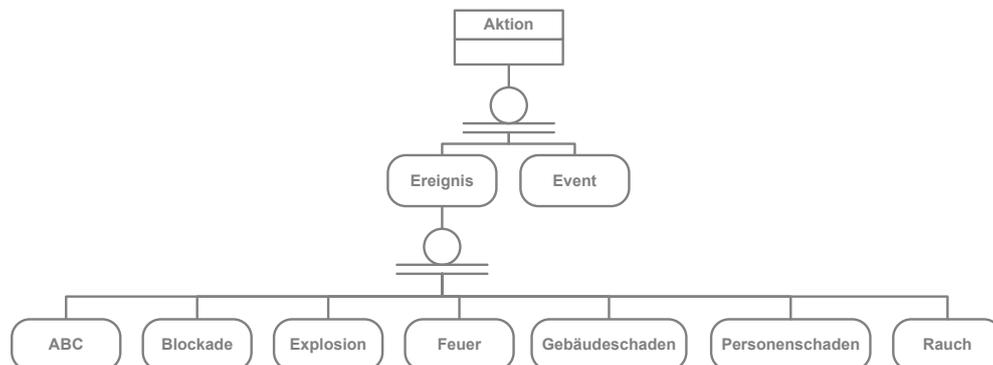


Abbildung 18: Subklassen der Superklasse Aktion

Dies ermöglicht die Formulierung und Ableitung von konkretem Hintergrundwissen auf Basis des Datenstrukturmodells, was eine semantisch korrekte Repräsentation der Ereignisse gestattet. So kann das Ereignis *Feuer* einzig *DesasterObjekte*, im Sinne von *Fahrzeugen* oder *Gebäuden* betreffen. Die räumliche Position eines Ereignisses ist im Gegenzug aus der Lage des betroffenen Objektes ableitbar. Bei der Prozessierung von verbalen Katastrophenmeldungen kann dieses Wissen nun gezielt genutzt werden um die Ergebnismenge sowohl räumlich als auch quantitativ einzuschränken.

Eine weitere Möglichkeit zur räumlichen Referenzierung bietet die Superklasse *Adresse*. Diese fungiert jedoch einzig als Gazetteer und verknüpft Adressangaben einer instanziierten Meldung mit den entsprechenden instanziierten Objekten der Superklasse *Objekt*. Neben den Adressangaben kann innerhalb einer Meldung ebenfalls durch Gebäudebezeichnung, Alternativbenennung oder Bauwerktyp auf konkrete Objekte referenziert werden. Dies ist nicht immer eindeutig, wird aber im Falle einer Mehrdeutigkeit durch die Referenzierung auf die entsprechende Objektmenge abgefangen. Neben dem Objektbezug führt die Superklasse *ReportDaten* alle ein Ereignis betreffende Information in die Wissensbasis ein (vgl. Abbildung 19).

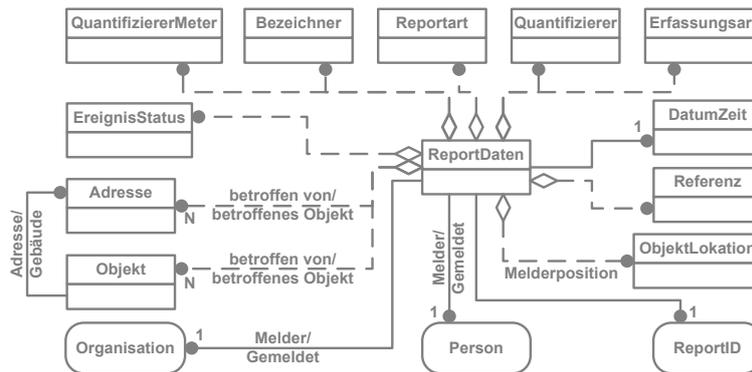


Abbildung 19: Modellierung der Superklasse *ReportDaten*

Ferner gewährleistet die Instanzierung der jeweiligen Meldungsobjekte eine Dokumentation des Meldungsverlaufes mit aller, entsprechend der Dienstvorschrift 100 (DV100, vgl. [SKK, 1999]), notwendigen Information. Dies umfasst neben dem gemeldeten Sachverhalt ebenfalls Information über die *Erfassungsart* (Beobachtung, Vermutung), die *Person* des Meldenden (Passant, Experte) sowie den Meldungszeitpunkt. Im Weiteren wird aus jeder Meldung ein Informationstupel erzeugt, welches die Grundlage der Prozessierung bildet (vgl. Kapitel 5, ab Seite 49).

Den Aufbau eines auf den Meldungen basierenden Zusammenhanges gestattet die Superklasse *Referenz*. Diese bündelt alle zu einem Sachverhalt auftretenden Meldungen und ermöglicht dadurch die Auswertung rückbezogener Information. Einen globaleren Kontext baut die gleichnamige Superklasse *Kontext* auf. Diese gestattet es unter anderem, die vom Krisenstab vorgenommene thematische und räumliche Bündelung von Ereignissen in Einsatzabschnitte (kurz: EA) ebenfalls in der Wissensbasis abzubilden und der Prozessierung zur Verfügung zu stellen.

### Inferenz auf Basis des Datenstrukturmodelles

Durch diese ganzheitliche Domänenmodellierung ist es auf Basis des Datenstrukturmodelles möglich, weiteres, nicht explizit modelliertes Wissen abzuleiten. Dies erfolgt unter Nutzung von Bedingungsgleichungen, sogenannten Konditionen, welche, basierend auf der Beschreibungslogik, formuliert werden können und die Menge der originären Ableitungsregeln um anwendungsspezifische erweitern. So kann in der Inferenzmaschine definiert werden, in welchem Sinne eine bestimmte Relation zu interpretieren ist. Dieser Sachverhalt wird vorliegend genutzt, um die Topologie räumlicher Objekte, basierend auf ihren relationalen Beziehungen abzuleiten. So entspricht die *Teil von*<sup>35</sup> Beziehung, wie sie objektrelational modelliert ist, der räumlichen Relation *enthält (in)*, was äquivalent zur mengenwertigen Interpretation dieser Relation ist. Die entsprechende Relationsinverse ist durch deren Gerichtetheit im Sinne von *enthalten (co)* zu interpretieren. Instanzierungen gleicher Klassen ergeben topologisch *disjunkte (di)* Objekte, was ebenfalls mengenwertig begründet werden kann, bzw. eine Äquivalenz zur mengenwertigen Interpretation besitzt. Neben derartigen allgemeingültigen Ableitungen existieren ferner

<sup>35</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *part of*.

explizit zu formulierende Relationen. So ist die domänenspezifische Relation *betroffen von*, wie auch die Relation *bekämpft Ereignis* im topologischen Sinne durch *gleich (eq)* zu interpretieren. Abbildung 20 (links) illustriert diesen Sachverhalt anhand eines, einem Einsatzabschnitt zugeordneten Ereignisses, hier Feuer, sowie einer Einsatzkraft.

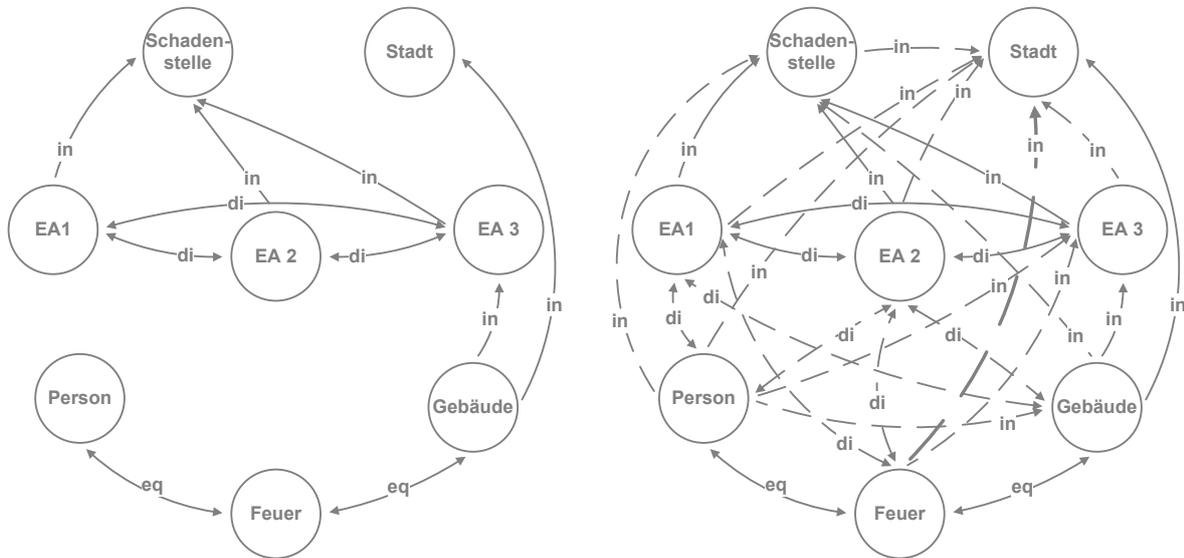


Abbildung 20: topologische Interpretation der modellierten Objektrelationen (links) sowie das darauf aufbauende Inferenznetz (rechts, gestrichelt)

Darauf aufbauend kann ein Inferenznetz modelliert werden, welches basierend auf dem Modus Barbara<sup>36</sup> sowie definierten Schlussregeln die Identifikation der topologischen Relationen zwischen den Objekten erlaubt. So kann anhand der Tatsache, dass sich ein Gebäude innerhalb eines Einsatzabschnittes befindet und dieser Teil einer Schadenstelle ist, geschlossen werden, dass sich besagtes Gebäude ebenfalls innerhalb der Schadenstelle befindet (vgl. Abbildung 20 (rechts)). Die Notwendigkeit expliziter Inferenzregeln zeigt sich durch den in Formel 3.13 dargestellten Schluss von einem Feuer ( $x$ ) über das betroffene Gebäude ( $y$ ) zum Einsatzabschnitt ( $z$ ).

$$\forall x, y, z \text{ gleich}(x, y) \wedge \text{enthalten}(y, z) \rightarrow \text{enthalten}(x, z) \tag{3.13}$$

Entsprechend ist das Schlussverhalten des Inferenznetzes bezüglich aller, vom Modus Barbara abweichenden Objektrelationen, separat zu definieren. Diese expliziten Inferenzregeln sind durch die Prädikate der Gleichung 3.14 formuliert.

$$\begin{aligned} \forall x, y, z \text{ gleich}(x, y) \wedge \text{überlappt}(y, z) &\rightarrow \text{überlappt}(x, z) \\ \forall x, y, z \text{ gleich}(x, y) \wedge \text{enthält}(y, z) &\rightarrow \text{enthält}(x, z) \\ \forall x, y, z \text{ gleich}(x, y) \wedge \text{disjunkt}(y, z) &\rightarrow \text{disjunkt}(x, z) \\ \forall x, y, z \text{ enthalten}(x, y) \wedge \text{disjunkt}(y, z) &\rightarrow \text{disjunkt}(x, z) \end{aligned} \tag{3.14}$$

Ferner besteht jedoch eine Restmenge an Kombinationen topologischer Relationen, welche nicht eindeutig entscheidbar sind. Diese bilden auf eine Ergebnismenge möglicher Schlüsse ab (vgl. Formel 3.15) und werden auf Grund mangelnder Eindeutigkeit nicht berücksichtigt.

$$\text{enthält}(x, y) \wedge \text{disjunkt}(y, z) \rightarrow \text{disjunkt}(x, z) \vee \text{überlappt}(x, z) \vee \text{enthält}(x, z) \tag{3.15}$$

Abbildung 20 (rechts) zeigt alle aus dem Beispielsachverhalt (links) eindeutig folgerbaren topologischen Relationen. Das Inferenznetz bietet demnach eine elegante Möglichkeit, basierend auf der Objektsemantik, eine bedingte Menge topologischer Objektrelationen zu identifizieren.

<sup>36</sup> Modus Barbara, als Spezialfall des Kettenschlusses: Wenn  $A \rightarrow B$  und  $B \rightarrow C$ , dann  $A \rightarrow C$ .

Dies erlaubt im Weiteren die Auflösung topologischer Referenzen, wie durch die Beispielaussage *das Feuer in der Stadt* gegeben (vgl. Abbildung 20 (rechts), fett illustriert). Darauf aufbauend können zudem, einem menschlichen Operateur gleich, Bezüge verkürzter Nominalphrasen aufgelöst werden. Dabei handelt es sich um verbale Rückbezüge wie sie die Beispielaussage *das Feuer hier* aufspannt. So referenziert der Sprecher durch das *hier* auf seinen Standpunkt, welcher im Sinne der Ontologie die topologische Relation *gleich* impliziert.

### 3.4 Zusammenfassung

Die semantische Modellierung des Domänenwissens ermöglicht es, neben dem originär hinterlegten Wissen eine Menge an zusätzlicher Information abzuleiten. So besitzen die Objekte nicht einzig Zustände, sondern auch Fähigkeiten, welche durch eine Inferenzmaschine abgerufen und logisch kombiniert werden können. Dieses Schlussverhalten ist dem menschlicher Operateure sehr ähnlich und ermöglicht einen intuitiven Umgang mit Wissen. Zudem wird die Verarbeitung semantischer Topologie gestattet, welche eine neue Ebene der Auswertung eröffnet.

Im Sinne der formulierten Zielvorstellungen wurde entsprechend Domänen- und Weltwissen semantisch korrekt einbezogen, was ferner die Ableitung topologischer Objektrelationen gestattet. Zudem kann auf Basis der dargestellten Modellierung die in These I formulierte Theorie als nachgewiesen betrachtet werden.

## Teil II

### 4 Mathematische Modellierung unscharfer Konzepte

In Kapitel 2 konnte herausgestellt werden, dass räumliche Konzepte und deren verbale Beschreibungen zumeist nicht scharf vorliegen. Sie repräsentieren demnach kein perfektes Wissen im Sinne der Definition (vgl. Kapitel 2.1, Seite 14). Folgend werden zwei aufeinander aufbauende Konzepte vorgestellt, um dieses ungewisse bzw. vage Wissen dennoch adäquat mathematisch zu beschreiben. Dies geschieht jedoch nicht vollständig, sondern in dem Maße, wie es im Sinne der Ausarbeitung für erforderlich scheint. Auf dem Verständnis der mathematischen Grundlagen, wie auch der Notation dieser Theorien wird im Weiteren aufgebaut.

#### 4.1 Unschärfe Mengen

Die klassische Mengenlehre unterscheidet bezüglich der Zugehörigkeit eines Elementes  $x$  zur Menge  $A$  des Universums  $\Omega$  scharf. So gehört  $x$  entweder zur Menge  $A$ , es gilt demnach  $x \in A$ , oder  $x$  gehört nicht zur Menge  $A$ , es gilt also  $x \notin A$ . Beschrieben wird dies über die charakteristische Funktion  $\mu_A$ , welche die Zugehörigkeit auf die Menge der natürlichen Zahlen 0 und 1 abbildet (vgl. Formel 4.1). Die Menge  $A$  ist demnach definiert durch Formel 4.2.

$$\mu_A: \Omega \rightarrow \{0,1\} \quad 4.1$$

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in \Omega\} \quad 4.2$$

Bei unscharfen Mengen<sup>37</sup> wird nun die Zugehörigkeit des Elementes  $x$  zur Menge  $\tilde{A}$  nicht scharf, sondern unscharf beschrieben (vgl. [Zadeh, 1965], [Biewer, 1997]). Die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\tilde{A}}$  bildet die Zugehörigkeit demnach auf das Intervall der positiven reellen Zahlen von 0 bis 1 ab (vgl. Formel 4.3). Die unscharfe Menge  $\tilde{A}$  ist demnach definiert durch die Formel 4.4.

$$\mu_{\tilde{A}}: \Omega \rightarrow [0,1] \mid \mu_{\tilde{A}} \in \mathbb{R}_0^+ \quad 4.3$$

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in \Omega\} \quad 4.4$$

Eine unscharfe Menge wird nun repräsentiert durch ihre Zugehörigkeitsfunktion, für die ebenfalls die mengenwertigen Operationen der Vereinigung (Formel 4.5), des Schnitts (Formel 4.6) und des Komplementes (Formel 4.7) definiert sind.

$$\mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) = \max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \mid \mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}: \Omega \rightarrow [0,1] \quad 4.5$$

$$\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) = \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \mid \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}: \Omega \rightarrow [0,1] \quad 4.6$$

$$\mu_{\neg \tilde{A}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) \mid \mu_{\neg \tilde{A}}: \Omega \rightarrow [0,1] \quad 4.7$$

Zadeh formulierte mit der Theorie unscharfer Mengen einen Formalismus zur Modellierung unscharfer Kategorien, mit der er eine Verarbeitung linguistischer Problemstellungen intendierte. Dem entsprechend definierte er auch konkret Terme die es ermöglichen linguistische Konzepte auf Konzepten unscharfer Mengen abzubilden. Diese sind folgend definiert:

*linguistischer Term*

Definition 4.1

Die unscharfe Menge  $\tilde{A}$  heißt *linguistischer Term* auf  $\Omega$ , gdw. die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\tilde{A}}$  ein auf  $\Omega$  definiertes Konzept der natürlichen Sprache beschreibt.

<sup>37</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *fuzzy set*.

*linguistisches Prädikat*

Definition 4.2

Sei  $\tilde{A}$  ein linguistischer Term auf  $\Omega$  und  $X \in \Omega$  dann heißt der Ausdruck „ $X$  sei  $\tilde{A}$ “ *linguistisches Prädikat* auf  $\Omega$ .

*linguistische Variable*

Definition 4.3

Sei  $X \in \Omega$  und sei ebenfalls ein linguistisches Prädikat  $X$  sei  $\tilde{A}$  gegeben, dann heißt  $X$  *linguistische Variable* auf  $\Omega$ .

*unscharfe Restriktion*

Definition 4.4

Eine *unscharfe Restriktion*  $R(X, \omega)$  ist eine unscharfe Teilmenge von  $\Omega$ , die den Werten  $\omega$  durch die Variable  $X$  auferlegt ist. Dabei sei  $\omega$  ein generischer Bezeichner für alle Elemente von  $\Omega$ .

Um nun Operatoren zur Modellierung alltagssprachlicher Verknüpfungen auf unscharfen Mengen abzubilden, müssen die Axiome der booleschen Logik weitgehend beachtet werden (vgl. [Biewer, 1997]). So kann im scharfen Fall der Wahrheitsgrad einer Aussage  $l$  zur Menge aller wahren Aussagen  $W$  durch ein Prädikat  $U$  dargestellt werden. Es gilt folglich  $\mu_U(l) \rightarrow \{0,1\}$ . Im unscharfen Fall wird nun die unscharfe Menge  $\tilde{U}$  als *unscharfes Prädikat* interpretiert und der Wahrheitsgehalt der Aussage durch  $\mu_U(l) \rightarrow [0,1]$  angegeben. Entsprechend repräsentiert jede unscharfe Menge eine Aussage der unscharfen Logik. Da die Eigenschaften der booleschen Algebra jedoch nicht umfänglich umgesetzt werden können, ist diese unscharfe Logik nicht im Sinne einer syntaktischen Ableitbarkeit zu verstehen, sondern vielmehr als naive, semantische Logik (vgl. [Biewer, 1997]). Durch die dual zueinander definierten Klassen der t-Normen und t-Conormen bzw. s-Normen werden viele Eigenschaften der scharfen Logik sinnvoll für die unscharfe Logik erweitert.

Die unscharfe Verallgemeinerung der logischen Konjunktion  $\wedge$  ist durch die Familie der triangulären Normen, kurz t-Normen, gegeben. So ist eine t-Norm eine binäre Operation  $T: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$  welche für  $\mu(x)$ ,  $\mu(y)$  und  $\mu(z)$  die Axiome 4.8 bis 4.11 erfüllt.

$$T(\mu(x), \mu(y)) = T(\mu(y), \mu(x)) \quad \text{Kommutativität} \quad 4.8$$

$$T(T(\mu(x), \mu(y)), \mu(z)) = T(\mu(x), T(\mu(y), \mu(z))) \quad \text{Assoziativität} \quad 4.9$$

$$\mu(x) \leq \mu(y) \rightarrow T(\mu(x), \mu(z)) \leq T(\mu(y), \mu(z)) \quad \text{Monotonie} \quad 4.10$$

$$T(1, \mu(x)) = \mu(x) \quad \text{Einselement} \quad 4.11$$

Weitere optionale Axiome sind Stetigkeit auf  $[0, 1]^2$  und die Idempotenz, also  $T(x, x) = x$ . Diesen Axiomen wird nun eine ganze Reihe von Normen gerecht, von denen folgend die Minimumnorm (Formel 4.12) und die Produktnorm (Formel 4.13) dargestellt sind.

$$T_M(\mu(x), \mu(y)) = \min(\mu(x), \mu(y)) \quad 4.12$$

$$T_P(\mu(x), \mu(y)) = \mu(x) \cdot \mu(y) \quad 4.13$$

Die unscharfe Verallgemeinerung der logischen Disjunktion  $\vee$  wird als s-Norm bezeichnet. So ist eine s-Norm eine binäre Operation  $S: [0, 1]^2 \rightarrow [0, 1]$  welche, ähnlich der t-Norm, für  $\mu(x)$ ,  $\mu(y)$  und  $\mu(z)$  die Axiome 4.14 bis 4.17 erfüllt.

$$S(\mu(x), \mu(y)) = S(\mu(y), \mu(x)) \quad \text{Kommutativität} \quad 4.14$$

$$S(S(\mu(x), \mu(y)), \mu(z)) = S(\mu(x), S(\mu(y), \mu(z))) \quad \text{Assoziativität} \quad 4.15$$

$$\mu(x) \leq \mu(y) \rightarrow S(\mu(x), \mu(z)) \leq S(\mu(y), \mu(z)) \quad \text{Monotonie} \quad 4.16$$

$$S(\mu(x), 0) = \mu(x) \quad \text{Nullelement} \quad 4.17$$

Die Stetigkeit und Idempotenz gelten für die s-Norm ebenfalls als optionale Eigenschaften. Unter Erhalt des deMorganschen Gesetzes (vgl. Formel 4.18) wird die s-Norm Familie basierend auf den t-Normen und der Negation entwickelt.

$$\neg(XVY) \equiv (\neg X \wedge \neg Y) \quad 4.18$$

So existiert zu jeder t-Norm auch eine aus dieser entwickelten s-Norm. Die jeweiligen Komplemente zur Minimum- und Produktnorm sind folglich die Maximumnorm (Formel 4.19) sowie die probabilistische Summe (Formel 4.20).

$$S_M(\mu(x), \mu(y)) = \max(\mu(x), \mu(y)) \quad 4.19$$

$$S_P(\mu(x), \mu(y)) = \mu(x) + \mu(y) - \mu(x) \cdot \mu(y) \quad 4.20$$

Den t- und s-Normen ist zu Eigen, dass sie nahezu keine Werte zwischen den Extremen, also Minimum und Maximum abbilden. Entscheidungen menschlicher Operateure berücksichtigen jedoch auch kompensatorische Elemente, so dass niedrige Bewertungen eines Merkmals durch hohe Bewertungen eines anderen Merkmals kompensiert werden können. Die resultierende Gesamtbewertung wird folglich weder durch das Maximum, noch durch das Minimum bekleidet. Um derartige Kompensationseffekte auch auf unscharfen Mengen abzubilden werden verschiedene Operatoren vorgeschlagen. Dabei kann hinsichtlich der Eigenschaften der jeweiligen Normen unterschieden werden. So entsprechen die parametrisierten Yager-Normen den bekannten Axiomen der t- und s-Normen in vollem Maße (vgl. Formel 4.21 und 4.22, [Yager, 1980b]).

$$T_Y(\mu(x), \mu(y)) = 1 - \min\left(1, \sqrt[\delta]{(1 - \mu(x))^\delta + (1 - \mu(y))^\delta}\right) \text{ mit } \delta \in (0, \infty) \quad 4.21$$

$$S_Y(\mu(x), \mu(y)) = \min\left(1, \sqrt[\delta]{\mu(x)^\delta + \mu(y)^\delta}\right) \text{ mit } \delta \in (0, \infty) \quad 4.22$$

Ein mittelnder Operator ist nun eine Funktion  $M: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ ,  $M \notin \{min, max\}$ , welche für  $\mu(x)$ ,  $\mu(y)$ ,  $\mu(i)$  und  $\mu(j)$ , abweichend von t- und s-Normen, lediglich die „weichen“ Axiome 4.23 bis 4.25 erfüllt.

$$M(\mu(x), \mu(y)) = M(\mu(y), \mu(x)) \quad \text{Kommutativität} \quad 4.23$$

$$\min(\mu(x), \mu(y)) \leq M(\mu(x), \mu(y)) \leq \max(\mu(x), \mu(y)) \quad \text{Stabilität} \quad 4.24$$

$$\mu(x) \leq \mu(y) \wedge \mu(i) \leq \mu(j) \rightarrow M(\mu(x), \mu(i)) \leq M(\mu(y), \mu(j)) \quad \text{Monotonie} \quad 4.25$$

Ein Operator aus der Familie der mittelnden Operatoren, welche auf Grund seiner dämpfenden Eigenschaften in dieser Arbeit Anwendung findet und den Axiomen gerecht wird, ist das von [Dyckhoff und Pedrycz, 1984] vorgeschlagene generalisierte Mittel (vgl. Formel 4.26)

$$M_G(\mu_0(x), \dots, \mu_n(x)) = \left(\sum_{i=1}^n w_n \mu_i(x)^\tau\right)^{\frac{1}{\tau}} \text{ mit } \sum_{i=1}^n w_n = 1 \text{ und } \tau \in (0, \infty) \quad 4.26$$

## 4.2 Possibilitätstheorie

Die in Abschnitt 4.1 erläuterte Theorie der unscharfen Mengen stellt ein Konzept zur mathematischen Behandlung einer Randbereichsunschärfe dar. Intention ist folglich die Modellierung der durch unscharfe Kategorien begründeten *Unbestimmtheit*. Diese ist jedoch strikt von der *Unsicherheit* darüber, ob eine scharf definierte Kategorie zutrifft oder nicht, zu unterscheiden. Dennoch bestehen zwischen diesen beiden Konzepten sowohl formale als auch inhaltliche Zusammenhänge, da Zugehörigkeiten typischerweise mit Unsicherheiten korrespondieren. Dies begründet sich durch einen häufig äquivalenten bzw. übereinstimmenden Verlauf der Zugehörigkeitsfunktionen und der empirischen Dichten über die Zuordnungshäufigkeiten (vgl. [Biewer, 1997]). Basierend auf der

Theorie der unscharfen Mengen wurde daher durch [Zadeh, 1978] und [Dubois und Prade, 1988] eine eigenständige Unsicherheitstheorie formuliert, in die folgend eingeführt wird.

#### Possibilitätsverteilung

Definition 4.5

Eine Possibilitätsverteilung  $\pi_X$  über dem Universum  $\Omega$  ist definiert durch die unscharfe Restriktion  $R(X, \omega)$ . Diese unscharfe Restriktion ist jedoch entsprechend Definition 4.4 eine unscharfe Teilmenge, die den Wertebereich der Variablen  $X$  einschränkt. Demnach sind Possibilitätsverteilungen als Zugehörigkeitsfunktionen zu dieser unscharfen Teilmenge zu verstehen (vgl. [Biewer, 1997]).

Wird also konkret die Variable  $X$  durch die unscharfe Menge  $\tilde{O}$  eingeschränkt und repräsentiert  $\mu_{\tilde{O}}: \Omega \rightarrow [0, 1]$  die charakteristische Funktion von  $\tilde{O}$ , dann wird die Possibilitätsverteilung  $\pi_X: \Omega \rightarrow [0, 1]$  durch das linguistische Prädikat „ $X$  ist  $\tilde{O}$ “ induziert. Diese mit der Variablen  $X$  assoziierte Possibilitätsverteilung  $\pi_X(\omega)$  ist nun numerisch mit der Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\tilde{O}}(\omega)$  für  $\omega \in \Omega$  gleich.

Da eine Possibilitätsverteilung folglich als Zugehörigkeit betrachtet werden kann, sind alle auf unscharfen Mengen definierten Operatoren und Konzepte ebenfalls auf Possibilitätsverteilungen anwendbar. Trotz der numerischen Gleichheit der Verteilungen ist die Aussagesemantik dieser eine andere. Angewandt auf die hinreichend bekannte räumliche Beispielszene des Baumes vor dem Haus, stellt sich dies wie folgt dar:

Beschreibt der linguistische Term *nah* eine durch  $\mu_{nah}$  charakterisierte unscharfe Menge und  $\pi_{Distanz(Baum)}$  eine durch das Prädikat *der Baum ist nah* induzierte Possibilitätsverteilung über den Abstand, dann gibt  $\pi_{Distanz(Baum)}(7m) = 0,9$  an zu welchem Grad es möglich ist, dass das Prädikat *der Baum ist 7m entfernt* zutrifft, unter der Bedingung, dass der Baum *nah* ist.  $\mu_{nah}(7m) = 0,9$  hingegen beschreibt, inwieweit das Prädikat *der Baum ist 7m entfernt* mit dem Konzept *nah* kompatibel ist.

Beide Aussagen sind demnach numerisch gleich, jedoch semantisch sehr verschieden (vgl. [Yager, 1980a]). Dies ist generell bei dem Umgang mit Possibilitäten zu beachten, da die numerische Gleichheit dazu verleitet, die ungleiche Aussagesemantik der beiden Konzepte zu vernachlässigen. Obwohl die Possibilitäten entsprechend ihrer Semantik eine Unsicherheitsbewertung darstellen, sind sie dennoch von Wahrscheinlichkeiten abzugrenzen. Axiomatisch definiert sich dies wie folgt (vgl. [Natvig, 1981]):

- Entgegen der Wahrscheinlichkeiten summieren sich die Possibilitäten nicht unter Zwang zu eins auf.
- Eine hohe Possibilität impliziert nicht automatisch eine hohe Wahrscheinlichkeit, wie sich auch von einer hohen Wahrscheinlichkeit nicht auf eine hohe Possibilität schließen lässt.
- Entsprechend des Konsistenzprinzips<sup>38</sup> definiert die Possibilitätsverteilung die Obergrenze der Wahrscheinlichkeitsverteilung (vgl. [Zadeh, 1978]).

#### Possibilitätsgrade

Definition 4.6

Possibilitätsgrade bezeichnen die Funktionswerte der Possibilitätsverteilung  $\pi_X(\omega)$  und geben an, zu welchem Grad eine Wertzuweisung für eine Variable als möglich gilt (vgl. [Biewer, 1997]).

Dabei wird der Possibilitätsgrad null als völlig unmöglich und der Possibilitätsgrad eins als uneingeschränkt möglich verstanden. Dies setzt jedoch eine normalisierte Possibilitätsverteilung voraus (vgl. Formel 4.27). Zudem besteht eine Ordnung entsprechend Formel 4.28 nach der  $x = \omega_j$  gegenüber  $x = \omega_i$  zu bevorzugen ist, da für  $x = \omega_j$  eine höhere Konsistenz besteht.

$$\exists \omega: \pi_X(\omega) = 1 \quad 4.27$$

$$\pi_X(\omega_i) < \pi_X(\omega_j) \quad 4.28$$

Zur mathematischen Beschreibung einer konkreten Possibilität werden, analog den Wahrscheinlichkeitsmaßen, Possibilitätsmaße genutzt. Diese entsprechen jedoch nicht den Kolmogorow-Axiomen<sup>39</sup>. So treten generell für

<sup>38</sup> [Zadeh, 1978] bezeichnete dies als „*possibility/probability consistency principle*“.

unscharfe Maße  $g: P(\Omega) \rightarrow [0, 1]$  die axiomatischen Bedingungen 4.29 bis 4.31 an deren Stelle (vgl. [Biewer, 1997]).

$$g(\emptyset) = 0 \text{ und } g(\Omega) = 1 \quad \text{Randbedingung} \quad 4.29$$

$$A \subseteq B \rightarrow g(\tilde{A}) \leq g(\tilde{B}) \quad \text{Monotonie} \quad 4.30$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g(\tilde{A}_n) = g\left(\lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{A}_n\right) \quad \text{Stetigkeit} \quad 4.31$$

Das konkrete Possibilitätsmaß  $\Pi(\tilde{A})$  beschreiben [Dubois und Prade, 1988] formal durch Definition 4.7 sowie Gleichung 4.32.

*Possibilitätsmaß* Definition 4.7

Possibilitätsmaße  $\Pi(\tilde{A})$  bezeichnen den höchsten Grad der Konsistenz zwischen einem Element der unscharfen Menge  $\tilde{A}$  und der Possibilitätsverteilung  $\pi_X$ . Diese sind entsprechend Formel 4.32 definiert.

$$\Pi(\tilde{A}) = \sup_{\omega \in \Omega} \min\{\mu_{\tilde{A}}(\omega), \pi_X(\omega)\} \quad 4.32$$

Zusätzlich führten [Dubois und Prade, 1988] ein Notwendigkeitsmaß  $N(\tilde{A})$  ein. Dieses ist gewissermaßen als Negativhypothese zum Possibilitätsmaß  $\Pi(\tilde{A})$  zu verstehen und durch Definition 4.8 sowie Formel 4.33 beschrieben.

*Notwendigkeitsmaß* Definition 4.8

Notwendigkeitsmaße  $N(\tilde{A})$  beschreiben die Sicherheit, mit der Elemente der unscharfen Menge  $\tilde{A}$  mit der Possibilitätsverteilung  $\pi_X$  konsistent sind, über die Möglichkeit, mit der diese Elemente zur Komplementärmenge gehören könnten. Diese ist formal in Gleichung 4.33 definiert.

$$N(\tilde{A}) = 1 - \Pi(\neg\tilde{A}) = \max\left(\inf_{\omega \notin \Omega} \{1 - \mu_{\tilde{A}}(\omega)\}, \inf_{\omega \notin \Omega} \{1 - \pi_X(\omega)\}\right) \quad 4.33$$

Auf diesen unscharfen Maßen sind ebenfalls die mengenwertigen Operationen der Vereinigung (4.34) und der Schnittmenge (4.35) für  $\tilde{A}, \tilde{O} \subseteq \Omega$  definiert. Basierend auf der quasi komplementären Definition der beiden Konzepte wurde auf die Negation verzichtet (vgl. [Dubois und Prade, 1988]).

$$\Pi(\tilde{A} \cup \tilde{O}) = \max(\Pi(\tilde{A}), \Pi(\tilde{O})), N(\tilde{A} \cup \tilde{O}) \geq \max(N(\tilde{A}), N(\tilde{O})) \quad 4.34$$

$$\Pi(\tilde{A} \cap \tilde{O}) \leq \min(\Pi(\tilde{A}), \Pi(\tilde{O})), N(\tilde{A} \cap \tilde{O}) = \min(N(\tilde{A}), N(\tilde{O})) \quad 4.35$$

Durch diese beiden unscharfen Maße ergibt sich nun die Möglichkeit der Bewertung eines konkreten Prädikates durch ein Intervall  $[\Pi(\tilde{A}), N(\tilde{A})]$ , welches die Quasihypothesen für und gegen die Konsistenz bezüglich der Possibilitätsverteilung enthält. Entsprechend des axiomatisch verankerten Konsistenzprinzips ist zusätzlich die Aussage abzuleiten, dass die Wahrscheinlichkeit für dieses Prädikat durch das Intervall eingeschlossen wird (vgl. [Biewer, 1997]). Dies ist der Fall, da  $\Pi(\tilde{A})$  ein schwächeres Maß als die Wahrscheinlichkeit darstellt und diese somit nach oben begrenzt. Komplementär dazu schränkt  $N(\tilde{A})$  die Wahrscheinlichkeit nach unten ein. Dies ist ebenfalls formal über die Additivität nachweisbar. So addieren sich die Wahrscheinlichkeiten der Dichte  $p(x, y)$  über dem Raum  $R$  zwingend zu eins auf. Die unscharfen Maße entsprechen dieser Bedingung jedoch nicht (vgl. Formel 4.36).

<sup>39</sup> Kolmogorow-Axiome besagen, dass ein Wahrscheinlichkeitsmaß  $P$  für die Ereignisse  $A, B \in P(\Omega)$  zwingend positiv ( $P(A) > 0$ ), normiert ( $P(\Omega) = 1$ ) und additiv ( $A \cap B = \emptyset \rightarrow P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ ) sein muss (vgl. [Biewer, 1997]).

$$\iint_R p(x, y) dx dy = 1, \iint_R \pi(x, y) dx dy \geq 1, N_R = 0 \quad 4.36$$

$$Cert(\tilde{A}) = \min(N(\tilde{A}), \Pi(\tilde{A})) \quad 4.37$$

Um die Aussage dieses Intervalls zu bündeln, schlagen [Yager, 1986] sowie [Klir, 1999] ein Sicherheitsmaß  $Cert(\tilde{A})$  vor, welches nach Formel 4.37 definiert ist. Zu beachten ist allerdings, dass es sich dabei um ein grundsätzlich pessimistisches Bewertungsmaß handelt.

## 5 Entwickelte Bewertungsmethodik

Die ontologische Wissensmodellierung (vgl. Kapitel 3) wie auch die in Kapitel 4 eingeführte Algorithmik eröffnen die Möglichkeit, unscharf beschriebene Räume ganzheitlich mathematisch zu modellieren. Vordergründig waren dabei einerseits die statistische Fundierung und andererseits die Objektbewertung, welche einem Operateur im Weiteren eine evidenzielle Entscheidungsunterstützung bietet. Unter diesem Fokus ist ein funktionales Modell zu formulieren, welches die Basis der Verarbeitung räumlichen Wissens mit dem Ziel der Visualisierung darstellt.

### 5.1 Multikriterieller Bewertungsansatz

#### *Verfahrenswahl*

Zielstellung der Verarbeitung ist eine Bewertung der räumlichen Einzelobjekte bezüglich einer verbalen Beschreibung, im weiteren *Faktum* genannt. Hinsichtlich einer der Zielstellung entsprechend Eignung wurden verschiedene probabilistische wie auch possibilistische Verfahren geprüft. Die Possibilitätstheorie begründete schon Zadeh einleitend mit der These, dass *die inhärente Ungenauigkeit natürlicher Sprache hauptsächlich possibilistischen und nicht probabilistischen Ursprungs sei*.<sup>40</sup> Ausgehend von dieser Argumentation könnte per se eine Eignung zur Verarbeitung linguistischer Problemstellungen angenommen werden. Es begründet sich die Nutzung eines auf der Possibilitätstheorie basierenden Bewertungsverfahrens vorliegend allerdings durch die Verarbeitung der verbalen Relationen im Sinne unscharfer Konzepte, welche entsprechend Kapitel 4 durch unscharfe Mengen approximiert werden. Eine verfahrenskonforme Bewertung dieser unscharfen Mengen hinsichtlich ihrer Unbestimmtheit, unter Erhalt der entsprechenden Aussagesemantik (vgl. Kapitel 4), ergibt sich nun einzig durch die Possibilitätstheorie. Ferner beruht diese possibilistische Bewertung, probabilistischen Verfahren gleich, auf empirisch belegten Häufigkeitsdichten, wodurch sich ein konkreter Bezug zur realen Welt ableitet.

#### *Bewertungsverfahren*

Konkret bewertet wird, inwieweit ein Objekt dem durch das Faktum aufgespannten Möglichkeitsraum entspricht. Dabei werden jedoch nicht einzig räumliche Aspekte berücksichtigt, sondern alle entscheidungsbeeinflussenden Parameter. Dies sind domänenbedingt die zwischen *Passant* und *Experte* zu unterscheidende Person des Verfassers, die Erfassungsart im Sinne von *Beobachtung*, *Vermutung* oder *Aussage eines Dritten* sowie die zeitliche Gültigkeit. Ferner finden das Relatum betreffende Parameter, wie dessen physische bzw. semantische Salienz oder dessen Ausdehnung Berücksichtigung. In einem *Informationstupel* wird diese Information der weiteren Verarbeitung gebündelt zur Verfügung gestellt.

Der Bewertungsansatz ist ein so genannter *brute-force Ansatz*<sup>41</sup> da alle, dem Objektraum zugehörigen Objekte bezüglich aller, dem Bezugsraum zugeordneten Objekte bewertet werden. So definiert sich der Objektraum über die Menge der Objekte die potentiell betroffen sein können. Diese Menge wird unter Berücksichtigung von Domänenwissen vorselektiert. Der Bezugsraum hingegen umfasst die Menge der potentiellen Relata<sup>42</sup>. Diese Menge weist bei eindeutiger Formulierung des Faktums *ein* Relatum auf, bei mehrdeutiger Formulierung jedoch *einige*. Diese werden im Sinne alternativer Hypothesen prozessiert. Falsche Hypothesen sind zu verwerfen, sobald sich durch die Verarbeitung weiterer Fakten eine plausible Lösung durchsetzt. Zudem begründet eine derartige Berücksichtigung der Häufigkeit eine Stützung gegen Fehlmeldungen, was dem Ansatz größere Robustheit verleiht. Abbildung 21 und Abbildung 22 illustrieren diesen Bewertungsansatz anhand eines Beispiels. [GLL, 2009]

Abbildung 21 (links) zeigt die Ausgangslage, bestehend aus einer innerstädtischen räumlichen Szene. Initialsituation ist das Faktum *hinter der Lagerhalle brennt es*. Beginnend werden aus der Ontologie alle als *Lagerhalle* definierten Objekte selektiert, da diese als Relatum fungieren. Da es sich jedoch um eine unspezifische Referenz handelt, umfasst die Bezugsmenge in diesem kleinen Ausschnitt bereits zwei Objekte (vgl. Abbildung 21 (rechts))

<sup>40</sup> Zitat nach [Zadeh, 1978] Seite 3, übersetzt durch [Biewer, 1997].

<sup>41</sup> Sinngemäße Übersetzung: *brutaler Ansatz, der auf Berücksichtigung aller potenziellen Möglichkeiten beruht*.

<sup>42</sup> Plural von Relatum im Sinne des Bezugsobjektes.

Objekte a und b). Ausgehend von den definierten Gebäudevorderseiten wird der Möglichkeitsraum *hinter* für jedes Objekt der Menge aufgespannt (vgl. Abbildung 21 (rechts) grün). In einem nächsten Schritt wird dies analog für ein zweites Faktum, *rechts neben der Kapelle*, durchgeführt (vgl. Abbildung 22 (links)). Basierend auf den sich überschneidenden Möglichkeitsräumen ist die Bewertung der darin befindlichen Objekte ableitbar und wird farbig dargestellt. Durch das zweite Faktum kann die Hypothese für Objekt *a* als Relatum gestützt und somit die Hypothese für Objekt *b*, einer Fehlmeldung gleich, verworfen werden.

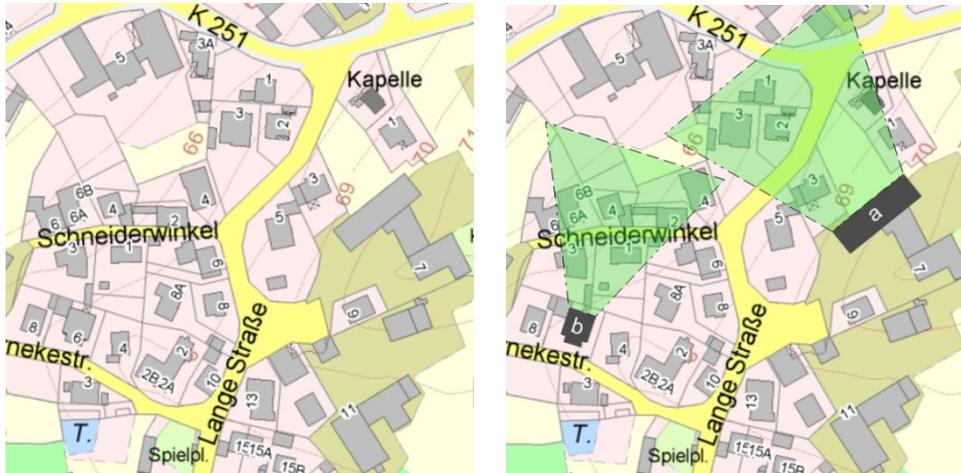


Abbildung 21: innerstädtische räumliche Ausgangsszene<sup>43</sup> (links); schematische Darstellung der Möglichkeitsräume (grün) basierend auf einem mehrdeutigen Faktum (dunkelgrau: Relata; rechts)

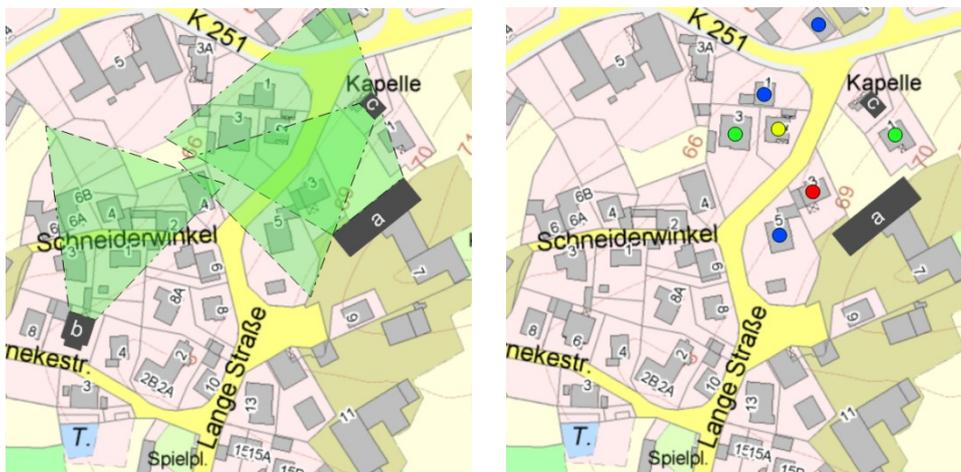


Abbildung 22: Bewertung nach Betrachtung eines zweiten Faktums (links); resultierende Objektbewertung (hohe Bewertung: rot, mittlere Bewertung: gelb und grün, niedrige Bewertung: blau; rechts)

## 5.2 Funktionales Modell

Um die in Abschnitt 5.1 ausgeführte Bewertung automatisch durchführen zu können ist es notwendig, die Abhängigkeiten aller Einflussparameter funktional zu definieren. Dies erfolgt durch die Formulierung eines funktionalen Modells, welches die Bewertung eines räumlichen Objektes  $O_j$  bezüglich der Relevanz für ein gemeldetes Faktum  $\vartheta_i$  beschreibt (vgl. Formel 5.1).

Neben dem in Formel 5.1 dargestellten funktionalen Gesamtzusammenhang sind die Einzeltermine ebenfalls formal zu beschreiben, was Ziel der folgenden Abschnitte sein wird.

<sup>43</sup> Präsentationsgraphik der GLL Niedersachsen zum Download (vgl. [GLL, 2009]).

$$O_j(\vartheta_i) = f(S(\vartheta_i), M(\vartheta_i), E(\vartheta_i), T(\vartheta_i), H) \quad 5.1$$

mit:	$\vartheta_i$	textuell beschriebenes Informationstupel (Faktum)
	$f$	Funktion zur Beschreibung der Abhängigkeit der einzelnen Terme
	$S(\vartheta_i)$	räumliche Unschärfe des Faktums
	$M(\vartheta_i)$	Vagheit eines Faktums basierend auf dem Verfasser
	$E(\vartheta_i)$	Vagheit eines Faktums basierend auf der Erfassungsart
	$T(\vartheta_i)$	temporale Gültigkeit des Faktums
	$H(\vartheta_i)$	Ungewissheit eines Faktums gestützt durch die Häufigkeit

## 5.3 Funktionale Beschreibung räumlicher Unschärfe

Eine Analyse des vorliegenden Meldungskorpus zeigte, dass die räumliche Unschärfe differenziert zu betrachten ist. Diese kann etwa aus einem mangelnden räumlichen Verständnis der Person des Verfassenden resultieren. Dabei weicht das mentale Modell des Verfassenden von der Realität ab bzw. repräsentiert diese unvollständig. So äußert sich mangelndes räumliches Verständnis konkret in der Wahl ungünstiger Relata, wie auch in falscher räumlicher Referenzierung. Ferner resultiert die räumliche Unschärfe aus den zur Beschreibung genutzten Termini. Diese Termini unterteilen sich in qualitative Distanzrelationen (*nahe dem...*), in quantitative Distanzrelationen (*100 Meter entfernt von...*) sowie in qualitative Richtungsrelationen, welche sowohl absolut (*westlich von...*) als auch relativ (*rechts von...*) ausgeprägt sein können. Um unter Nutzung dieser Relationen referenzieren zu können ist es notwendig, diese zu Aussagen wie *100 Meter westlich von...* zu verknüpfen. Eine weitere Möglichkeit zur Referenzierung besteht in der Nutzung von räumlichen Objektrelationen (*zwischen...*).

Die resultierende räumliche Unschärfe lässt sich entsprechend ihrer Ausprägung in vier Abstraktionslevel unterteilen (vgl. [Lucas et al., 2008]):

- *Level 1:* Bei räumlichen Referenzen dieses Levels ist keine weitere Information zur Auswertung notwendig. Eine derartige Referenzierung ist demnach durch die Angabe konkreter Koordinaten gegeben. Bezogen auf die hinreichend bekannte räumliche Beispielszene des Baumes und des Hauses hieße die resultierende räumliche Relation *der Baum befindet sich 49°0'44,8" Nord und 8°24'33,9" Ost*.
- *Level 2:* Zur Auflösung von Referenzen des Level 2 ist die Berücksichtigung von Objektinformation notwendig. So ist die räumliche Auflösung der Beispielaussage *der Baum befindet sich 7,3 Meter westlich des Hauses* ohne Information bezüglich der Lage des Hauses unmöglich.
- *Level 3:* Referenzen dieses Levels sind einzig unter Nutzung von Objekt- und Attributinformation auflösbar. Die Beispielaussage *der Baum steht vor dem Haus* referenziert neben der Lage ebenfalls auf dessen Orientierung. Zudem fehlt es dieser Raumrelation an Eindeutigkeit im Sinne von quantitativen Entfernungs- und Richtungsspezifikationen.
- *Level 4:* Räumliche Referenzen des Level 4 sind unspezifisch und folglich nicht auflösbar. Gegeben ist dies bei der Nutzung von unbestimmten Adverbien, wie die Beispielaussage *der Baum steht irgendwo* verdeutlicht.

Im Weiteren steht die Bearbeitung der Abstraktionslevel 2 und 3 im Vordergrund. Um derartige räumliche Relationen automatisiert verarbeiten zu können ist eine funktionale Repräsentation dieser Abstraktionslevel notwendig. Dabei ist jedoch neben dem Skalenbereich auf den abzubilden ist (vgl. Kapitel 2.4.1, Seite 19), ebenfalls die innerstädtische Lage zu berücksichtigen.

### 5.3.1 Erhebung zur raumkognitiven Wahrnehmung

Die Erhebung zur raumkognitiven Wahrnehmung von Passanten ist bezogen auf den Gültigkeitsbereich genutzter räumlicher Relationen. Entsprechend haben Passanten, ihnen bekannte räumliche innerstädtische Szenen auf dem Campusgelände Süd des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)<sup>44</sup> unter Nutzung von Strecken- und Richtungsrelationen beschrieben. Dabei war die Orientierung des Relatum zum intendierten Objekt gegen Nord in

<sup>44</sup> Ehemals Universität Karlsruhe (TH).

frei wählbaren Kardinalrichtungen zu beschreiben. Ferner waren die Entfernung zwischen den Objekten in Metern zu schätzen, sowie den Klassen *nah*, *mittel* und *fern* zuzuordnen. Diese drei qualitativen Distanzklassen ergaben sich aus einer Analyse des Meldungskorpus, welche zeigt, dass alle genutzten Distanzrelationen bedeutungserhaltend unter diesen Distanzkonzepten subsumiert werden können.

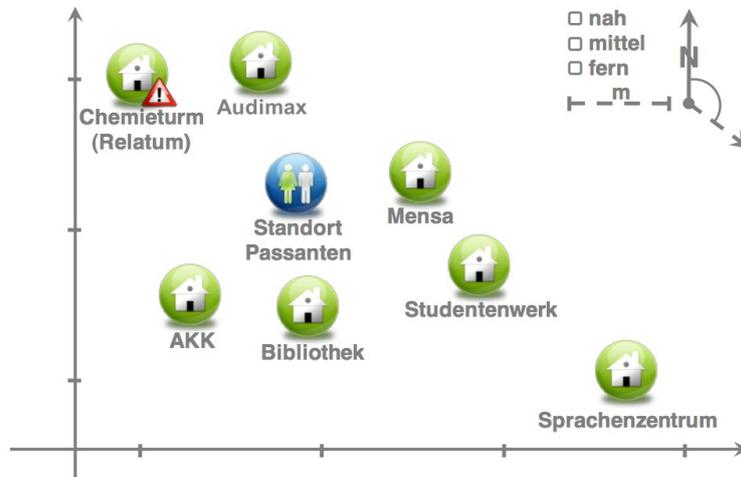


Abbildung 23: Szene des Campus Süd des KIT zur Erhebung der raumkognitiven Wahrnehmung (im relativen Koordinatensystem); zugunsten der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Bahnstation Durlacher Tor (Bestandteil der Szene) verzichtet

Um eine räumliche Abhängigkeit auszuschließen, wurde eine Erhebung für drei räumliche Szenen durchgeführt. Abbildung 23 stellt eine solche räumliche Szene in einem auf das Relatum bezogenen relativen Koordinatensystem graphisch dar. Die intendierten Objekte waren zwischen 60 und 560 Metern vom Relatum entfernt und bis auf wenige Objekte alle vom Standpunkt der Erhebung aus sichtbar. Zudem wurden alle 25 Objekte vor Beginn der Erhebung genannt, um dem 83 Befragten eine Orientierung im Skalenbereich zu ermöglichen. Dem entsprechend standen der Auswertung 812 Distanzschätzungen (absolut) 390 Entfernungsschätzungen (relativ) sowie 417 Richtungsschätzungen (absolut) zur Verfügung. Zusätzlich wurden 70 Strecken- und Richtungsschätzungen der in Abbildung 23 dargestellten Szene für eine spätere Verifikation des Verfahrens erfasst (vgl. Kapitel 6).

### 5.3.2 Ableitung der Distanzrelationen

Zur Ableitung der Distanzrelationen aus den empirischen Daten bedarf es einer statistischen Vorverarbeitung, um Aussagen hinsichtlich statistischer Kenngrößen tätigen zu können. Dafür wurden beginnend die wahren Residuen der Distanzschätzungen bezüglich systematischer Auffälligkeiten analysiert. Auf diese Weise konnte der Häufigkeitsdichte eine negative Schiefe durch das dritte statistische Moment nachgewiesen werden (vgl. Formel 5.2,  $g_{\text{Schiefe}} = -0,2903$ ). Abbildung 24 (links) zeigt diese Linksschiefe explizit an der Vertreterhäufigkeit in der Klasse [-75,-25] im Häufigkeitshistogramm der Residuen. Dies ist als Indiz einer Systematik anzunehmen.

$$g_{\text{Schiefe}} = \frac{\frac{1}{n \cdot m} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \varepsilon_{k,i}^3}{\sqrt{\left(\frac{1}{n \cdot m} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \varepsilon_{k,i}^2\right)^3}} \text{ mit } i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad 5.2$$

mit:  $\varepsilon_{k,i}$  wahre Residuen:  $\varepsilon_{k,i} = (x_{k,i} - \tilde{x}_k)$   
 $\tilde{x}_k$  „wahrer“ Wert<sup>45</sup>

<sup>45</sup> Bei dem „wahren“ Wert handelt es sich um eine Festlegung des Sollwertes, dessen Erfassungsungenauigkeit vernachlässigt werden kann. Im Sinne der [GUM, 1995] handelt es sich um den *richtigen Wert*.

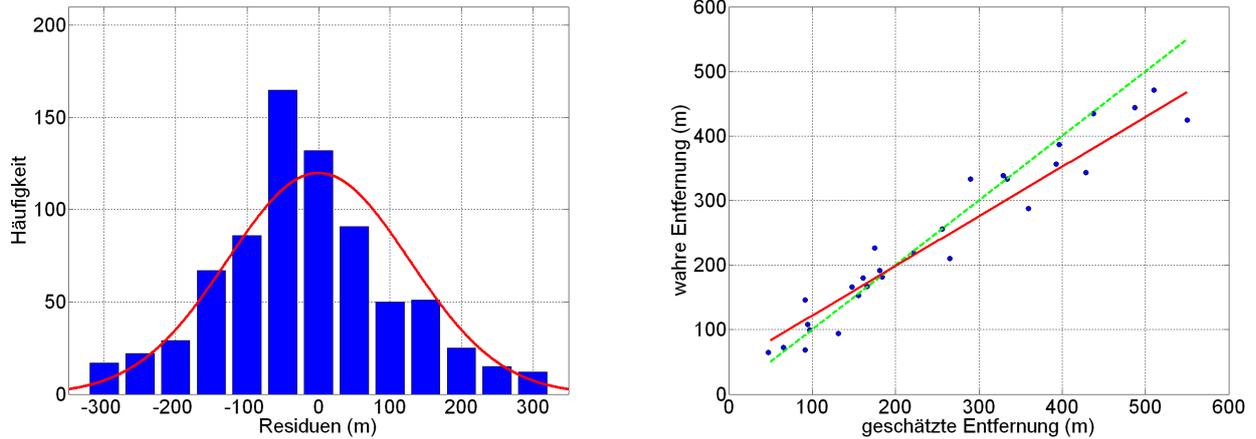


Abbildung 24: Häufigkeitsdichte der Residuen in Klassen zu 50 Meter Breite (blau) und die Dichtefunktion der Normalverteilung (rot; links); gemittelte Residuen unter Bezug zur geschätzten und wahren Entfernung (blau) mit Regressionspolynom ersten Grades (rot) und Schätzungshypothese (grün; rechts)

Von dieser Annahme ausgehend konnte, anhand der gemittelten Residuen jedes wahren Wertes, ein signifikanter und systematischer Schätzfehler nachgewiesen werden. So zeigt Abbildung 24 (rechts) die gemittelten Residuen (blau) unter Bezug zur geschätzten und wahren Entfernung. Diese wurden durch Minimierung des quadratischen Fehlers auf ein Polynom ersten Grades approximiert (rot,  $\kappa$ ). Über das Widerlegen der Hypothese  $H_0: p_1 = 1, p_2 = 0$  (grün gestrichelt) konnte mittels eines Studentschen Hypothesentestes ( $t_{n-1, \alpha}$ ) zum Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  nachgewiesen werden, dass Schätzungen bis etwa 190 Meter signifikant zu kurz und Schätzungen über 190 Meter signifikant zu lang sind. Entsprechend repräsentiert die Regressionsgerade  $\kappa$  in Formel 5.3 eine Verbesserungsfunktion, welche zur Korrektur des systematischen Schätzfehlers anzubringen ist (im Weiteren *Schätzkorrektur*).

$$\kappa = p_2 \cdot x + p_1 \quad 5.3$$

mit:  $p_1 = 44,6168$   
 $p_2 = 0,7692$

Eine um diese Systematik bereinigte Dichte der Zuordnungshäufigkeit steht entsprechend der weiteren Verarbeitung zur Verfügung (vgl. Abbildung 25, links). Um diese verteilungstheoretisch bewerten zu können, sind die „wahren“ Residuen bezüglich der verschiedenen Schätzung zu normieren. Diese Normierung erfolgte durch die empirische Standardabweichung  $s$  entsprechend Formel 5.4 (vgl. [Hartung et al., 2005], Abbildung 25 (rechts)).

$$d_i = \frac{\varepsilon_i}{s}, \text{ mit } i = 1, \dots, n \quad 5.4$$

Zur Ermittlung weiterer Kenngrößen wurde nach der zugrunde liegenden Verteilungsfunktion gesucht. Da es sich um Schätzungen wahrer Distanzen handelt, war als Hypothese  $H_0$  anzunehmen, dass die Grundgesamtheit der normierten Residuen  $N(\mu_0, \sigma_0^2)$ -verteilt ist (entsprechend Formel 5.5). Ausgehend von der Höhe des Stichprobenumfangs und dem approximativen Ansatz wurde dies mittels eines  $\chi^2$ -Anpassungstestes ( $\chi_{n-1, 1-\alpha}^2$ ) über die Testgröße entsprechend Formel 5.6 gegen die Alternativhypothese  $H_1^{46}$  getestet (vgl. [Hartung et al., 2005]).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad 5.5$$

<sup>46</sup> Alternativhypothese  $H_1$  besagt, dass die Grundgesamtheit nicht  $N(\mu_0, \sigma_0^2)$ -verteilt ist.

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} (O_i - E_i)^2 \text{ mit } i = 1, \dots, n \quad 5.6$$

mit:  $O_i$  Vertreterhäufigkeit  
 $E_i$  erwartete Häufigkeit

Zu einem Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  war die Hypothese der Normalverteilung jedoch zu verwerfen. Die Begründung dafür wird in einem ungenügend großen Stichprobenumfang gesehen, da in Analogie zum zentralen Grenzwertsatz davon auszugehen ist, dass die Verteilung bei einem hinreichend großen Stichprobenumfang gegen die Normalverteilung konvergiert (vgl. [Hartung et al., 2005]). Gestützt wird die Annahme der Normalverteilungshypothese ferner durch einen positiven  $\chi^2$ -Anpassungstest bei einem Senken der Irrtumswahrscheinlichkeit auf ein Niveau von einem Prozent ( $\chi^2_{n-1,0.99}$ ).

Die Modellannahme der Normalverteilung ermöglicht in einem nächsten Schritt die Lokalisierung von Ausreißern. Dabei wurden beginnend grobe Ausreißer auf Basis der absoluten Größe der normierten Residuen eliminiert. So ist eine Beobachtung als Ausreißer anzunehmen, sowie  $|d_i| > 3$  gilt (vgl. [Hartung et al., 2005]). Verteilungsbasiert wurde in einem zweiten Schritt der Ausreißertest nach Grubbs durchgeführt. Dieser testet jede Beobachtung über eine Testgröße  $T_i$  (vgl. Formel 5.7) gegen eine Ausreißerannahme als Alternativhypothese. Resultierend konnten 49 Ausreißer eliminiert werden, wodurch der Auswertung im Weiteren 763 Distanzschätzungen zur Verfügung standen.

$$T_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s} \text{ mit } i = 1, \dots, n \quad 5.7$$

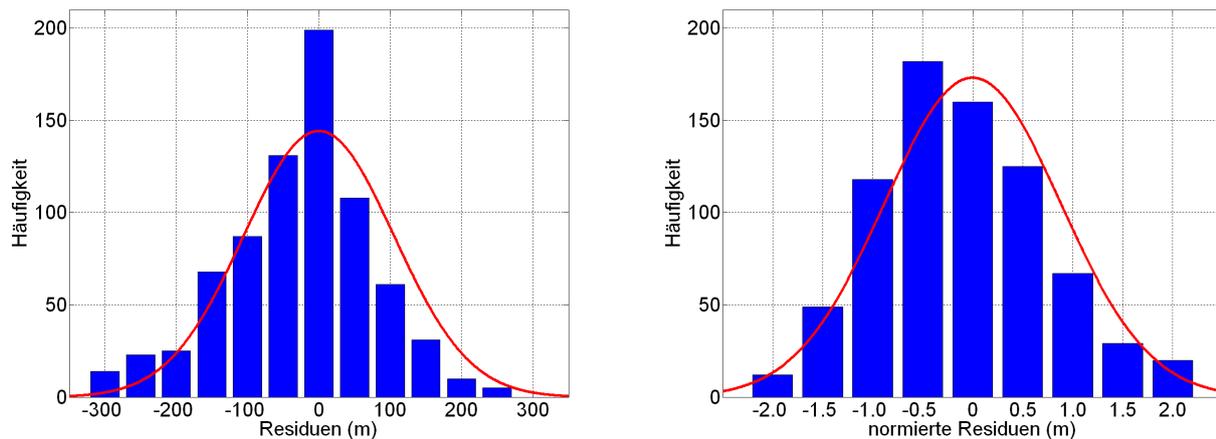


Abbildung 25: Histogramm der residualen Klassenhäufigkeit (blau) nach Eliminierung des Schätzfehlers sowie  $N(\mu_0, \sigma_0^2)$ -Dichte (rot; links); Häufigkeitsdichte der normierten Residuen (blau) mit  $N(\mu_0, \sigma_0^2)$ -Dichte (rot; rechts)

### Quantitative Distanzrelationen

Eine verbal repräsentierte quantitative Distanzrelation stellt ein unscharfes räumliches Konzept dar. Diesem unscharfen Konzept entsprechen konkrete Objekte, welche folglich eine unscharfe Menge definieren (vgl. Kapitel 4.1). Um die quantitative Distanzrelation funktional abzubilden ist die Zugehörigkeitsfunktion zu dieser unscharfen Menge zu formulieren. Basis der Ableitung eines solchen funktionalen Zusammenhanges bildeten die erhobenen Distanzschätzungen, deren Standardabweichung die Unschärfe repräsentiert. Die distanzabhängigen Standardabweichungen wurden durch ein Polynom ersten Grades approximiert (vgl. Formel 5.8). Dieses Polynom ließ sich durch Regression über die mittlere Standardabweichung der in Entfernungsklassen eingeteilten Distanzschätzungen bestimmen (vgl. Abbildung 26).

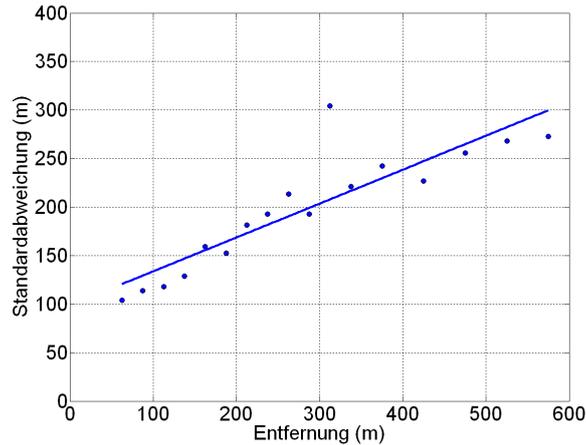


Abbildung 26: mittlere Standardabweichung (m) der geschätzten Entfernungen des Skalenbereichs in Klassen von 25 Meter (Punkte) und deren Regressionsgerade (Linie)

$$u = p_2 \cdot x + p_1 \quad 5.8$$

mit:  $p_1 = 98,7005$   
 $p_2 = 0,3495$

Ausgehend von der zugrundeliegenden Normalverteilung der Erhebung basiert die abzuleitende Zugehörigkeitsfunktion auf einer gaußschen Exponentialfunktion, deren Parameter jedoch entsprechend der Schätzkorrektur und Unschärfe anzupassen waren (vgl. Formel 5.9).

$$\mu_{\text{distanz}} = e^{\left(-\left(\frac{(w \cdot d) - h}{c}\right)^2\right)} \quad 5.9$$

mit:  $w$  Parameter zum Einbringen der Unschärfe (Formel 5.10)  
 $d$  wahre Distanz vom Relatum zum intendierten Objekt  
 $h$  Parameter zum Einbringen der Schätzkorrektur (Formel 5.10)  
 $c$  Kurvenparameter ( $c = 15$ )

Approximiert wurden diese Parameter mittels Regression über den Einfluss auf den Funktionsverlauf. Da deren Effekte jedoch nicht linear darstellbar waren, erfolgte die Anpassung jeweils auf eine sogenannte quartische Funktion, ein Polynom vierten Grades (vgl. Formeln 5.10).

$$f(r) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot r^{(n+1-i)} \quad 5.10$$

mit:  $r$  quantitative Distanzrelation

Parameter des Terms  $w$

$p_1 = 0,05644291620078$   
 $p_2 = -0,00014754881530$   
 $p_3 = 0,00000024032082$   
 $p_4 = -0,00000000020465$   
 $p_5 = 0,00000000000006$

Parameter des Terms  $h$

$p_1 = 3,16275492500457$   
 $p_2 = 0,02580656482419$   
 $p_3 = -0,00004264321422$   
 $p_4 = 0,00000003680605$   
 $p_5 = -0,00000000001247$

Resultat ist eine Funktion, die stetig über den Skalenbereich die Bewertung eines konkreten Objektes bezüglich der Zugehörigkeit zum jeweiligen unscharfen Konzept erlaubt. Abgebildet wird diese Bewertung in das Intervall der positiven reellen Zahlen zwischen 0 und 1. Bewertungsgrundlage ist dabei die wahre Distanz zwischen Relatum und intendiertem Objekt. Die Unschärfe wird durch die Wölbung der Funktion um die mittlere Stan-

ardabweichung auf einer Bewertungshöhe von 0.1 repräsentiert. Die Schätzkorrektur erfolgt durch Verschieben des Scheitelpunktes um den jeweiligen Korrekturbetrag. Abbildung 27 illustriert dies beispielhaft.

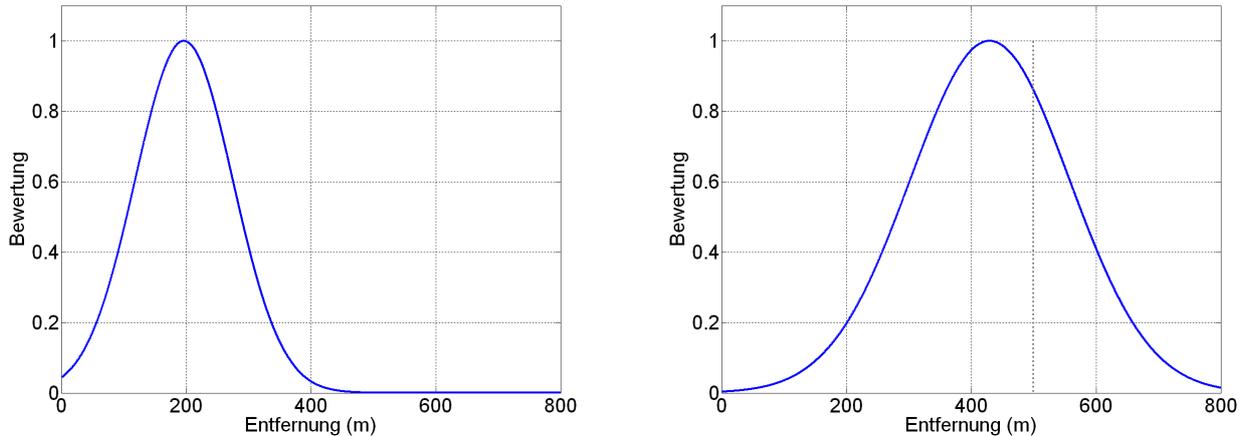


Abbildung 27: Zugehörigkeitsfunktion der quantitativen Distanzrelation 200 Meter (links) und 500 Meter (rechts)

### Qualitative Distanzrelationen

Gleich den quantitativen Distanzrelationen stellen auch die qualitativen Distanzrelationen unscharfe räumliche Konzepte dar, welche durch unscharfe Mengen abbildbar sind. Eine formale Darstellung dieser Konzepte erfolgt dabei ebenfalls über die jeweiligen Zugehörigkeitsfunktionen. Grundlage der Ableitung bilden die erhobenen kategorialen Distanzschätzungen in die Klassen *nah*, *mittel* und *fern*. Das Unschärfemaß hierbei ist die Streuung der jeweiligen Klasse. So zeigt Abbildung 28 (links) die normierten Häufigkeiten der Nutzung der Relation *nah* unter Bezug zur wahren Entfernung des intendierten Objektes zum Relatum. Erwartungsgemäß nimmt dabei die Nutzung der Relation mit zunehmender Entfernung ab. So wird ein Objekt in einer Entfernung von 72 Metern von 30 Befragten als *nah* bezeichnet, ein Objekt in einer Entfernung von 234 Metern jedoch nur von acht Befragten. Ausgehend von dieser Verteilung wurde eine Approximation über eine Minimierung des quadratischen Fehlers auf die gaußsche Exponentialfunktion gerechnet (vgl. Abbildung 28 (rechts), Formel 5.11). Die Wahl der Gaußfunktion zur Approximation basiert auf der Korrelation qualitativer und quantitativer Entfernungsbeobachtungen, was eine Übertragung der Normalverteilungsannahme rechtfertigt.

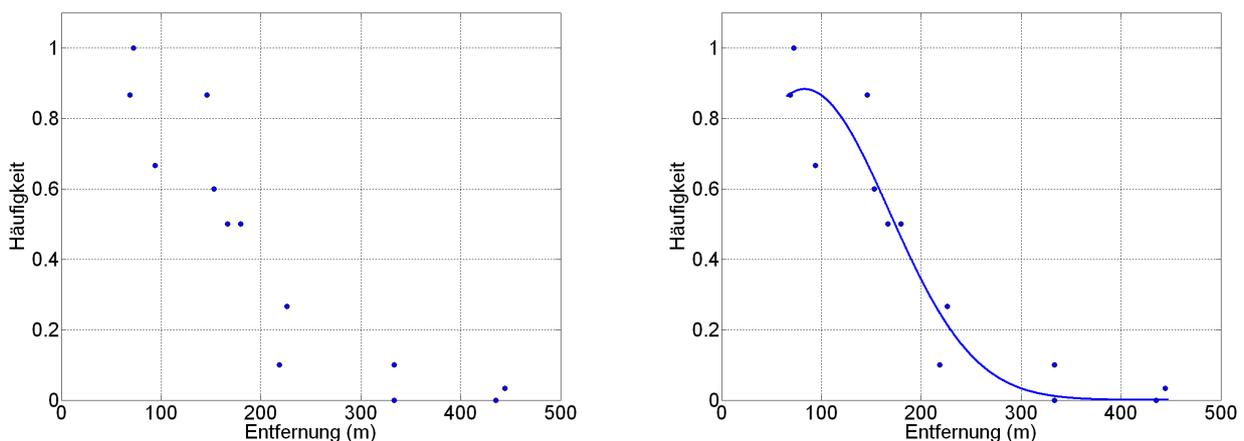


Abbildung 28: normierte Häufigkeit der Nutzung der Relation *nah* in Abhängigkeit zur wahren Objektentfernung (links); Approximation der Verteilung durch eine gaußsche Exponentialfunktion (rechts)

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot e^{-\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)^2} \quad 5.11$$

mit:	$a_{nah} = 0,8831$	$a_{mittel} = 0,7111$	$a_{fern} = 0,8595$
	$b_{nah} = 83,4185$	$b_{mittel} = 259,0971$	$b_{fern} = 454,6915$
	$c_{nah} = 119,8937$	$c_{mittel} = 128,0324$	$c_{fern} = 163,1757$

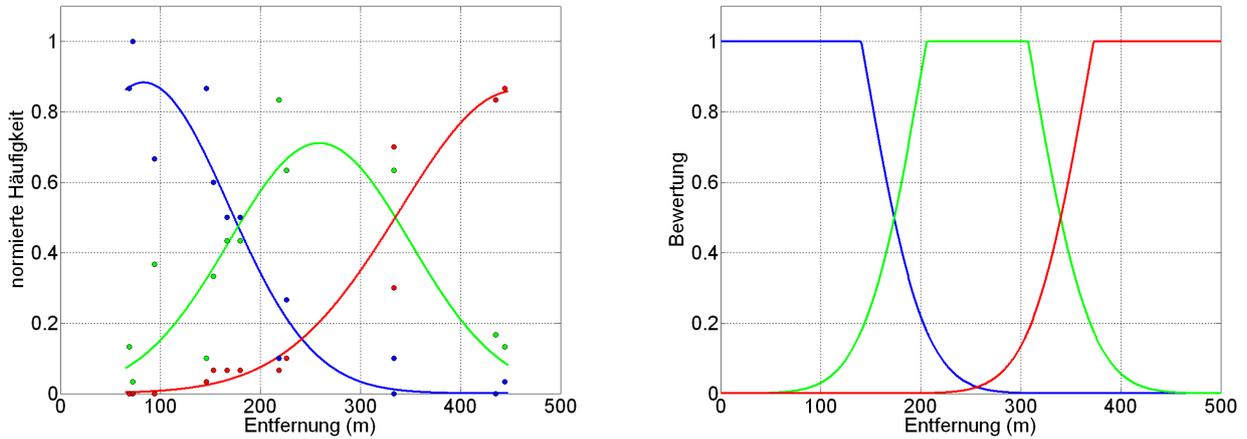


Abbildung 29: Approximation der Verteilung durch eine gaußsche Exponentialfunktion (blau: nah, grün: mittel, rot: fern; links); abgeleitete Zugehörigkeitsfunktionen (blau: nah, grün: mittel, rot: fern; rechts)

Analog wurden die Approximationen der normierten Häufigkeit der Relationen *mittel* und *fern* bestimmt, was Abbildung 29 (links) darstellt. Ausgehend von dem funktionalen Verlauf aller approximierten Distanzklassen konnten die konkreten Zugehörigkeitsfunktionen der Relationen abgeleitet werden. Angehalten wurden dabei die Schnittpunkte der Regressionsfunktionen, da diese die jeweiligen Konzeptwechsel auf einer Bewertungshöhe von 0,5 definieren. Zudem basieren die Zugehörigkeitsfunktionen auf der exponentiellen Darstellungsweise der Approximationen. Diese war jedoch verfahrenstypisch um einen Kern zu ergänzen und entsprechend im Anstieg zu modellieren (Abbildung 29 (rechts)), was funktional realisiert wurde. Ergebnis dieser Modellierweise sind stetige Bewertungsfunktionen, welche für jedes unscharfe Entfernungskonzept eine auf der wahren Distanz zwischen Relatum und intendiertem Objekt beruhende Objektbewertung, hinsichtlich eines Entfernungskonzeptes, gestattet. Dargestellt sind diese in Formeln 5.12 bis 5.14.

$$\mu_{nah} = \min \left( 1, \max \left( \left( \frac{-d}{100} \right) + 2, \frac{3}{2} \cdot e^{\left( \frac{-\left(\frac{d}{30}-3\right)^2}{\varepsilon} \right)} \right) \right) \quad 5.12$$

$$\mu_{mittel} = \min \left( 1, \frac{3}{2} \cdot e^{\left( \frac{-\left(\frac{d}{30}-8,553\right)^2}{\varepsilon} \right)} \right) \quad 5.13$$

$$\mu_{fern} = \min \left( 1, \max \left( \left( \frac{d}{150} \right) - 2, \frac{3}{2} \cdot e^{\left( \frac{-\left(\frac{d}{30}-14,106\right)^2}{\varepsilon} \right)} \right) \right) \quad 5.14$$

mit:  $d$  Distanz zwischen intendiertem Objekt und Relatum

$\varepsilon$  Kostenterm zur Berücksichtigung der Salienz (vgl. Kapitel 5.3.4)

### 5.3.3 Ableitung der Richtungsrelationen

Zur Formalisierung der Richtungsrelationen bedarf es beginnend einer statistischen Auswertung der erhobenen Daten, deren Grundlage die wahren Residuen der Richtungsschätzung bilden. Dieser residuale Schätzfehler bestimmt sich vorliegend jedoch nicht über den schlichten Abzug des wahren Wertes vom Schätzwert, sondern entsprechend Formel 5.15 fallunterscheidend. Grund dafür ist der von null bis  $2\pi$  definierte Wertebereich, in dem Winkeldifferenzen größer  $\pi$  über einen Vorzeichenwechsel des Komplements dargestellt werden.

$$\varepsilon_i^\varphi = \begin{cases} x_i - \tilde{x} & , \text{wenn } x_i - \tilde{x} < \pi \mid \varphi \in (0, 2\pi) \\ -(2\pi - (x_i - \tilde{x})) & , \text{wenn } x_i - \tilde{x} > \pi \mid \varphi \in (0, 2\pi) \end{cases} \quad 5.15$$

Berücksichtigung fanden zudem die diskreten Klassen, in die geschätzt wurde. So stand dem Beobachter bei der Erhebung frei, in ein Richtungssystem des Level<sub>2</sub>, Level<sub>3</sub> oder Level<sub>4</sub> zu schätzen (vgl. Kapitel 2.4.2, Seite 23)<sup>47</sup>. Die Erwartung war, charakteristische Aussagen hinsichtlich der level-spezifischen Unschärfe ableiten zu können. Dafür wurden die Residuen jedes Levels einzeln betrachtet und durch eine gaußsche Exponentialfunktion approximiert (vgl. Abbildung 30 (rechts)). Die Überlagerung dieser zeigte jedoch, dass keine Level-Spezifika festzustellen sind, folglich alle Schätzungen ins gleiche Richtungssystem, Level<sub>4</sub>, erfolgten. Gestützt wird diese Aussage durch die empirische Varianz und den Exzess (vgl. Formel 5.16) als verteilungsfreie Kenngröße der Dispersion, welche Tabelle 8 darstellt. Dem entsprechend ist im Rahmen der weiteren Auswertung nicht zwischen den verschiedenen Levels zu unterscheiden.

$$g_{\text{Exzess}} = \frac{\frac{1}{n \cdot m} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_k)^4}{\left( \frac{1}{n \cdot m} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_k)^2 \right)^2} - 3 \text{ mit } i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad 5.16$$

Dispersionsmaße	Level <sub>2</sub>	Level <sub>3</sub>	Level <sub>4</sub>
$s^2$	0,1746	0,1809	0,1182
$g_{\text{Exzess}}$	4,8926	4,1066	4,4412

Tabelle 8: empirische Varianz und Exzess als Dispersionsmaße der Häufigkeitsverteilung

Um verteilungstheoretische Aussagen und darauf aufbauende Kenngrößen ableiten zu können, wurden die Residuen durch ihre Standardabweichung normiert (vgl. Formel 5.4) und hinsichtlich der Normalverteilungshypothese getestet. Diese lag nahe, da es sich um Schätzungen wahrer Richtungen handelt, welche bei hinreichendem Umfang der Grundgesamtheit gegen eine  $N(\mu_0, \sigma_0^2)$ -Verteilung konvergieren sollten. Getestet wurde über die Testgröße  $T$  (vgl. Formel 5.6) mittels eines  $\chi^2$ -Anpassungstestes gegen eine Alternativhypothese (keine Normalverteilung) zu einem Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  (vgl. Abbildung 30 (rechts)). Die Testhypothese war jedoch zu verwerfen, was durch den ungenügend großen Stichprobenumfang zu begründen ist. Unter Bezug zum zentralen Grenzwertsatz wurde an der Modellannahme der Normalverteilung festgehalten, was im Weiteren die funktionale Repräsentation vereinfacht.

$$\mu_{\text{Richtung}} = \left( \frac{\cos \varphi + 1}{2} \right)^6 \mid \varphi \in (0, 2\pi) \quad 5.17$$

<sup>47</sup> Die Richtungsgruppierung in Level<sub>2-4</sub>-Systeme ist hier im Sinne der Informationstiefe zu verstehen.

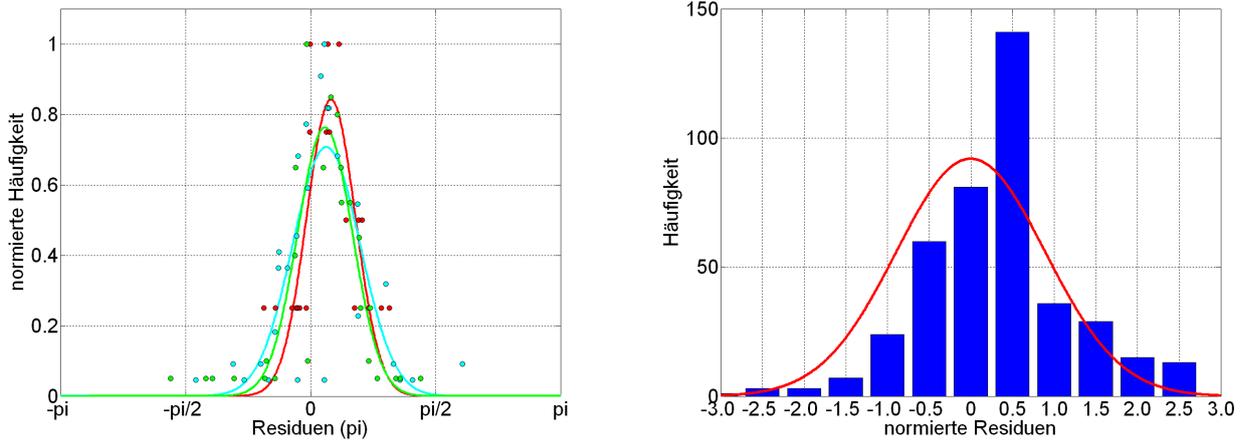


Abbildung 30: Überlagerung der approximierten Residuen des Level<sub>2</sub> (cyan), Level<sub>3</sub> (grün) und Level<sub>4</sub> (rot; links); Häufigkeitsdichte der Richtungsschätzungen mit  $N(\mu_0, \sigma^2)$ -Dichte (rot; rechts)

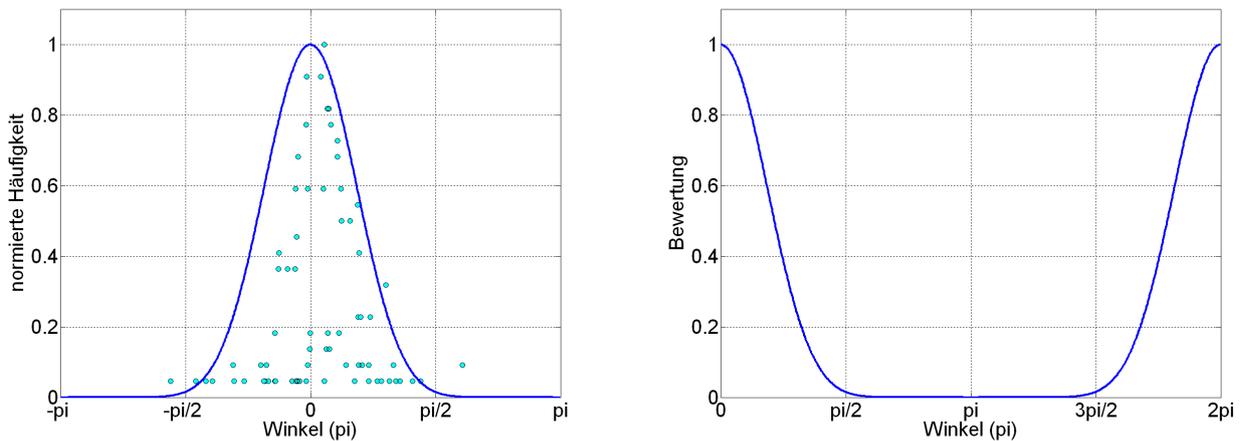


Abbildung 31: normierte Häufigkeit der Residuen (Level<sub>2</sub>: cyan, Level<sub>3</sub>: grün, Level<sub>4</sub>: rot) und einschließende Bewertungsfunktion (blau; links); Bewertungsfunktion für Richtungsschätzungen im Wertebereich von null bis zwei  $\pi$  (rechts)

Die Richtungsrelationen sind im Sinne unscharfer Konzepte zu verstehen und entsprechend durch unscharfe Mengen darzustellen. Definiert werden diese über Zugehörigkeitsfunktionen. Als Unschärfemaß fungiert dabei die Dispersion der Schätzungen, welche auf Basis der Erhebung abgeleitet werden konnte. Durch die positive Schiefe ( $g_{\text{Schiefe}} = 0,8026$ ) der Häufigkeitsdichte wurde die Zugehörigkeitsfunktion jedoch nicht direkt approximativ bestimmt. Ausgehend von der normierten Häufigkeit der Residuen wurde eine, die Dispersion einschließende, Kosinusfunktion abgeleitet (vgl. Formel 5.17, Abbildung 31 (links)), welche auf Basis der Winkeldifferenz  $\varphi$  zweier Objektvektoren eine Zugehörigkeit zum jeweiligen Richtungskonzept angibt. Diese Bewertungsfunktion stellt Abbildung 31 (rechts) für den Wertebereich von null bis zwei  $\pi$  dar.

### 5.3.4 Räumliche Relationen

#### Räumliche Relationen nulldimensionaler Objekte

Um anhand der Distanz- und Richtungsrelationen räumlich referenzieren zu können ist eine Kombination dieser zu Aussagen wie *250 Meter östlich* notwendig. Da die räumlichen Relationen im Sinne unscharfer Mengen modelliert wurden und demzufolge eine entsprechende Aussagesemantik besitzen, bestehen bei deren Verknüpfung Restriktionen gemäß Kapitel 4.1 (Bedingungen 4.8 bis 4.11). Die vorliegend genutzte allgemeine Konjunktion, im Sinne von *250 Meter  $\wedge$  östlich*, wird folglich durch die Familie der triangulären Normen repräsentiert. Diese er-

laubt diverse formale Kombinationen, welche jedoch verschiedene Eigenschaften besitzen (vgl. Formeln 4.12, 4.13 und 4.21). So wird zur Verknüpfung der Distanz- und Richtungsrelationen die parametrisierte Yager-t-Norm der Formel 4.21 genutzt, da diese durch den Parameter  $\delta = 100$  eine Regulierung der Kombinationsgewichtungen im Sinne der Zielvorstellungen ermöglicht.

Zur Formulierung possibilistischer Aussagen ist aus diesen kombinierten Zugehörigkeitsfunktionen folgend, gemäß Kapitel 4.2, eine Possibilitätsdichte der verknüpften Relationen abzuleiten. Dies erfolgt unter Berücksichtigung einer globalen Möglichkeit, welche den Wertebereich auf den definierten Skalenbereich von maximal 650 Meter einschränkt (vgl. Formel 5.18).

$$\pi_{\text{Skalenbereich}} = \min \left( 1, \max \left( \left( \frac{-d}{140} \right) + 5, \frac{3}{2} \cdot e^{\left( \frac{-(\frac{d}{30}-20)^2}{7} \right)} \right) \right) \quad 5.18$$

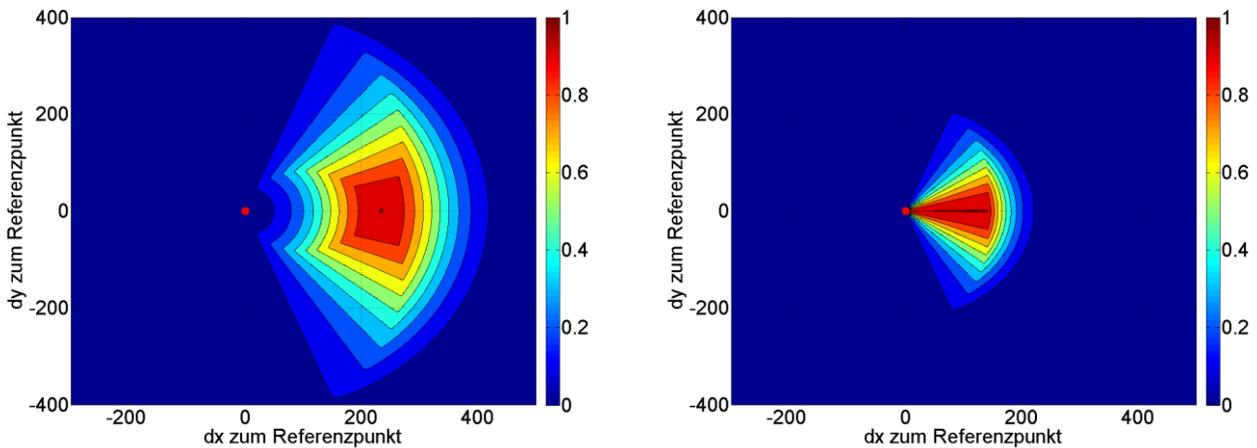


Abbildung 32: Möglichkeitsraum der kombinierten Distanz- und Richtungsrelation 250 Meter östlich (links) und nah östlich (rechts) im relativen Koordinatensystem (Relatum: roter Punkt)

Die Possibilitätsdichte ermöglicht es nun, unter Abhängigkeit der Objektlage, das Possibilitätsmaß für ein konkretes Objekt hinsichtlich der Gültigkeit einer verbalen Relation zu deduzieren. Wird dies räumlich interpretiert, so spannt die verbale Relation einen zweidimensionalen Möglichkeitsraum auf, welcher das Possibilitätsmaß in einer dritten Dimension führt.

Abbildung 32 stellt die durch die Relationen 250 Meter und östlich (links) sowie durch die Relationen nahe und östlich (rechts) aufgespannten Möglichkeitsräume, bezüglich eines nulldimensionalen Objektes dar. Die Possibilitätsmaße sind jeweils, der Skalierung entsprechend, koloriert<sup>48</sup>.

### Räumliche Relationen mehrdimensionaler Objekte

Die Kombination räumlicher Distanz- und Richtungsrelationen ist objektinvariant und erfolgt entsprechend über die parametrisierte Yager-t-Norm (vgl. Abschnitt: Räumliche Relationen nulldimensionaler Objekte). Die Objektausdehnung findet jedoch bei der Ableitung des possibilistischen Möglichkeitsraumes Berücksichtigung. So dienen nun alle, der Zielrelation zugewandten, geschlossenen Objektseiten des Relatum als Berechnungsgrundlage. Dabei wird jede geschlossene Polygonlinie durch eine hinreichend dichte Punktmenge approximiert. Ausgehend von dieser repräsentativen Punktmenge kann der gemeinsame Möglichkeitsraum über eine parametrisierte Disjunktion, Formel 4.22 ( $\delta = 500$ ), ausgehend von der Possibilitätsdichte bestimmt werden. Abbildung 33 zeigt

<sup>48</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *heatmap*.

die abweichenden Möglichkeitsräume der Relation *100 Meter östlich* anhand zweier geometrisch verschiedener, räumlicher Objekte mit Ausdehnung.

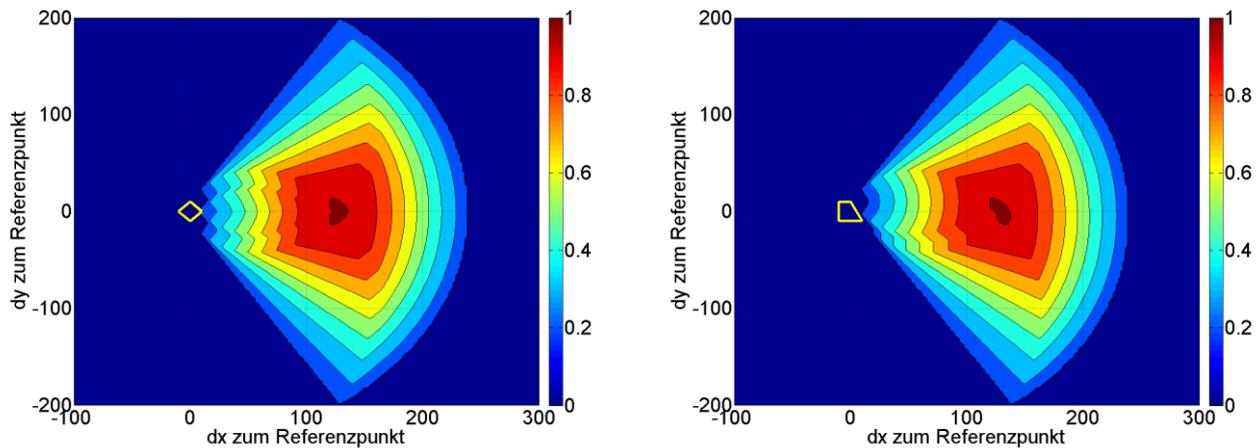


Abbildung 33: Möglichkeitsraum der Relation *100 Meter östlich* ausgehend von einem zweidimensionalen Relatum ( $20 \times 20$  Meter) im relativen Koordinatensystem (links); gleiche Szene wie links, allerdings mit einem geometrisch verschiedenen Relatum irregulärer Form im relativen Koordinatensystem (rechts)

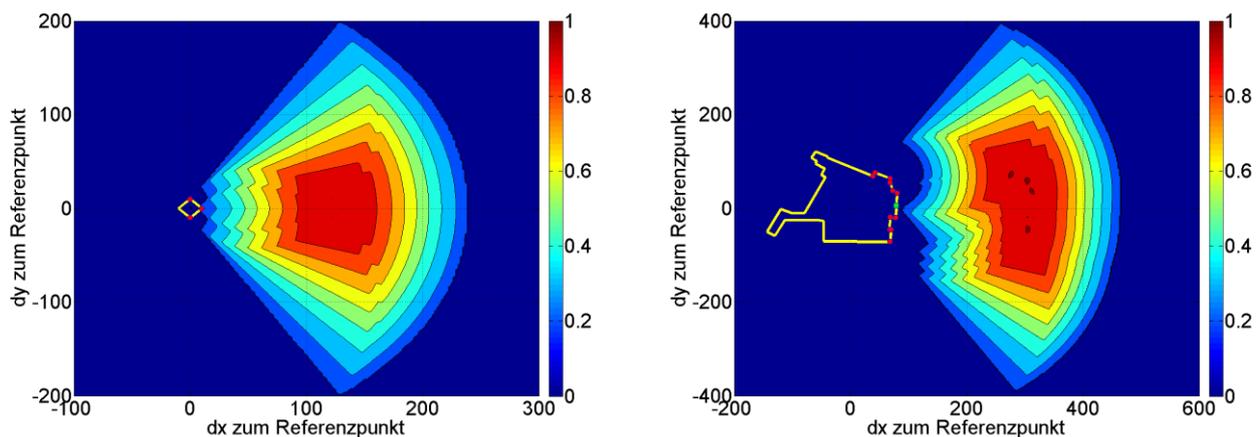


Abbildung 34: stützpunktbestimmter Möglichkeitsraum der Relation *100 Meter östlich* ausgehend von dem in Abbildung 33 (links) dargestellten Relatum im relativen Koordinatensystem (links); stützpunktbestimmter Möglichkeitsraum der Relation *250 Meter östlich* des Ettlinger Tor Center (Karlsruhe) im relativen Koordinatensystem (rechts)

Eine performantere Lösung für Objekte großer Ausdehnung ergibt sich durch Reduzierung der approximierenden Punktmenge auf die polygonalen Stützpunkte. Diese repräsentieren die Objektseiten geometrieehaltend lediglich durch Anfangs- und Endpunkt, was die Kosten der Berechnung entscheidend reduziert. Damit verbunden ist ein zu vernachlässigender Informationsverlust bei derart ermittelten Möglichkeitsräumen. Um diesen Informationsverlust vertretbar zu halten, sind bei großen Stützpunktabständen Berechnungspunkte einzufügen, so dass eine Maximaldistanz nicht überschritten wird (empfohlener Abstand: 25 Meter). Abbildung 34 (links) zeigt, im Vergleich zu Abbildung 33 (links), einen auf den gleichen Rahmenbedingungen basierenden, jedoch stützpunktbestimmten Möglichkeitsraum der Relation *100 Meter östlich*. Abbildung 34 (rechts) stellt graphisch einen auf Basis der polygonalen Stützpunkte des Ettlinger Tor Centers Karlsruhe bestimmten Möglichkeitsraum der Relation *250 Meter östlich* dar. Auf Grund der außerordentlichen Seitenlänge (größer 25 Meter) war das Einfügen eines Berechnungspunktes (grün) notwendig.

### Physische und semantische Salienz des Relatum

Neben der räumlichen Ausdehnung ist ebenfalls die Salienz des Relatum bei der Berechnung der Möglichkeitsräume zu berücksichtigen. Diese Salienz ist entsprechend [Pribbenow, 1992]<sup>49</sup> differenziert zu betrachten, da sie auf verschiedene Gründe zurückzuführen ist. So resultiert die visuelle Salienz aus der physischen Dominanz eines Objektes, die semantische Salienz hingegen begründet sich durch dessen herausragende Bedeutung<sup>50</sup>. Hintergrund ist die bevorzugte Nutzung salienter Objekte zum räumlichen Referenzieren, ungeachtet ihrer räumlichen Eignung. So ist eine qualitative Distanzrelation ähnlich einem Feld im physikalischen Sinne zu verstehen, dessen Stärke, respektive Einflussbereich, unter direkter Abhängigkeit zum Bezugsobjekt steht. Entsprechend ist diese Relation im Sinne der Metrik nicht symmetrisch (vgl. Kapitel 2.3.1, Seite 17), da nicht anzunehmen ist, dass eine gerichtete Distanzbeziehung (bspw. *nah*), ausgehend von einem dominanten zu einem diskreten<sup>51</sup> Objekt, auch invers, vom diskreten Objekt ausgehend bestünde. Invariant gegen diesen Einfluss sind indes qualitative Distanz- und Richtungsrelationen, da diesen ein absolutes Bezugssystem zugrunde liegt. [Raubal und Winter, 2002] definieren formal, anhand von Parametern wie Farbe oder Zugänglichkeit, wann ein Objekt Salienz besitzt bzw. wie stark der Einfluss dieser Parameter darauf ist (vgl. [Winter et al., 2005]). Offen lassen sie jedoch, wie sich die Salienz hinsichtlich der Referenzierung äußert (vgl. [Pribbenow, 1992], [Tenbrink, 2005]). Im Rahmen der vorliegenden Anwendung gelten, aus Ermangelung der Parameter, Objekte ab einer Grundfläche von 1000 Quadratmetern als visuell dominant. Ferner gelten funktionsbedingt Kirchen, Museen, Bibliotheken, Schulen, Hallenbäder, Türme und Rathäuser als semantisch salient. Berücksichtigung findet diese Salienz in dem Parameter  $\varepsilon$  der Gleichungen 5.12 bis 5.14, welcher unter Bezug zu diskreten Objekten  $\varepsilon_d = 7$  und zu salienten Objekten  $\varepsilon_s = 10$  beträgt. Wirkung dieses Kostenterms ist eine räumliche Dehnung der jeweiligen Distanzrelation (vgl. Abbildung 35).

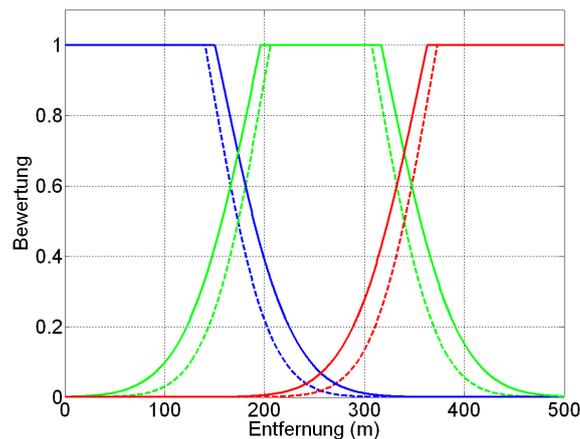


Abbildung 35: dominante quantitative Distanzrelationen (*nah*: blau, *mittel*: grün, *fern*: rot) im Vergleich zu den jeweiligen diskreten Relationen (*gestrichelt*)

### Kumulative räumliche Relationen

Bei der Analyse des Meldungskorpus zeigte sich die Notwendigkeit der Auflösung aufeinander aufbauender Relationen. So berichten Beobachter beginnend von ihrem Standpunkt und beziehen im Folgenden weitere Referenzen auf diesen. Entsprechend ergeben sich kumulative räumliche Referenzen basierend auf rückbezogener Information. Diese sind unter Beachtung der sich fortpflanzenden Positionierungsunschärfe zu verarbeiten. Da der Möglichkeitsraum einer Relation mathematisch als diskretisierte Matrix zu verstehen ist, kann eine kumulative räumliche Relation, bestehend aus zwei aufeinander aufbauenden Möglichkeitsräumen, funktional in den Raum projiziert werden. Dabei wird mathematisch die Zielrelation  $R_Z$  über die durch die Standpunktbeschreibung gegebene Kernrelation  $R_K$ , in den Raum gefaltet. Dies erfolgt durch eine von [Jähne, 2005] vorgeschlagene, auf die

<sup>49</sup> Zitiert nach [Tenbrink, 2005].

<sup>50</sup> [Raubal und Winter, 2002] definieren noch eine strukturelle Salienz, welche jedoch einzig im Kontext von Routenbeschreibungen definiert ist.

<sup>51</sup> „Diskret“ ist hier als Antonym zu salient zu verstehen.

boolsche Algebra abgebildete Faltung entsprechend Formel 5.19. Diese auf Konjunktion und Disjunktion beruhende Operation lässt sich bedeutungsgleich auf unscharfe Mengen anwenden (vgl. Kapitel 4.1). Ergebnis ist ein, basierend auf einem unscharfen Relatum, bestimmter Möglichkeitsraum der Zielrelation.

$$R_M = \bigvee_{m'=-\infty}^{\infty} \bigvee_{n'=-\infty}^{\infty} R_K(m', n') \wedge R_Z(m + m', n + n') \tag{5.19}$$

Eine performantere Lösung jedoch ergibt sich durch Generalisierung der Faltung entsprechend Formel 5.20. Die Unschärfefortpflanzung entspricht dabei funktional einem gleitenden Durchschnitt, was im Sinne der Theorie unscharfer Mengen einem mittellenden Operator gleich kommt. Zu beachten ist allerdings das die Ergebnismenge folgend einzig den Axiomen 4.23 bis 4.25 genügt (vgl. Kapitel 4.1).

$$R_M = \int_{m'=-\infty}^{\infty} \int_{n'=-\infty}^{\infty} R_K(m', n') \cdot R_Z(m - m', n - n') dn' dm' \tag{5.20}$$

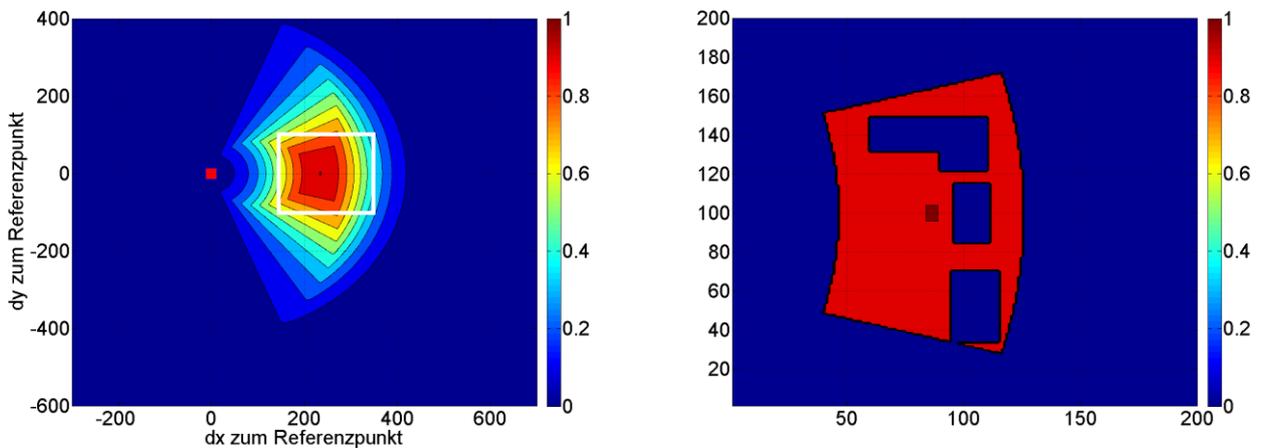


Abbildung 36: Möglichkeitsraum der Kernrelation, hier 250 Meter östlich, mit markiertem Zoomfenster (links); Dezimierung der Kernrelation durch Abzug „unmöglicher“ Beobachtungsstandorte (dunkelblau, rechts)

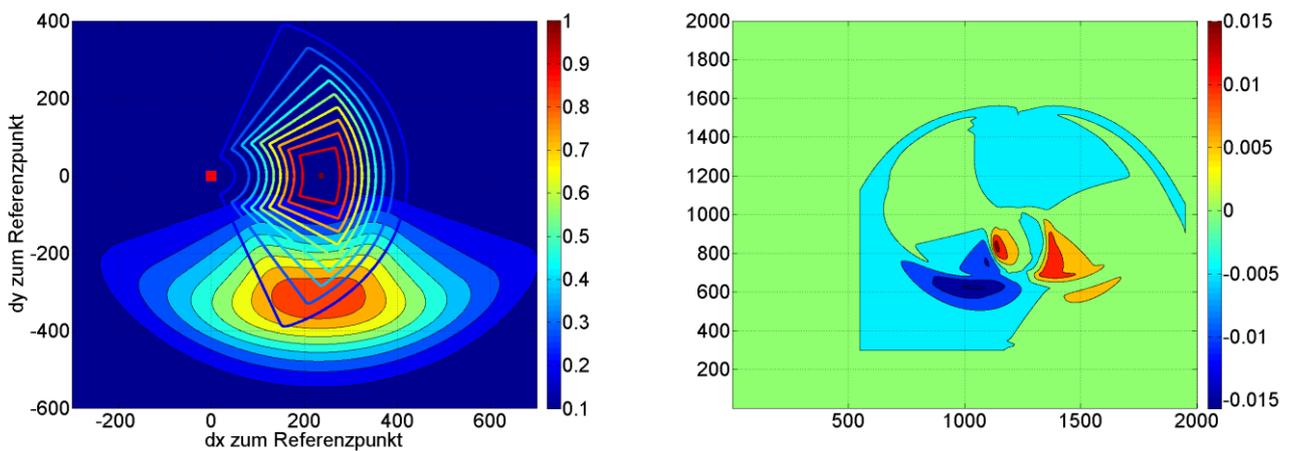


Abbildung 37: Möglichkeitsräume der Kernrelation (Konturlinien) sowie der Zielrelation 350 Meter südlich (Regionen) im relativen Koordinatensystem (links); Differenzendiagramm der Zielrelation unter Berücksichtigung und Vernachlässigung des Objektabzuges (rechts)

Da die Möglichkeitsräume funktional definiert sind und strenggenommen keine Grenzen besitzen, wird die Kernrelation wissensbasiert eingeschränkt, mit dem Ziel eine kombinatorische Explosion auszuschließen. So werden

„unmögliche“ Beobachterstandorte<sup>52</sup>, wie Gebäude oder Tiefgaragen, unter Nutzung von Hintergrundwissen der Wissensbasis (vgl. Kapitel 3.3), ausgeschlossen. Ferner wird die Kernmatrix um Standorte geringer Möglichkeit (hier kleiner 0,9) bereinigt. Resultat ist eine überschaubare Kernmatrix, wie in Abbildung 36 (rechts) dargestellt.

Ausgehend von dieser dezimierten Kernrelation kann folgend die Zielrelation ermittelt werden (vgl. Abbildung 37 (links)). Die Berücksichtigung der Positionierungsunschärfe ist darin anhand der verminderten Maximalbewertung (im Beispiel 0,88) wie auch der höheren Streuung erkennbar. Zur Performanzsteigerung kann auf die Berücksichtigung objektbedingter Standpunkteinschränkungen verzichtet werden, da deren Effekte marginal sind. So zeigt Abbildung 37 (rechts) die Differenzen der Zielrelation, unter Berücksichtigung und Vernachlässigung des Objektabzuges. Dies weist lediglich eine Bewertungsdifferenz von  $\pm 0,015$  aus. Bezogen darauf sind die durch die Kommunikation mit der Wissensbasis verursachten Kosten der Berechnung ungerechtfertigt hoch.

### 5.3.5 Ableitung qualitativer Objektrelationen

Objektrelationen stellen, gleich den bisher behandelten Raumrelationen, unscharfe räumliche Konzepte dar. Diese ergeben sich jedoch nicht aus der Kombination distanz- und richtungsbezogener Lokative, sondern spannen sich räumlich *zwischen* zwei Bezugsobjekten auf. Dabei skaliert die gleichnamige Raumrelation entsprechend der Relata und trägt den Distanz- und Richtungsbezug<sup>53</sup> implizit. Zur Formalisierung der Relation im Sinne unscharfer Mengen war es dennoch erforderlich, diese Konzepte separat, auf Basis qualitativer Raumrelationen zu modellieren (vgl. Abschnitt 5.3.2 und 5.3.3). Die Distanzkomponente der Relation *zwischen* leitet sich, begründet durch die Kommunikationsmaximen<sup>54</sup> (vgl. Kapitel 2.2.1, Seite 15), aus dem funktionalen Distanzkonzept *mittel* ab. Dafür ist die Distanzkomponente  $d$  der Relation 5.13 durch den Kostenterm  $d_{ko}$  der Formel 5.21 zu ersetzen. Dieser bewirkt eine Normierung der Zugehörigkeitsdichte hinsichtlich des Abstandes der beiden Relata. Ferner wird die Funktion derart skaliert, dass eine distanzabhängige Zugehörigkeitsbewertung einzig zwischen 0,5 und 1 erfolgt (vgl. Abbildung 38 (links)). Die Breitenkomponente der Relation entspricht einer Winkelableitung und bestimmt sich analytisch, auf Basis der funktionalen Modellierung qualitativer Richtungen, unter Anpassung der Wölbung nach Formel 5.22. Dies erfolgt ebenfalls durch einen Kostenterm, welcher den Öffnungswinkel dahingehend reduziert, dass die Zugehörigkeitsbewertung bei  $0,1973\pi$  den Wert 0,5 annimmt (vgl. Abbildung 38 (links)). Somit beträgt die Breite der Relation 10% der Objektdistanz was bei maximaler Entfernung im Skalenbereich einer Breite des Möglichkeitsraumes von  $\pm 50$  Meter entspricht (vgl. Abbildung 39 (rechts)). Ferner handelt es sich bei der winkelbasierten Breite um eine gerichtete Relation, welche demnach von beiden Relata ausgehend zu bestimmen ist. Verschnitten werden diese folgend durch eine parametrisierte Yager-t-Norm entsprechend Formel 4.21 (Seite 45,  $\sigma = 1$ ).

$$d_{ko} = \left( \frac{p_1 \cdot d}{\Delta d} \right) + p_2 \quad 5.21$$

$$\mu_{breite} = \left( \frac{\cos \varphi + 1}{2} \right)^{p_3} \quad 5.22$$

mit:	$d_{ko}$	Kostenterm der Distanz
	$d$	Distanz zwischen intendiertem Objekt und Relatum
	$\Delta d$	Distanz zwischen den Relata
	$\varphi$	Orientierung (vgl. Anhang B: Geometrische Grundlagen, Seite 92)
	$p_1$	Spreizungsparameter, $p_1 = 166,3$
	$p_2$	Normierungsparameter, $p_2 = 173,4$
	$p_3$	Wölbungsparameter, $p_3 = 28,4$

<sup>52</sup> „Unmögliche“ Beobachterstandorte ergeben sich aus der Annahme heraus, dass sich bspw. ein relativ positionierter Beobachter nicht in einem Gebäude oder in einer Tiefgarage befindet. Folglich werden derartige Standorte verworfen (vgl. Abbildung 36, rechts).

<sup>53</sup> Vorliegend wird durch den Terminus *Richtungsbezug* die räumliche Breite der Relation subsumiert. Der Terminus begründet sich durch dessen funktionale Definition.

<sup>54</sup> Demnach referenziert ein kooperativer Verfasser so spezifisch wie möglich. Befände sich also ein intendiertes Objekt im Wirkungsbereich einer spezifischeren Relation, wie *nah*, so würde dies expliziert.

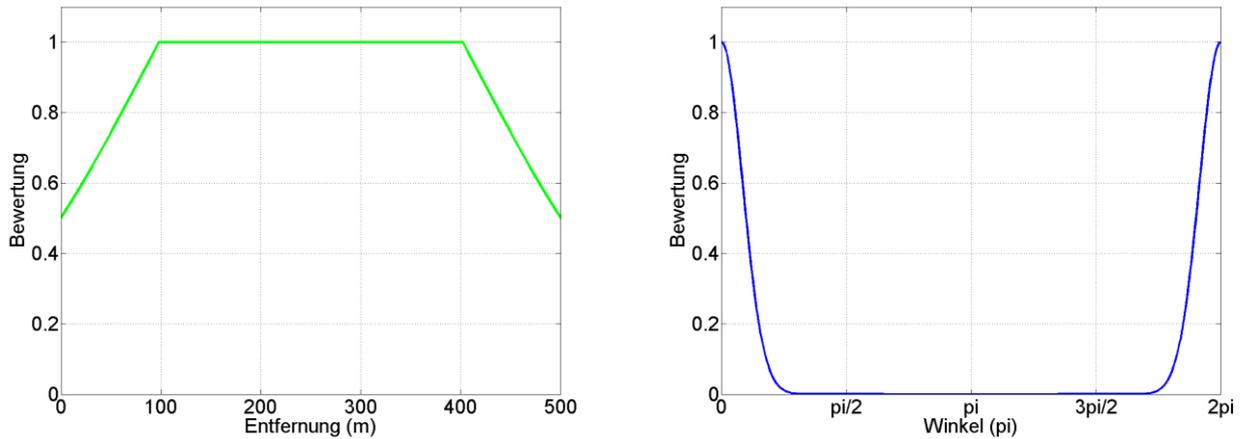


Abbildung 38: Distanzkomponente der Objektrelation zwischen (hier für die Distanz der Relata von 500 Metern; links); Breitenkomponente der Objektrelation, bestimmt auf Basis des Winkels (rechts)

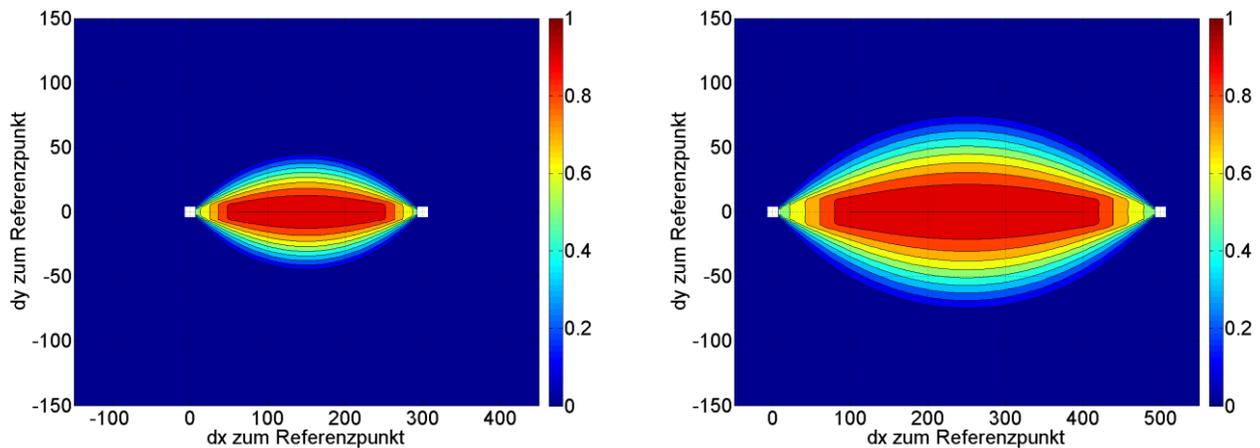


Abbildung 39: Möglichkeitsraum der Relation zwischen zweier Objekte (weiße Quadrate) in einer Distanz von 300 Metern (links) und einer Distanz von 500 Metern (rechts) im relativen Koordinatensystem

Die Verknüpfung der Distanz- und Richtungskomponente, sowie die Ableitung des resultierenden Möglichkeitsraumes erfolgt analog der räumlichen Relationen (vgl. Abschnitt 5.3.4). Ergebnis ist ein beispielhaft in Abbildung 39 dargestellter Möglichkeitsraum, der Relation *zwischen*, mit Ausdehnung (Breite). Der Links-Rechts-Vergleich der Abbildung 39 veranschaulicht dabei die Skalierung unter Abhängigkeit des Abstandes der Bezugsobjekte.

## 5.4 Resultierende Vagheit und temporale Gültigkeit

Im Sinne der multikriteriellen Bewertung der verbalen Information fanden verschiedene Einflusterme im funktionalen Modell Berücksichtigung (vgl. Abschnitt 5.2). Diese ergaben sich unter anderem aus der Domänenbindung und sind entsprechend durch die DV100 (vgl. [SKK, 1999]) definiert. Eine numerische Festlegung indes ist schwierig, da deren Einfluss nur bedingt funktional erfassbar ist. Vielmehr erfolgte deren Bestimmung analytisch und beruht auf der Expertise erfahrener Lagekartenführer. Dem entsprechend wurden die domänenbedingten Parameter in enger Absprache mit erfahrenerm Stabspersonal der Branddirektion Karlsruhe wie auch der

AKNZ<sup>55</sup> definiert. Die Bewertung erfolgte im Konfidenzintervall von 0 bis 1, wobei 0 kein Vertrauen und 1 vollkommenes Vertrauen ausdrückt.

#### Modellierung der melderbedingten Vagheit

Die melderbedingte Vagheit ergibt sich aus der Person des Meldenden. Dabei wird unterschieden zwischen sogenannten Experten und Passanten. Experten sind im Sinne dieser Definition Mitglieder der Einsatzeinheiten welche vor Ort die Lage melden. Entsprechend wird deren Glaubwürdigkeit mit 1,0 bewertet. Passanten sind alle sonstigen meldenden Personen. Diese besitzen eine geringere Glaubwürdigkeit von 0,9, was sich durch die erhöhte Möglichkeit bewusster oder unbewusster Falschmeldungen begründet.

#### Modellierung der erfassungsbedingten Vagheit

Die erfassungsbedingte Vagheit ist in der DV100 (vgl. [SKK, 1999]) explizit in ihren verschiedenen Ausprägungen definiert. So ist bei der Verarbeitung eines Faktum zu berücksichtigen, ob dieses auf eigener Wahrnehmung, auf Aussagen Dritter oder auf Vermutungen der meldenden Person beruht. Entsprechend erhalten auf eigenen Beobachtungen beruhende Fakten ein Vertrauen von 1,0, auf Aussagen Dritter beruhende Fakten erhalten eine Glaubwürdigkeit von 0,9 und Vermutungen fließen mit einem Glauben von 0,8 ein.

#### Modellierung der temporalen Gültigkeit

Die temporale Gültigkeit eines Faktums ist von herausragender Bedeutung, da die Lagekarte den stets aktuellen Lagestatus widerspiegeln soll. Dem entsprechend ist diese gegen inaktuelle Fakten abzusichern, welche durch Lücken in der Meldungskette auftreten können. Ferner besitzen Fakten per se eine zeitlich begrenzte Gültigkeit die sich aus dem Ereigniskontext ergibt. So wird der Brand eines Fahrzeuges nach zwei Stunden eigenständig erloschen sein und eine dies bezügliche Meldung ihre Bedeutung verlieren. Die temporale Gültigkeit wurde entsprechend funktional definiert, um deren Verlauf stetig abzubilden (Formel 5.23).

$$\mu_{zeit} = \min \left( 1, \frac{3}{2} \cdot e^{\left( \frac{-(\frac{\Delta t}{40} - 0,825)^2}{5} \right)} \right) \quad 5.23$$

mit:  $\Delta t$  Zeitdifferenz zwischen Erfassungs- und Verarbeitungszeitpunkt

Dabei wird die Gültigkeit als unscharfes Konzept verstanden und entsprechend eine Zugehörigkeit zur Menge aktueller Fakten bestimmt. Ein Faktum zählt demnach 90 Minuten als hochaktuell und wird folgend mit zunehmender Zeit abgewertet. Nach etwa 240 Minuten verblasst dessen Aussage vollkommen (vgl. Abbildung 40).

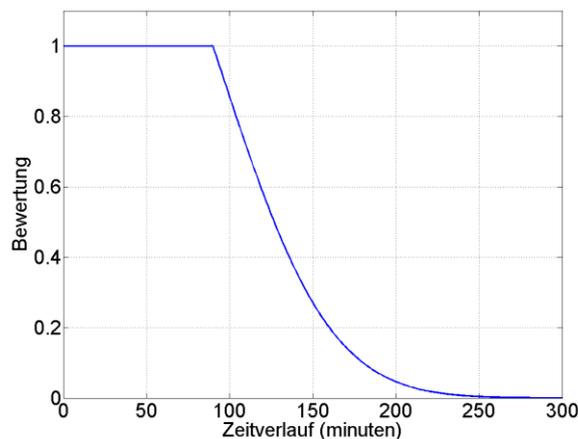


Abbildung 40: Diagramm der temporalen Gültigkeit eines Faktums

<sup>55</sup> AKNZ – Akademie für Krisenmanagement, Notfallplanung und Zivilschutz (Bad Neuenahr-Ahrweiler).

## 5.5 Funktionale Abhängigkeiten

Um die Gesamtbewertung eines konkreten Objektes hinsichtlich eines Faktums, respektive mehrerer Fakten numerisch auszudrücken, ist der funktionale Gesamtzusammenhang des Modells zu formulieren. Dies erfolgt jedoch zweistufig, da zwischen faktum- und kontextbasierter Abhängigkeit zu unterscheiden ist. So resultiert die faktumbasierte Abhängigkeit aus den im Faktum beschriebenen Parametern, deren Zusammenhang durch das algebraische Produkt<sup>56</sup> definiert ist (vgl. [Zadeh, 1965]). Dieses bietet die Möglichkeit den Ansatz ohne Verlust der Aussagesemantik um beliebig viele Parameter zu ergänzen. Die kontextbasierte Abhängigkeit ergibt sich erst aus dem Meldungsverlauf und ermöglicht die Verifikation einer Objektbewertung, ausgehend von einer Faktum-Menge. Deren Zusammenhang wird durch einen mittelnden Operator, das generalisierte Mittel nach Formel 4.26 ( $\tau = 0,3$ ), beschrieben. Dessen Eignung ergibt sich aus der Robustheit gegen Ausreißer, sowie der Möglichkeit der Parametrisierung. Formal zusammengefasst wurde dies in der Gleichung 5.24.

$$\Pi_o(\vartheta_j) = \left( \sum_{j=1}^m w_j \left( \prod_{i=1}^n \Pi_i \right)_j^\tau \right)^{\frac{1}{\tau}} \text{ mit } i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m \text{ und } \tau = 0,3 \tag{5.24}$$

Ausgehend von der ermittelten Possibilität kann folgend nach Formel 4.33 das Notwendigkeitsmaß abgeleitet werden. Als Resultat lässt sich ein Intervall  $O(\vartheta_j) = [\Pi(O), N(O)]$  bestimmen, welches die Bewertung eines Objektes  $O$  hinsichtlich der Fakten  $\vartheta_j$  repräsentiert.  $\Pi(O)$  bezeichnet darin die Möglichkeit für die Konsistenz mit der Menge aller Fakten  $\vartheta_j$  und  $N(O)$  bezeichnet entsprechend die Möglichkeit gegen die Konsistenz mit der Menge aller Fakten  $\vartheta_j$  (vgl. Kapitel 4.2, Seite 45). Davon ausgehend lässt sich die Ergebnismenge konkret einschränken, da im Weiteren einzig Objekte betrachtet werden, für die  $\Pi(O) > N(O)$  gilt. Dies macht den Ansatz äußerst robust, da im Fall vermehrter Falschmeldungen die Konsistenz mit der Menge aller Fakten verloren geht und die Ergebnismenge verworfen wird, was Fehler zweiter Art minimiert. Ferner lässt sich auf Basis der Intervalleigenschaften eine grobe Aussage hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit  $P(O)$ , respektive deren Grenzen, treffen (vgl. Kapitel 4.2, Seite 45).

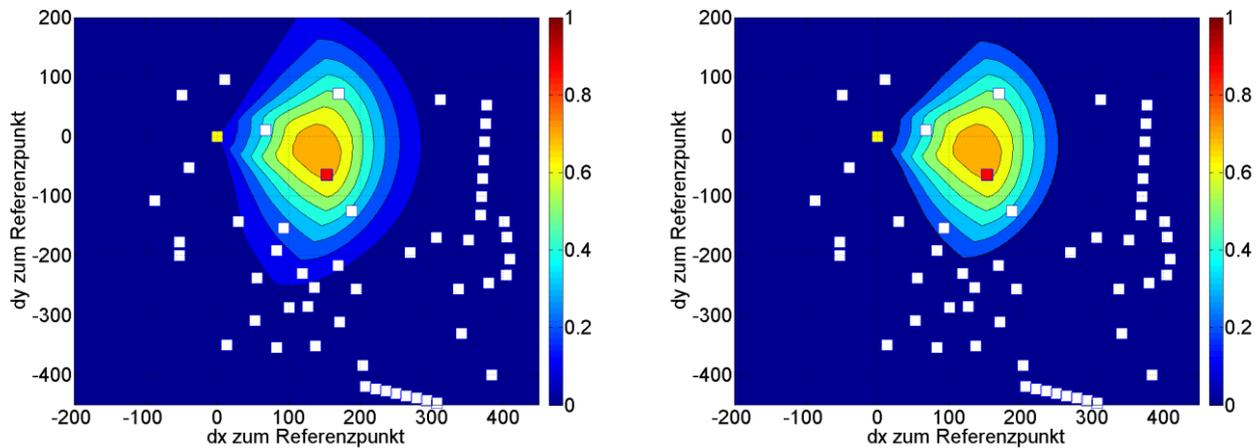


Abbildung 41: Möglichkeitsraum aufgespannt durch zehn Lagebeschreibungen der Mensa (rotes Viereck) relativ zum Chemieturm (gelbes Viereck, Koordinatennull) mit optimalen Beobachtungsparametern (links) und unter Anwendung der Bedingung  $\Pi(O) > N(O)$  (rechts) - weiße Quadrate: Position weitere Gebäude der Szene

Die Abbildungen 41 und 42 illustrieren Möglichkeitsräume, deren Unterschiede sich aus verschiedenen Beobachtungsparametern ergeben. Diese Möglichkeitsräume resultieren aus zehn verbalen Beschreibungen der Lage der Mensa (rotes Viereck) innerhalb der räumlichen Referenzszene (Abbildung 23, Seite 52). Abbildung 41 veranschaulicht im Links-Rechts-Vergleich die aus der einschränkenden Bedingung,  $\Pi(O) > N(O)$ , resultierende Reduzierung des Möglichkeitsraumes. Da die verbalen Beschreibungen sehr konsistent sind, besteht eine hohe Möglichkeit ( $\Pi(Mensa) = 0,728$ ) respektive eine geringe Notwendigkeit ( $N(Mensa) = 0,209$ ), was den Effekt

<sup>56</sup> Das algebraische Produkt ist alternativ auch als Produktnorm bekannt.

der Einschränkung minimiert. Dabei wurde von optimalen Beobachtungsparametern im Bezug auf die Erfassungsart (Beobachtung,  $\Pi_E = 1$ ), die Person des Verfassers (Experte,  $\Pi_M = 1$ ) sowie den Beobachtungszeitpunkt (aktuell,  $\Pi_T = 1$ ) ausgegangen.

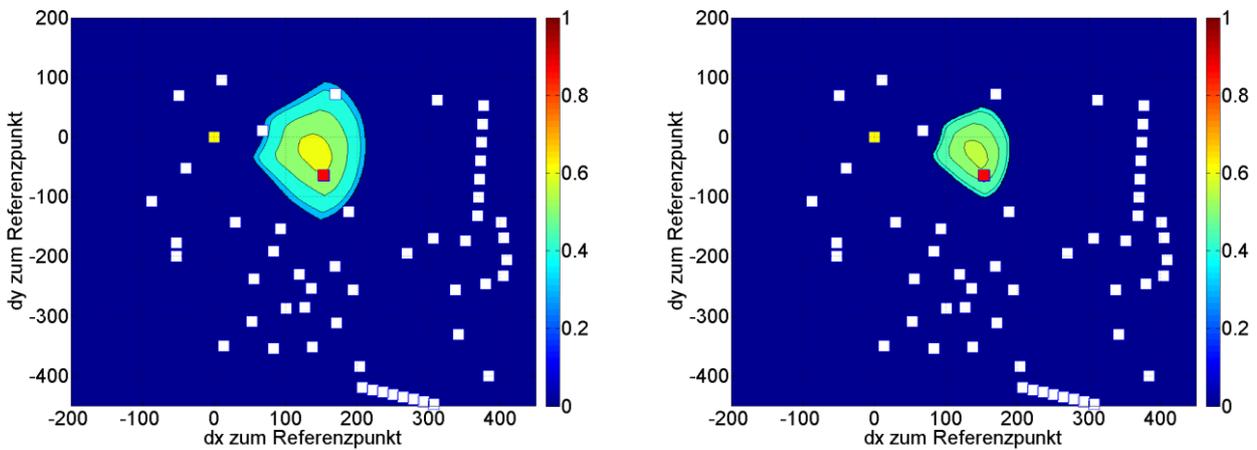


Abbildung 42: gleiche Situation wie in Abbildung 41, allerdings unter veränderten Beobachtungsparametern  $\Pi_M = 0,9$ ;  $\Pi_E = 0,9$  (links) sowie mit  $\Pi_E = 0,8$  (rechts)

Abbildung 42 (links) zeigt den Möglichkeitsraum der sich aus den gleichen verbalen Beschreibungen, jedoch ausgehend von der Aussage eines Dritten ( $\Pi_E = 0,9$ ), sowie eines Passanten ( $\Pi_M = 0,9$ ) als Meldenden ergibt. Basierend auf der geringeren Möglichkeit ( $\Pi(Mensa) = 0,589$ ) und der höheren Notwendigkeit ( $\mathcal{N}(Mensa) = 0,340$ ) resultiert ein kompakterer Möglichkeitsraum. Dieser Effekt wird durch eine weitere Abwertung der Erfassungsart (Vermutung,  $\Pi_E = 0,8$ ) gesteigert (vgl. Abbildung 42, rechts). Dies reduziert gleichwohl die konkrete Objektbewertung ( $\Pi(Mensa) = 0,524$ ) als Resultat der erhöhten Ungewissheit ( $\mathcal{N}(Mensa) = 0,431$ ).

## 5.6 Clustern abhängiger Fakten

Entsprechend des Bewertungsansatzes sind die Alternativhypothesen mehrdeutiger Relata, wie auch die Fehlmeldungen, robust zu identifizieren und zu verwerfen (vgl. Abschnitt 5.1, Seite 49). Dies erfolgt durch kontextbasiertes Gruppieren der Hypothesen zu Ereignisclustern, basierend auf einem, dem fuzzy  $k$ -mean Algorithmus (vgl. [Duda et al., 2002]) ähnlichem Verfahren. Dabei werden die initialen Cluster-Zentren nicht zufällig bestimmt, sondern ergeben sich durch das Maximum des Möglichkeitsraumes. Der Möglichkeitsraum repräsentiert zudem die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_i$  mit welcher die Zugehörigkeit einer Hypothese zum Ereigniscluster  $i$  bestimmt wird. Dies erfolgt auf Basis des intendierten Punktes, der sich vom Merkmalsvektor ableitet und die jeweilige Hypothese repräsentiert (vgl. Abbildung 43). Der Merkmalsvektor indes bestimmt sich über die Raumreferenz<sup>57</sup> des Faktums im zweidimensionalen Merkmalsraum.

$$\forall h_j(\vartheta) \in i_{\text{Cluster}} \left| \left( \frac{\mu_i(P_j)}{\mu_i(Z_i)} > \frac{1}{2} \right) \right. \text{ mit } i = 1, \dots, n \text{ und } j = 1, \dots, m \quad 5.25$$

mit:  $h_j$  auf einem Faktum basierende Hypothese  
 $P_j$  intendierter Punkt  
 $Z_i$  Cluster-Zentrum

Iterativ und sequentiell kann die Zugehörigkeit jeder Hypothese zu einem Cluster durch die Bedingung 5.25 ermittelt werden. Optimiert wird, entgegen dem  $k$ -mean Algorithmus nach [Duda et al., 2002], die Zuordnung der Hypothesen und nicht die Lage der Cluster-Zentren im Merkmalsraum. So werden im initialen Iterationsschritt alle Hypothesen jeweils gegen *ein* Cluster getestet. Bei Annahme sind diese aus der Grundmenge der Hypothesen

<sup>57</sup> Die Raumreferenz wird auf Basis der räumlichen Beschreibung des Faktums exakt berechnet. Qualitative Relationen werden konkret durch fixe Werte der jeweiligen Relation approximiert.

zu entfernen. Für die verbleibenden wird iterativ ein neuer Möglichkeitsraum ermittelt, auf dessen Basis sequenziell gegen das resultierende Cluster getestet werden kann. Als Abbruchkriterium fungiert dabei die Zuordnungshäufigkeit. Die verbleibenden Hypothesen, die keinem Cluster zugeordnet werden konnten, sind zu verwerfen.

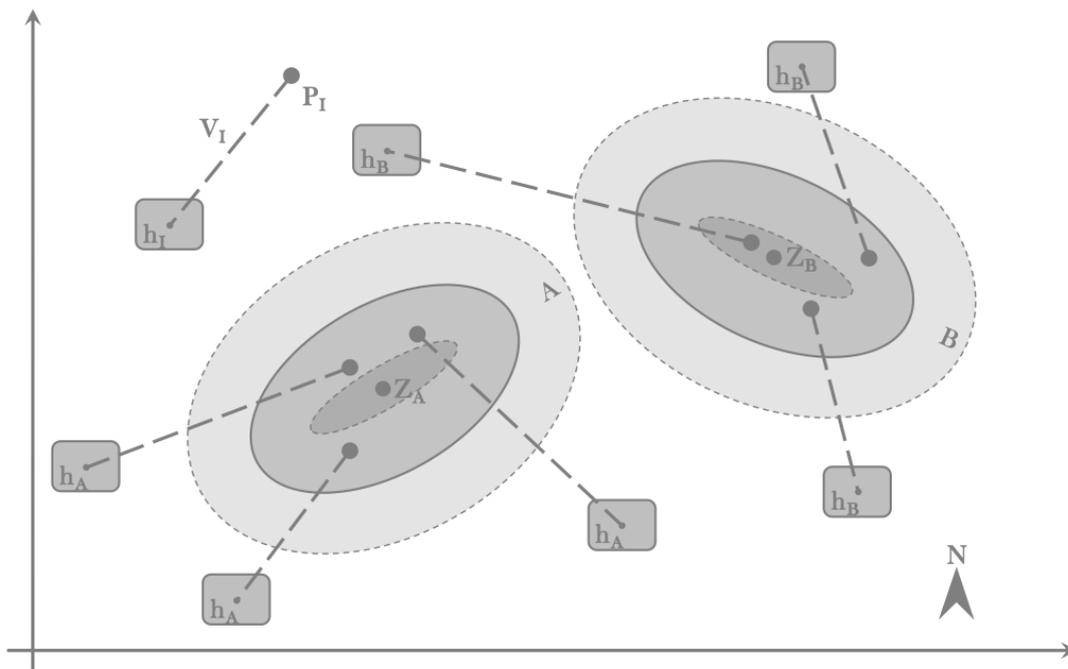
*Algorithmus: Cluster  $\Omega_{Hypothesen} \Rightarrow \Omega_{Cluster-n}$*

```

repeat {
   $Z_C = \max(\Pi(\Omega_{Hypothesen}))$ 
  for all  $p_i \in \Omega_{Hypothesen}$  {
    if  $\left(\frac{\mu(p_i)}{\mu(Z_C)} > \frac{1}{2}\right)$  {
      insert  $p_i$  into  $\Omega_C$ 
    }
  }
  if  $\Omega_C.length > 1$  {
     $\Omega_{Cluster-n} = \Omega_C$ 
     $n++$ 
  }
   $\Omega_{Hypothesen} = \Omega_{Hypothesen} - \Omega_C$ 
   $\Omega_C = null$ 
} until  $\Omega_{Hypothesen} == \emptyset$ 

```

*Algorithmus 1: Clusteralgorithmus (Modellierungssprache JANA)*



*Abbildung 43: auf den Möglichkeitsräumen basierende Clusterbildung*

Abbildung 43 verdeutlicht dies schematisch anhand zweier Cluster A und B. Die verschiedenen grauen Ellipsen symbolisieren darin die Bewertungslevel der jeweiligen Möglichkeitsräume mit der Zuordnungsbedingung 5.25, gekennzeichnet anhand der durchgezogenen Ellipsen. Die Hypothese  $h_i$ , repräsentiert durch den intendierten Punkt  $P_i$ , konnte keinem Cluster zugeordnet werden und ist folglich zu verwerfen.

Abbildung 44 illustriert das Verfahren an einem konkreten Beispiel ausgehend von dem Verifikationskorpus. Im ersten Iterationsschritt (links) wurde ein Möglichkeitsraum, auf zwanzig Hypothesen zweier Objekte basierend, ermittelt. Davon ausgehend konnte ein Clusterzentrum bestimmt werden, was das Bündeln von elf der zwanzig Hypothesen entsprechend Zuordnungsbedingung 5.25 ermöglichte. Auf Basis der verbleibenden neun Hypothesen wurde erneut ein Möglichkeitsraum aufgespannt, was nach gleichem Vorgehen die Bündelung weiterer fünf

Hypothesen erlaubte. Die restlichen vier Hypothesen erfüllten das Abbruchkriterium wodurch sie verworfen werden konnten. Abbildung 44 (rechts) zeigt als Resultat zwei Bewertungscluster, welche die intendierten Objekte, AKK ([0,730; 0,254]) und Sprachzentrum ([0,775; 0,199]), identifizieren und entsprechend bewerten.

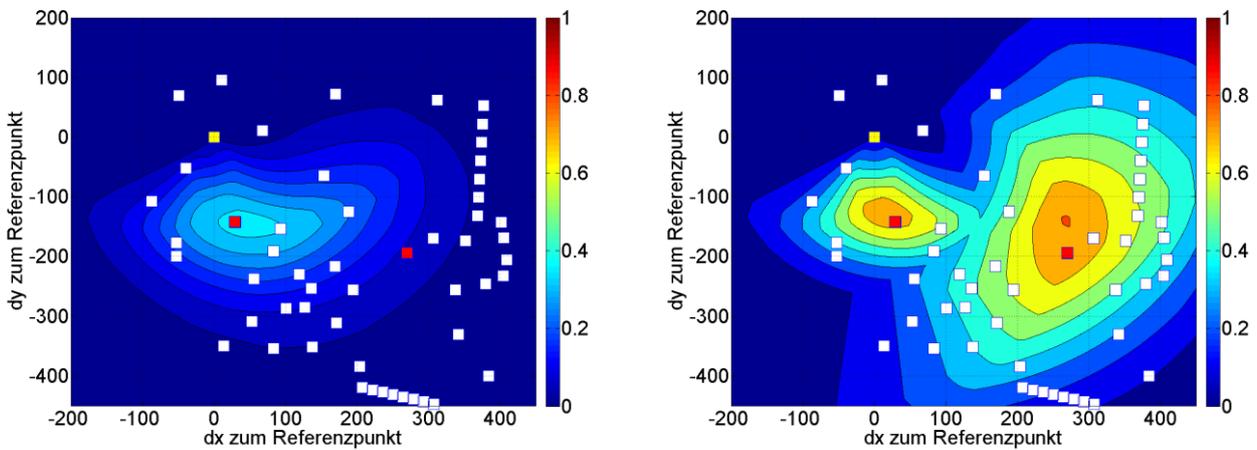


Abbildung 44: Möglichkeitsraum basierend auf jeweils zehn verbalen Beschreibungen der Lage zweier Objekte (AKK-Gebäude, Sprachzentrum) unter Verzicht (links) und unter Nutzung des Clusteralgorithmus (rechts)

### 5.7 Zusammenfassung

Es gelang eine Bewertungsmethodik zu entwickeln, die es ermöglicht, konkrete Objekte multikriteriell hinsichtlich der Konsistenz mit einer Fakt-Menge zu bewerten. Dabei konnte, ausgehend von empirischen Erhebungen, statistisch fundiert, eine funktionale Modellierung unscharfer räumlicher Referenzen abgeleitet werden (vgl. Tabelle 9). Diese erlaubt es unter Berücksichtigung der Objektbedeutung (vgl. Salienz), der spezifischen Objektausdehnung und -orientierung sowie Beobachtungs- und temporaler Parameter einen Möglichkeitsraum der Fakt-Menge aufzuspannen. Dieser Möglichkeitsraum war hinsichtlich der Hypothesen-Menge zu clustern, um Fehlmeldungen und alternative Hypothesen zu identifizieren und zu verwerfen. Die entwickelten Verfahren werden abschließend tabellarisch, entsprechend der gleichen Kriterien verglichen, wie es bereits in Tabelle 4 bis Tabelle 7, zum Abschluss des Kapitel 2 (Seite 32) geschah (vgl. Tabelle 9). Folgend ist diese Methodik hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit zu verifizieren. Zudem gelang durch die funktionale Repräsentation der räumlichen Relationen deren Semantik auf Basis der Gültigkeitsbereiche zu definieren. Dies erfolgte ferner unter Berücksichtigung des jeweiligen Bezugsobjektes. Im Sinne der Zielstellung wurde die Wahrnehmung des Sprechers auf Basis der Erhebung und der Bedeutungskonzepte, wie Salienz, einbezogen. Ferner wurde die Unschärfe stochastisch fundiert durch das Bewertungsintervall, unter Berücksichtigung der primären Einflussparameter, quantifiziert. Da diese geschilderten Modellierungen auf dem in Formel 5.1 formulierten funktionalen Modell basiert gilt die Theorie der These II als nachgewiesen.

	entspricht der Metrik	Bewertungsmaß ableitbar	empirisch begründet	abbildbar im Vektorraum
Modellierung qualitativer Distanzen	✓	✓	✓	✓
Modellierung quantitativer Distanzen	✓	✓	✓	✓
Modellierung qualitativer Richtungen	✓	✓	✓	✓
Modellierung der Objektrelation zwischen	○	✓	✗	✓

Tabelle 9: Bewertung der entwickelten Verfahren hinsichtlich der Zielstellung (Bedingung: ✓- erfüllt, ✗- nicht erfüllt, ○- nicht vergleichbar)

## Teil III

### 6 Verifikation der entwickelten Bewertungsmethodik

Die in Kapitel 5 entwickelte Bewertungsmethodik ist hinsichtlich ihrer Ergebnisse zu verifizieren. Dies erfolgt weitgehend unter Realbedingungen, auf Basis eines auf dem Campusgelände erhobenen Verifikationskorpus verbaler Referenzierungen (vgl. Kapitel 5.3.1, Seite 51). Beginnend wird dafür die funktionale Modellierung der räumlichen Unschärfe verifiziert. Dies geschieht separat, da die räumliche Modellierung einen erheblichen Einfluss auf Ausdehnung und Lage der Möglichkeitsräume besitzt. Folgend werden die verbleibenden Beobachtungsparameter sowie der Clusteralgorithmus hinsichtlich der Plausibilität der Bewertung verifiziert.

#### 6.1 Verifikation der räumlichen Modellierung

##### *Verifikation auf Basis des Verifikationskorpus*

Ergänzend zur durchgeführten Erhebung (vgl. Kapitel 5.3.1, Seite 51) wurde ein Verifikationskorpus, bestehend aus verbalen Beschreibungen von der in Abbildung 23 (Seite 52) dargestellten räumlichen Szene, erfasst. Unter der Nutzung qualitativer und quantitativer Lokative beschrieben zehn Passanten die räumliche Lage von sieben Objekten unter Bezug zum Chemieturm (Relatum). Erwartet wurde, die beschriebenen Objekte unter Anwendung des entwickelten räumlichen Bewertungsalgorithmus aus der Menge 53 möglicher Objekte der Umgebung zu identifizieren. Um isoliert den Einfluss der Lagebeschreibungen zu beurteilen, flossen die Beobachtungsparameter bewertungsneutral ein. Ferner blieb die Bedingung  $\Pi(O) > N(O)$  unberücksichtigt, da alternative Hypothesen und Fehlmeldungen ausgeschlossen werden konnten. Erwartungsgemäß waren Hypothesen objektiv naher Objekte konsistenter als Hypothesen objektiv ferner Objekte. Diese Konsistenzunterschiede lassen sich konkret an der Ausdehnung der aufgespannten Möglichkeitsräume sowie den resultierenden Objektbewertungen erkennen. Gleiches ließ sich auch beim Vergleich der Möglichkeitsräume, resultierend aus quantitativen und qualitativen Referenzierungen, beobachten. So sind in den folgenden Abbildungen die Möglichkeitsräume, basierend auf der Kombination qualitativer Richtungen mit quantitativen und qualitativen Distanzen exemplarisch für die Beschreibung der Mensa (jeweils links) und des Sprachzentrums (jeweils rechts) dargestellt (vgl. Abbildung 45 bis Abbildung 47).

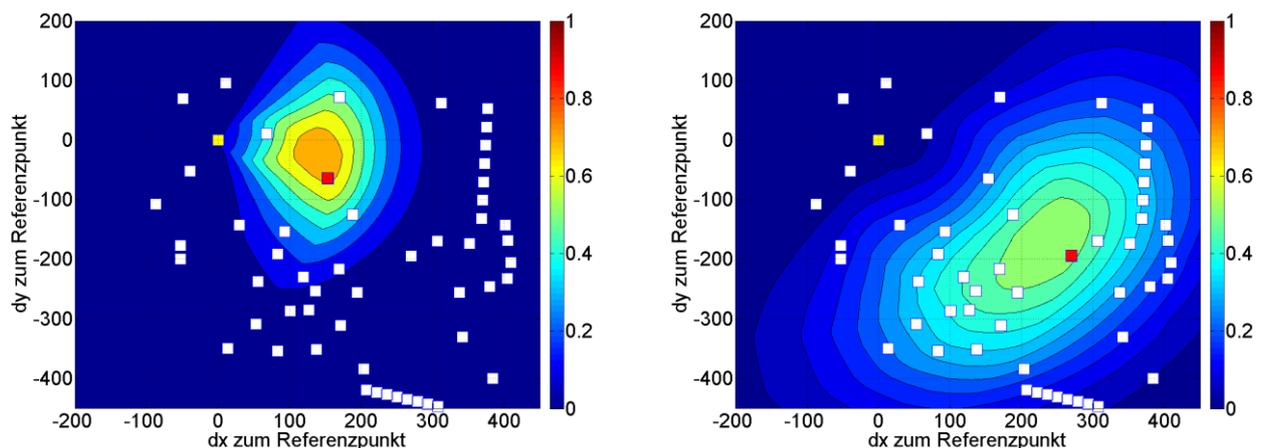


Abbildung 45: Möglichkeitsraum basierend auf zehn verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz quantitativ, Richtung qualitativ) der Mensa (links, [0,728; 0,209]) und des Sprachzentrums (rechts, [0,517; 0,454]); (gelb: Relatum, rot: intendiertes Objekt)

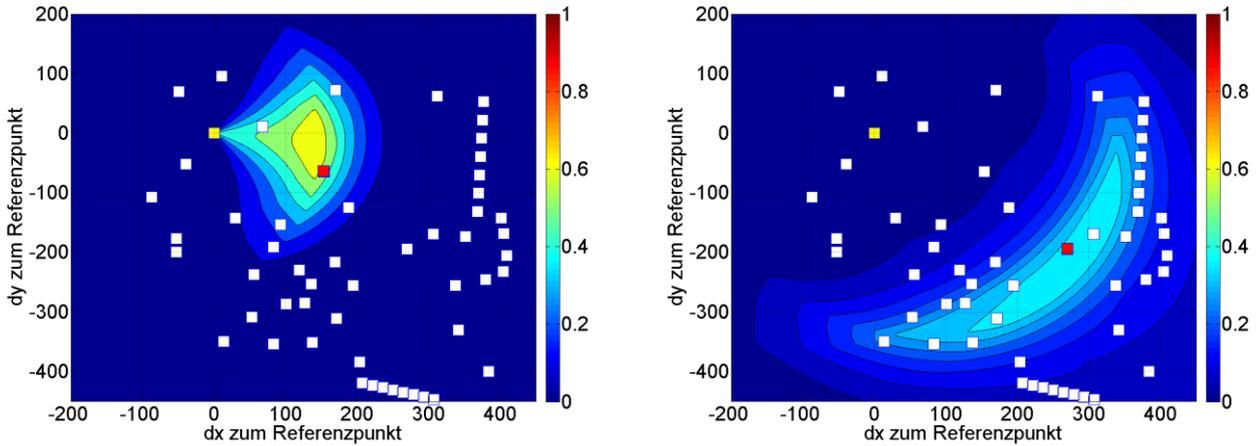


Abbildung 46: Möglichkeitsraum basierend auf zehn verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz und Richtung qualitativ) der Mensa (links, [0,563; 0,302]) und des Sprachzentrums (rechts, [0,372; 0,610]); (gelb: Relatum, rot: intendiertes Objekt)

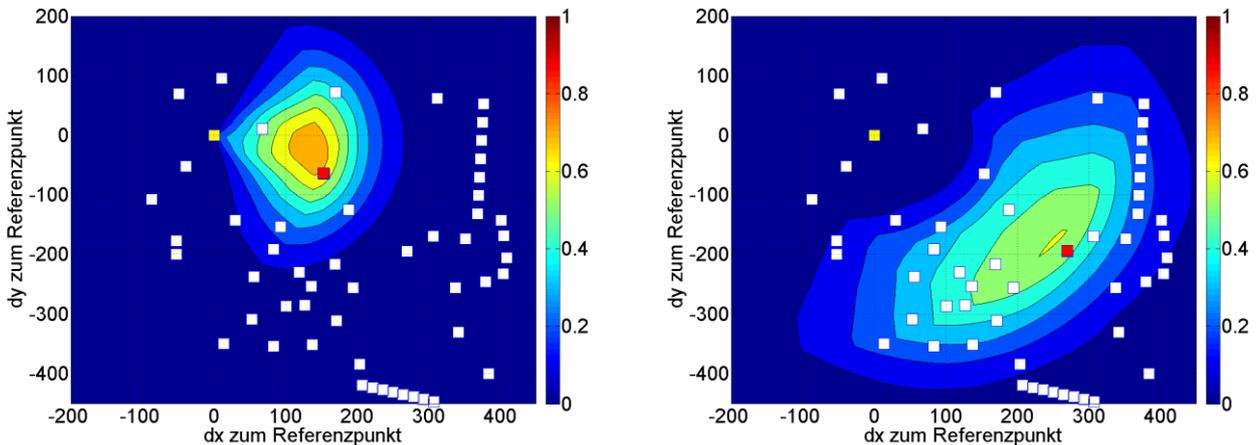


Abbildung 47: Möglichkeitsraum basierend auf zehn verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz qualitativ/quantitativ, Richtung qualitativ) der Mensa (links, [0,674; 0,207]) und des Sprachzentrums (rechts, [0,535; 0,394]); (gelb: Relatum, rot: intendiertes Objekt)

Die den Möglichkeitsräumen zugrundeliegenden verbalen Beschreibungen (Hypothesen) sind tabellarisch im Anhang F (Mensa: Tabelle 12, Sprachzentrum: Tabelle 13, Seiten 95 ff) aufgeführt. Eine vollständige Auflistung aller Objektbewertungen befindet sich ebenfalls im Anhang F, unterschieden zwischen Bewertungen, resultierend aus quantitativen (Tabelle 14, Seite 96) und aus qualitativen Distanzbeschreibungen (Tabelle 15, Seite 96). Im Ergebnis war es möglich, fünf der sieben Objekte zweifelsfrei anhand der Bewertung zu identifizieren. Der Grund für die beiden Fehlbewertungen wird jedoch nicht im Verfahren, sondern in einer für die Verifikation ungünstigen Objektwahl gesehen. So handelt es sich bei einem der beiden Objekte um das Gebäude des Studentenwerkes (vgl. Abbildung 48, links), welches Bestandteil eines größeren, nördlich ausgedehnten Gebäudekomplexes ist. Diese Ausrichtung des Gebäudekomplexes nach Nord schlägt sich entsprechend in dem Möglichkeitsraum nieder. Dieser Effekt ergibt sich durch die funktionsbedingte Unterteilung des Gebäudes, welche jedoch nicht funktional sondern semantisch zu modellieren ist. Bei dem zweiten Objekt handelt es sich um die Bahnstation Durlacher Tor (vgl. Abbildung 48, rechts), welche vom Erhebungsstandort nicht zu erkennen war, folglich spekulativ positioniert wurde. So ist zu erklären, dass alle Befragten systematisch zu kurz schätzten und wenig Konsistenz hinsichtlich der Richtung bestand.

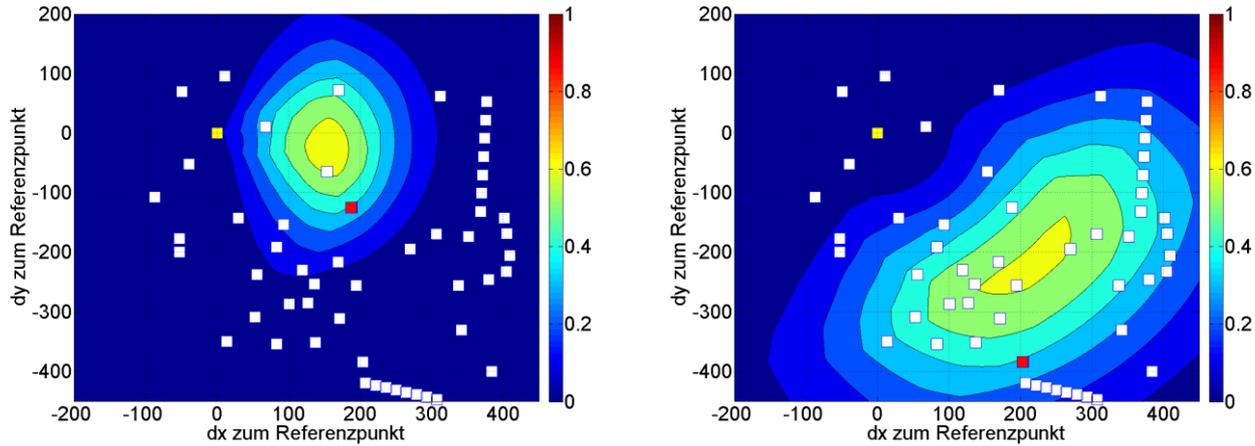


Abbildung 48: Möglichkeitsraum basierend auf zehn verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz quantitativ, Richtung qualitativ) des Studentenwerks (links, [0,385; 0,356]) und des Durlacher Tors (rechts, [0,384; 0,388]); (gelb: Relatum, rot: intendiertes Objekt)

#### Verifikation über inverse Relationen des Verifikationskorpus

Da die verbalen Lagebeschreibungen als symmetrisch, im Sinne der Metrik zu verstehen sind, war es möglich, die Relationsinversen zur Verifikation hinzuzuziehen. Damit ließ sich das räumliche Szenario dahingehend verändern, als dass nun Hypothesen eines intendierten Objektes, ausgehend von verschiedenen Relata vorliegen. Dies kommt einem realen Szenario näher, da diverse Szenensichten einfließen. Aus der Menge der zehn möglichen Objektreferenzen wurde zur Berechnung zufallsbasiert eine für die jeweilige Relation ausgewählt. So ist in den folgenden Abbildungen die Kombination der sieben Hypothesen mit höchster (links) sowie geringster Konsistenz (rechts) dargestellt. Ferner ist zu unterscheiden zwischen Möglichkeitsräumen, resultierend aus rein quantitativen (vgl. Abbildung 49), rein qualitativen (vgl. Abbildung 50) sowie zufällig gemischten Distanzrelationen (vgl. Abbildung 51).

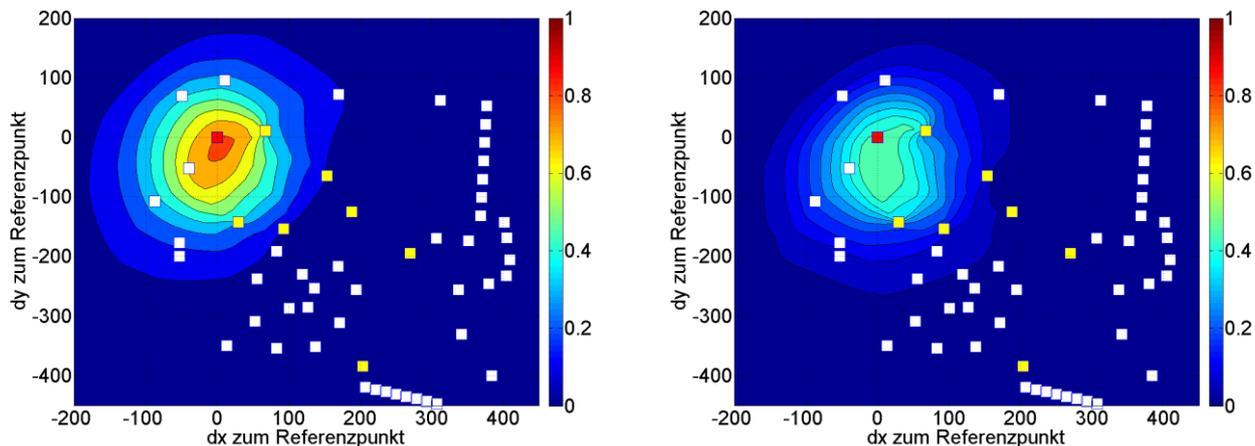


Abbildung 49: Möglichkeitsraum basierend auf sieben verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz quantitativ, Richtung qualitativ) des Chemieturms (rot), ausgehend von verschiedenen Relata (gelb); links [0,798; 0,176], rechts [0,614; 0,507]

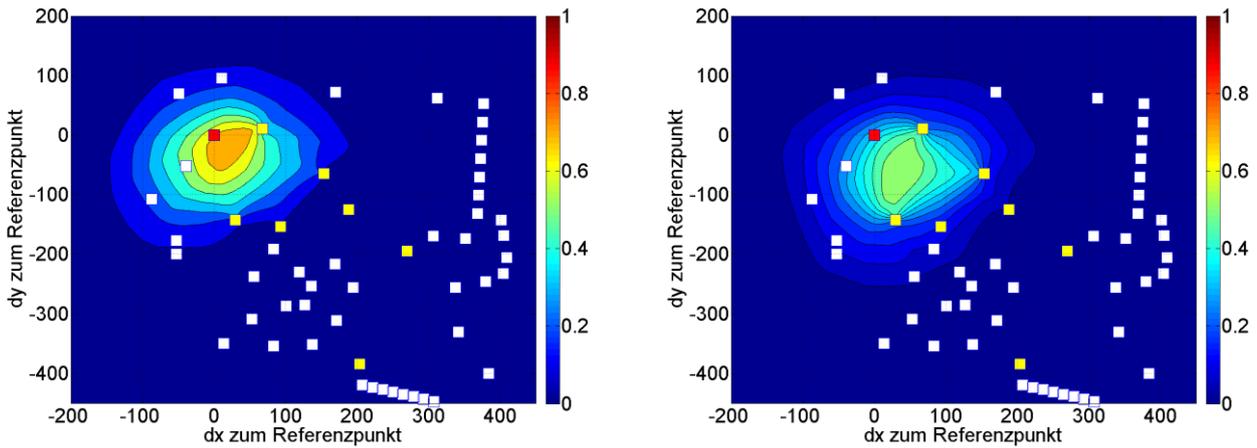


Abbildung 50: Möglichkeitsraum basierend auf sieben verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz und Richtung qualitativ) des Chemieturms (rot), ausgehend von verschiedenen Relata (gelb); links [0,689; 0,202], rechts [0,345; 0,456]

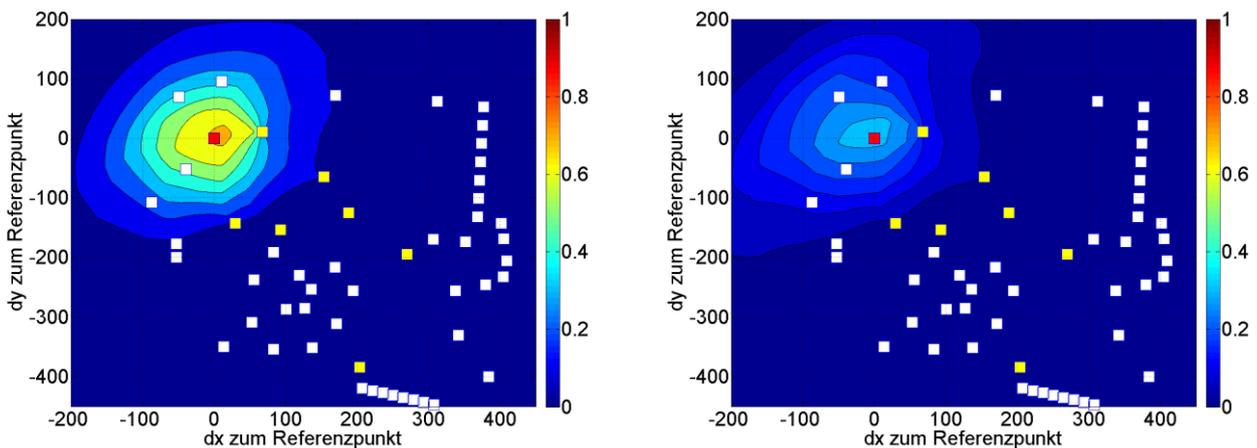


Abbildung 51: Möglichkeitsraum basierend auf sieben verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz qualitativ/quantitativ, Richtung qualitativ) des Chemieturms (rot), ausgehend von verschiedenen Relata (gelb); links [0,707; 0,279], rechts [0,316; 0,679]

Tabellarisch sind die den Möglichkeitsräumen zugrundeliegenden Hypothesen im Anhang F (Tabelle 16 bis Tabelle 21, Seiten 96 ff.) aufgeführt. Die in den Abbildungen dargestellten Möglichkeitsräume, von sowohl konsistenten, als auch inkonsistenten Beschreibungsmengen sind äußerst kompakt. Dies lässt den Rückschluss zu, dass das Bewertungsverfahren bei der Kombination verbaler Relationen verschiedener Relata sehr robust ist. Gestützt wird diese Aussage durch Abbildung 52, welche den Möglichkeitsraum, aufgespannt durch alle 70 Relationen, darstellt. Dieser ist ebenfalls außerordentlich kompakt und lässt eine eindeutige Identifikation des intendierten Objektes zu. Durch Berücksichtigung der Bedingung,  $\Pi(O) > N(O)$ , lässt sich der Möglichkeitsraum zudem zweckmäßig auf seinen Kern reduzieren.

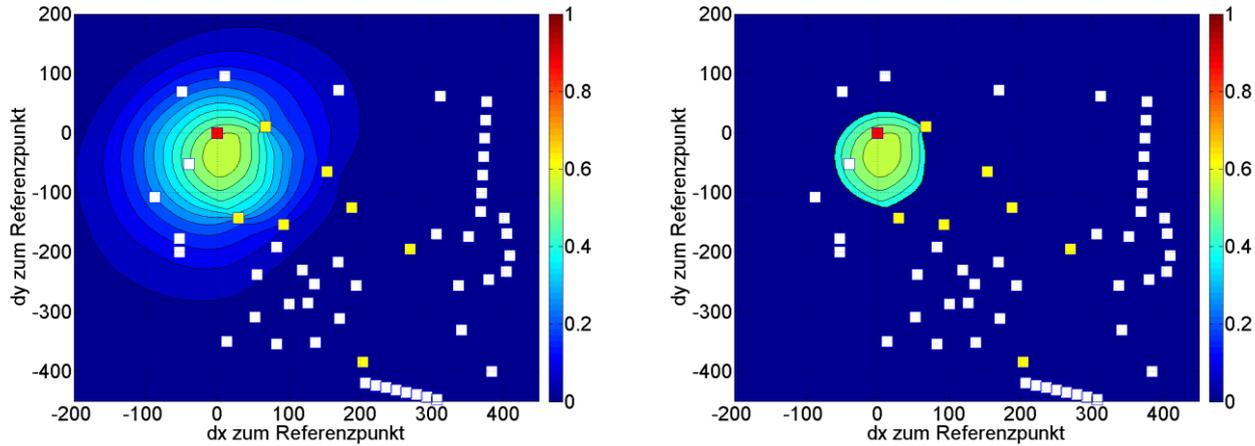


Abbildung 52: Möglichkeitsraum basierend auf 70 verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz qualitativ/ quantitativ, Richtung qualitativ) des Chemieturms (rot), ausgehend von verschiedenen sieben Relata (gelb); Bewertung  $[0,542; 0,410]$ , rechts mit Bedingung:  $\Pi(O) > N(O)$

## 6.2 Verifikation der Bewertungsparameter

Der Einfluss der Bewertungsparameter auf die Möglichkeitsräume bezieht sich nicht auf deren Lage, sondern einzig auf die Höhe der abzuleitenden Bewertung und ist in Abbildung 41 und Abbildung 42 dargestellt. Da dieser Einfluss auf der rein subjektiven Einschätzung von erfahrenem Stabspersonal beruht, ist dessen Richtigkeit schwierig empirisch zu verifizieren. So beurteilte ebenfalls geschultes Stabspersonal der Branddirektion Karlsruhe diese Effekte bei ausführlichen Tests auf Basis der Lagedarstellung im Prototypen Seneca (vgl. Kapitel 7, Seite 80). Dabei wurde sowohl die grundsätzliche Darstellungsweise, wie auch die parameterbedingten Bewertungsunterschiede als sehr intuitiv und plausibel empfunden.

## 6.3 Verifikation des Clusteralgorithmus

Die Verifikation des Clusteralgorithmus erfolgt ebenfalls auf Basis des Verifikationskorpus. Aus diesem wurden Referenzierungen verschiedener intendierter Objekte gemeinsam verarbeitet, mit dem Ziel diese clustern zu können. Dabei ist das Clustern der Hypothesen-Menge von objektiv entfernten Objekten zuverlässig (vgl. Abbildung 44, Seite 70). Allgemein kritisch hingegen ist die Trennschärfe des Clusteralgorithmus beim Clustern einer Hypothesen-Menge von objektiv nahen Objekten. Die Trennschärfe wird beim vorliegenden Algorithmus von der Unschärfe der verbalen Referenzierung vorgegeben. Dargestellt ist dies in den folgenden Abbildungen, welche die bestimmten Cluster von jeweils 20 Hypothesen der Objektlage von Mensa und Sprachzentrum (vgl. Abbildung 53) sowie Mensa und AKK-Gebäude (vgl. Abbildung 54) unter Bezug zum Relatum (Chemieturm) illustrieren.

Obwohl die Distanzen zwischen den intendierten Objekten jeweils ähnlich sind (vgl. Tabelle 10), wurden Mensa und Sprachzentrum als separate Cluster erkannt (vgl. Abbildung 53), Mensa und AKK-Gebäude jedoch nicht (vgl. Abbildung 54). Dies begründet sich durch die unterschiedliche Schärfe der genutzten Referenzierungskonzepte (Richtung: qualitativ; Distanz: quantitativ). So beträgt die Winkeldifferenz zwischen den intendierten Objekten der Abbildung 53 zwar nur  $0,07\pi$ , die Distanzdifferenz zum Relatum allerdings beträgt etwa 160 Meter und ist somit eindeutig trennbar. Die Winkeldifferenz der in Abbildung 54 dargestellten intendierten Objekte beträgt  $0,32\pi$ , die Distanzdifferenz zum Relatum hingegen lediglich 21 Meter. Somit entsprechen die Lageunterschiede der beiden Objekte den Unschärfebereichen der jeweils genutzten Relationen, was die Hypothesen nicht trennbar macht (vgl. Abbildung 54).

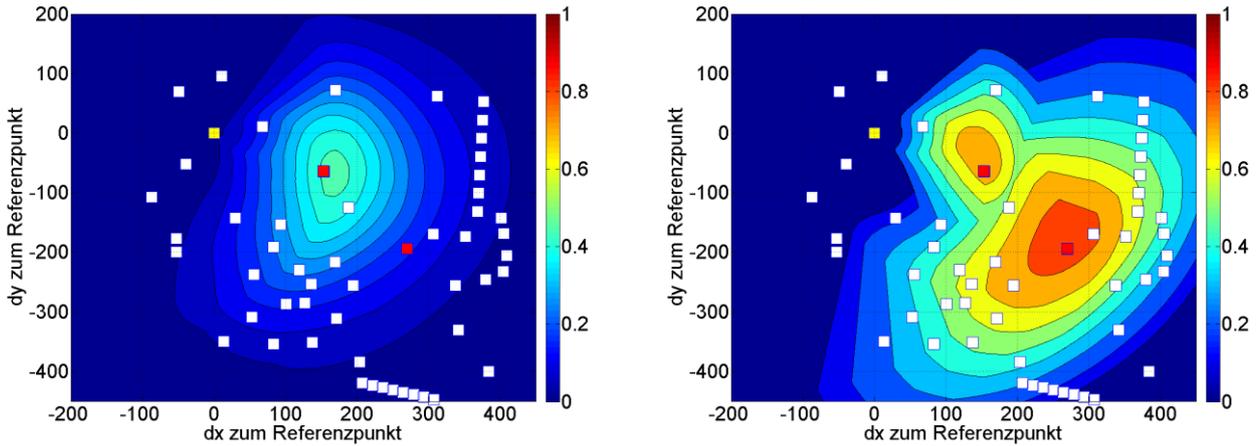


Abbildung 53: Möglichkeitsraum basierend auf jeweils zehn verbalen Beschreibungen der Lage zweier Objekte (Mensa, Sprachzentrum, rot), unter Verzicht (links) und unter Nutzung des Clusteralgorithmus

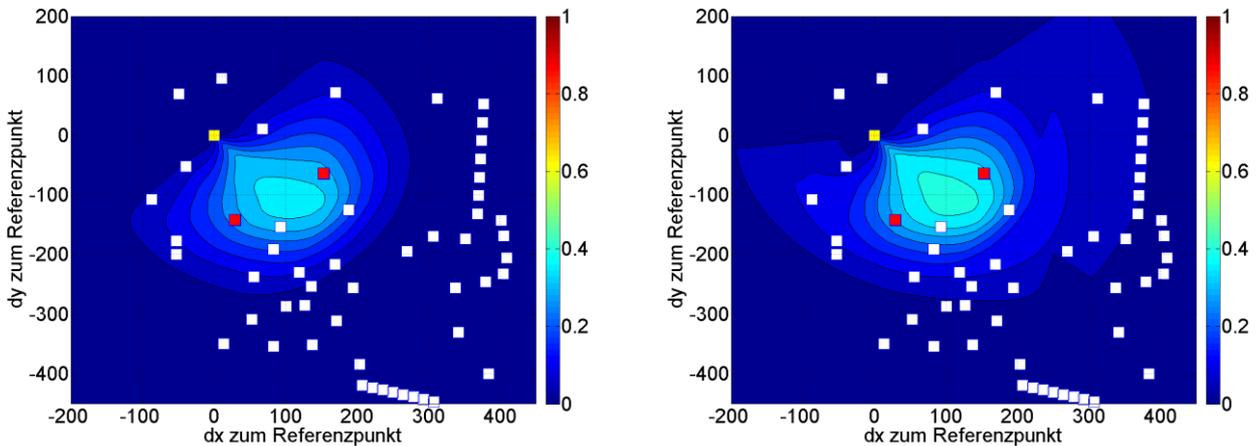


Abbildung 54: Möglichkeitsraum basierend auf jeweils zehn verbalen Beschreibungen der Lage zweier Objekte (Mensa, AKK-Gebäude, rot), unter Verzicht (links) und unter Nutzung des Clusteralgorithmus

	AKK	Mensa	Sprachzentrum	[AKK-Mensa]	[Mensa-Sprachzentrum]
$\Delta d$	145 m	166 m	332 m	140 m	174 m
$\Delta \varphi$	-	-	-	$0,32\pi$	$0,07\pi$

Tabelle 10: Längen- und Winkeldifferenzen der Lage intendierter Objekte, bezogen auf das Relatum

Ferner erfolgt eine Fokussierung der Möglichkeitsräume durch das Clustern der Hypothesen. So basieren die in Abbildung 45 (Seite 71) und Abbildung 53 (rechts) dargestellten Möglichkeitsräume auf der gleichen Hypothesen-Menge. Dennoch unterscheidet sich die konkrete Objektbewertung, speziell des Sprachzentrums (Abbildung 45 (Seite 71, rechts) -  $[0,517; 0,454]$ ; Abbildung 53 (rechts) -  $[0,844; 0,156]$ ). Begründet wird dieser Unterschied durch das Verwerfen zweier Hypothesen des Sprachzentrums, welche nachweislich zur Inkonsistenz der Hypothesen-Menge beitragen.

## 6.4 Zusammenfassung

Anhand des Verifikationskorpus konnte nachgewiesen werden, dass die entwickelten Raumkonzepte zur Ermittlung der Möglichkeitsräume eine eindeutige Objektidentifikation erlauben. Erwartungsgemäß ist der entwickelte Ansatz bei der Berücksichtigung verschiedener Objektsichten robuster. Ferner konnte nachgewiesen werden, dass der Clusteralgorithmus ein Trennen der Hypothesen-Menge hinsichtlich der intendierten Objekte zuverlässig erlaubt. Die räumliche Auflösung bestimmt sich dabei über die Unschärfe der zugrundeliegenden Referenzierungen.

## 7 Validierung der Methodik durch den operationellen Prototyp Seneca

Die Verifikation des Bewertungsverfahrens erbrachte den Nachweis, dass die entwickelte Methodik wahre Ergebnisse im Sinne der Erwartungen liefert. Nun ist jedoch der Beweis zu führen, dass die Methodik auch den Rahmenanforderungen der Praxis entspricht. Die Validierung erfolgt entsprechend durch die Entwicklung eines operationellen Prototyps namens *Seneca*.

### 7.1 Realisierung des Prototypen

Ziel des Prototyps ist es, die entwickelte Methodik geschlossen in einer konkreten Anwendungsschale zu repräsentieren. Dafür war neben der Ontologie und der Algorithmik ebenfalls eine Nutzerschnittstelle zur Meldungseingabe, eine graphische Benutzeroberfläche sowie eine Visualisierungskomponente zu implementieren. Gesamtheitlich sollte dies im Sinne des Aussehens und der Handhabung<sup>58</sup> gängigen Ergonomievorstellungen entsprechen, um eine intuitive Bedienung durch das Stabpersonal zu ermöglichen. Bildschirmfotos des Prototypen sind in Abbildung 55 dargestellt.

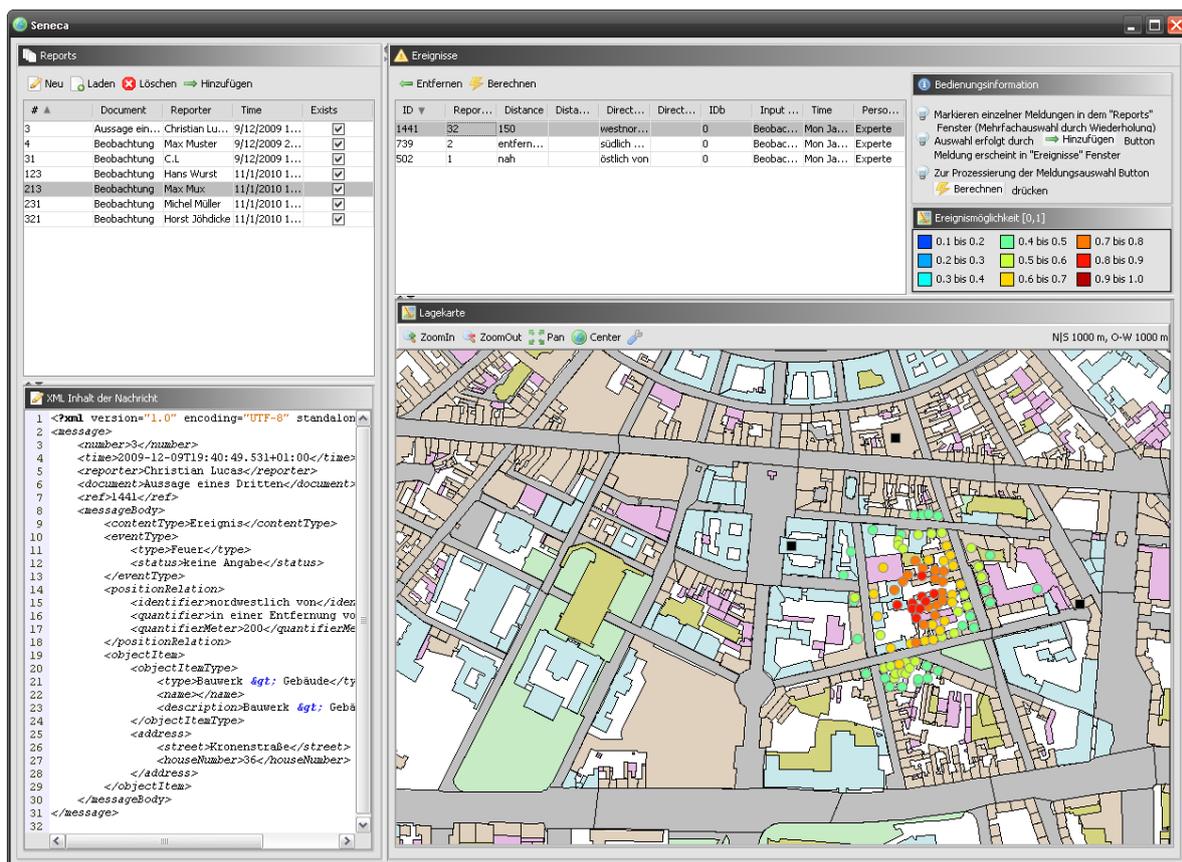


Abbildung 55: Bildschirmfoto des Prototypen Seneca

Entwickelt wurde der Prototyp Seneca plattformunabhängig in der Programmiersprache Java. Diese ist frei nutzbar und bietet die Vorteile moderner Programmiersprachen, welche u.a. die Objektorientierung, eine komfortable Handhabung von Ausnahmesituationen oder die Nutzung höherer Programmierumgebungen sind (vgl. [Java, 2009], [Eclipse, 2009]). Ferner existieren für Java diverse Programmierschnittstellen und Bibliotheken.

<sup>58</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *look and feel*.

Eine solche Softwarekomponente ist MapObjekts der Firma ESRI, welche dank ihres Funktionsumfangs sowohl zur Visualisierung, wie auch zum Datenimport der Ontologie genutzt werden konnte.

Ausschlaggebend für die Akzeptanz des geschlossenen Systems ist neben der Bedienfreundlichkeit auch die Performanz im Sinne einer Echtzeitfähigkeit. Diese Anforderung wurde entsprechend bei allen Entwurfsentscheidungen vordergründig berücksichtigt. Die grundlegende Architektur ist schematisch in Abbildung 56 (Seite 79) dargestellt.

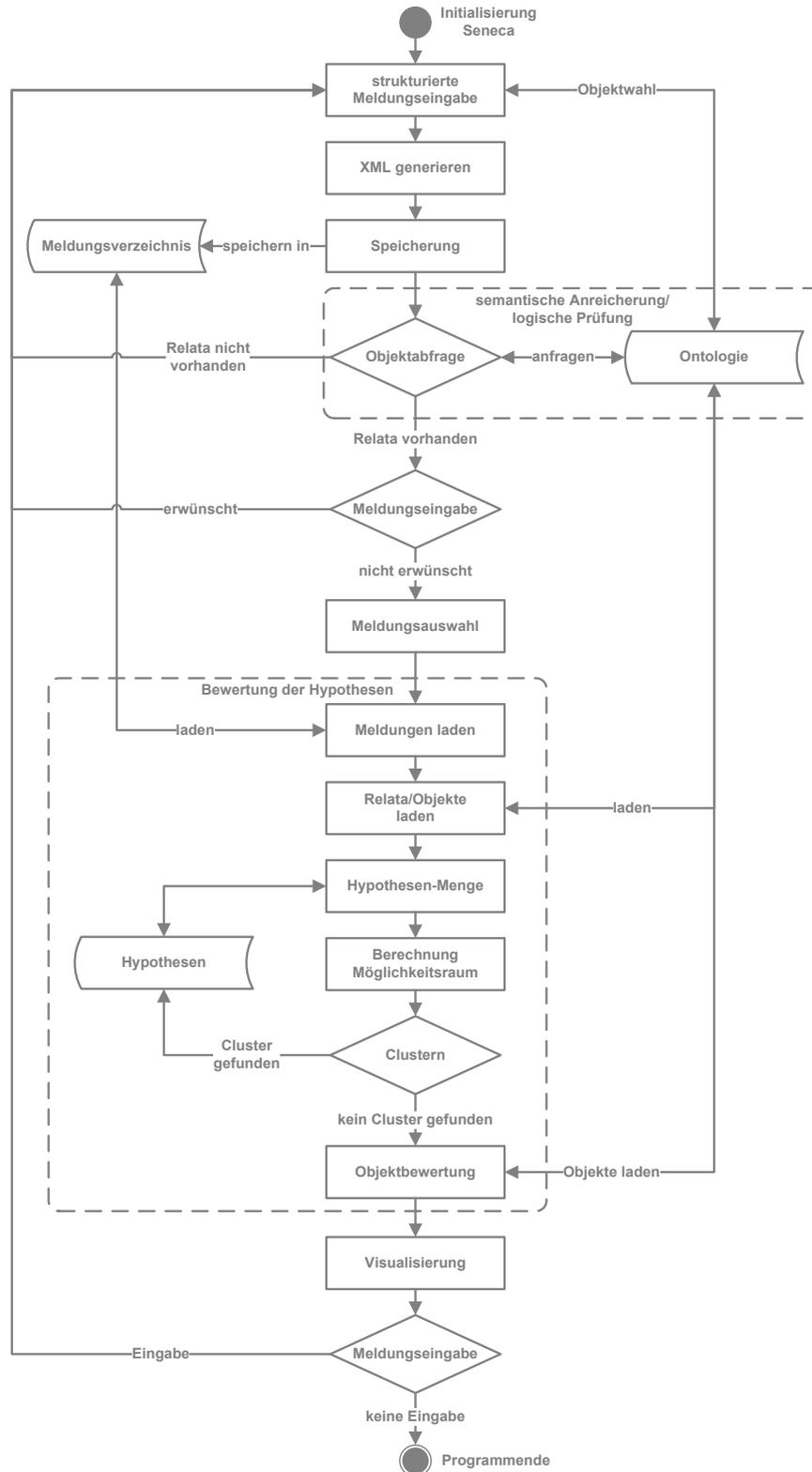


Abbildung 56: Rahmenstruktur

## 7.2 Nutzerschnittstelle des Prototypen

Die Nutzerschnittstelle zur Meldungseingabe in Form einer standardisierten Eingabemaske erlaubt es dem Operateur die eingehenden Fakten formalisiert in das System einzupflegen (vgl. Abbildung 57). Dies ermöglicht, eine bedeutungserhaltende Strukturierung der Information. Bei der Eingabe wurde zudem eine direkte Rückkopplung mit der Wissensbasis angestrebt, welche es dem System ermöglicht die Auswertbarkeit eines Faktums unmittelbar abzuschätzen. Um gegebenenfalls eine Informationsextraktionskomponente implementieren zu können, erfolgt die Faktumverarbeitung und -historisierung auf Basis der normbasierten Auszeichnungssprache XML (Extensible Markup Language).

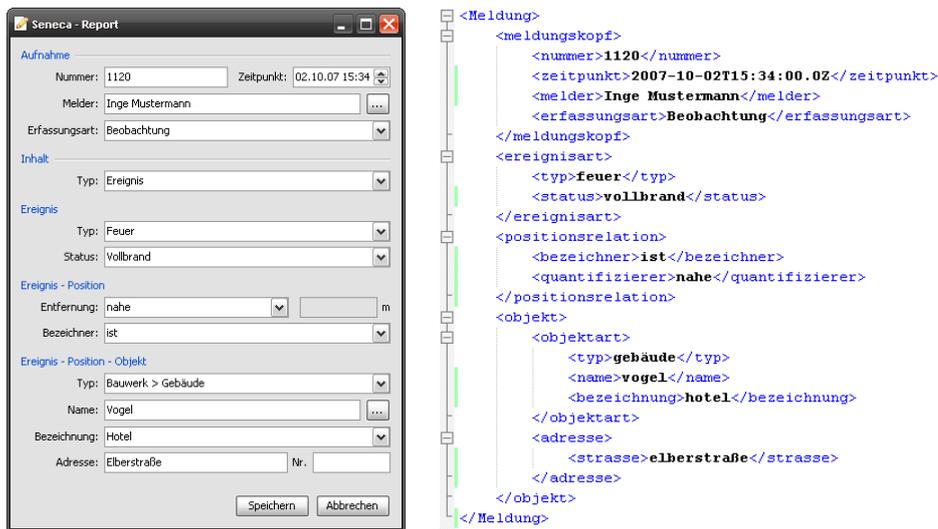


Abbildung 57: Meldungsform des Prototypen Seneca (links) sowie aus der Meldung generiertes XML (rechts)

## 7.3 Visualisierung

Die Erwartung hinsichtlich der Visualisierung war eine instinktiv erfassbare Darstellung mit einem Minimum an Interpretationsbedarf. Ferner sollte es möglich sein, eine Bewertung objektscharf abzugreifen. Realisiert wurde dies über eine intuitiv deutbare, punktuelle Farbkodierung auf dem jeweiligen Objekt. Diese Visualisierungsmethode erweckt, durch die statische Punktgröße, bei einer kleinmaßstäbigen Abbildung der Karte einen regionalen Eindruck, erlaubt jedoch bei einer großmaßstäbigen Abbildung eine objektscharfe Bewertungszuordnung (vgl. Abbildung 58).

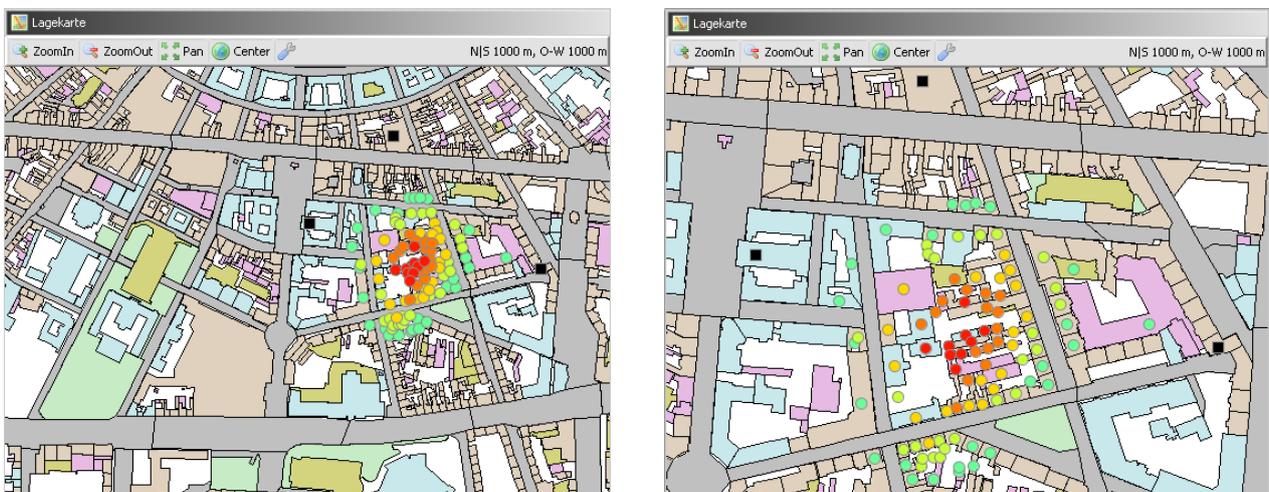


Abbildung 58: Visualisierungskomponente des Prototypen Seneca im kleinen (links) und großen (rechts) Abbildungsmaßstab

## 7.4 Datenhintergrund

Die Datengrundlage des Prototypen ist ein 1000 mal 1000 Meter umfassender Ausschnitt des Automatisierten Liegenschaftskatasters (ALK), bereitgestellt vom Liegenschaftsamt der Stadt Karlsruhe. Dieser umfasst neben den polygonalen und zentralen Objektkoordinaten ebenfalls Attributinformation über die Objektarten, die Nutzungsarten, die Adressen der Gebäude sowie deren intrinsischen Vorderseiten. Diese Information konnte über eine entwickelte Schnittstelle vollautomatisch in der Ontologie instanziiert werden. Manuell wurden lediglich Objektnamen oder Alternativbezeichnungen hinterlegt.

## 7.5 Zusammenfassung

Es gelang einen Prototyp zu entwickeln, der die in dieser Ausarbeitung vorgestellten Verfahren zur automatisierten Verarbeitung verbaler Rauminformation schwerpunktmäßig umsetzt. Eine Vorführung vor erfahrenem Stabpersonal zeigte zudem, dass sowohl der Bedarf, wie auch die Bereitschaft zur Nutzung bestehen.

Im Sinne der Zielvorstellung konnte ferner nachgewiesen werden, dass das entwickelte Verfahren vollautomatisch und performant umsetzbar ist.

## 8 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Ansatz zur automatisierten Verarbeitung textuell gegebener Geoinformation vorgestellt. Dabei fokussierte die Zielstellung auf die Entwicklung eines ganzheitlichen Verfahrens, welches neben der rein geometrischen, ebenfalls eine semantische Ebene einbezieht. Dennoch erfolgten einige Idealisierungen, um die Problemstellung einzugrenzen. Aus einer Öffnung dieser ergeben sich Fragestellungen, welche in weiterführenden Arbeiten zu beantworten sind. So wird grundlegend davon ausgegangen, dass es sich bei der textuell gegebenen Geoinformation um unscharfe Beschreibungen scharf abgrenzbarer Objekte handelt. Einer Weiterentwicklung bedarf es, sowie unscharfe respektive unbekannt dimensionierte Objekte vorliegen. Im Kontext des Katastrophenmanagements ist ein derartiges Szenario beispielsweise bei Schadstoffausbreitungen gegeben. Die Lageinformation referiert dabei auf eine Schadstoffwolke unbekannter Ausdehnung. Eine mögliche Lösung dieser Problemstellung wird jedoch ebenfalls in einer ganzheitlichen Betrachtung, unter Berücksichtigung semantischer und funktionaler Aspekte gesehen. So sind die Eigenschaften und Attribute unscharfer Objekte ontologisch in einer Wissensbasis zu modellieren. Davon ausgehend könnte das intendierte Objekt verfahrenskonform im Sinne eines unscharfen Konzeptes funktional modelliert und somit verarbeitet werden. Im Grunde idealisiert dieser Ansatz jedoch erneut, da wiederum davon ausgegangen wird, dass alle unscharfen Objekte hinsichtlich ihrer Eigenschaften in der Wissensbasis umfassend modelliert sind. Eine Problemstellung die ebenfalls in diesem Kontext auftritt ist die Modellierung der temporalen Aspekte derart dynamischer Objekte.

Eine weitere Idealisierung ist durch die inhärente Annahme des definierten Skalenbereiches gegeben (vgl. Kapitel 2.4.1, Seite 19, [Montello, 1993]). Wird diese gesicherte Umgebung verlassen, so ist neben den weiteren Skalenbereichen ebenfalls ein widerspruchsfreier und stetiger Skalenübergang zu formulieren. Gegeben ist diese Problemstellung bei der Verarbeitung unstrukturierter Geoinformation, wie sie beispielsweise in dem öffentlich einsehbaren Tagebuch<sup>59</sup> Twitter vorliegt (vgl. [Twitter, 2010]). Eine Lösung könnte jedoch ebenfalls in einer Repräsentation der Skalenbereiche im Sinne unscharfer Konzepte bestehen. Diese Herangehensweise ermöglicht es konkret, die Plausibilität jedes Skalenbereiches abzuwägen, was sowohl eine Skalenentscheidung, als auch einen stetigen Übergang sichert. Zur Verarbeitung gänzlich unstrukturierter Information ist des Weiteren eine adäquate Informationsextraktion erforderlich. Eine solche Komponente ist beispielsweise durch die Software *GATE* verfügbar (vgl. [Cunningham et al., 2002]). Deren Nutzung erfordert jedoch wiederum eine exakte Kenntnis der Domäne sowie der genutzten Termini zur semantischen Annotation sprachlicher Konzepte, womit erneut Idealisierungen einhergehen. Eine Nutzung des entwickelten Ansatzes im Kontext unstrukturierter Information öffentlicher Tagebücher bedingt jedoch noch weitere Probleme genereller Art. Die vorliegend domänenspezifische Wissensbasis ist dafür auf einem primär abstrakten Niveau zu formulieren. Dies ist erforderlich um unbekannte Objekte auf Basis einer konzeptionellen Ähnlichkeit zu bekannten Objekten der Wissensbasis semantisch anreichern zu können. Dieser Vorschlag zum Vorgehen ist allerdings detailliert zu prüfen.

In dem Kontext öffentlicher Tagebücher ist die Semantik räumlicher Präpositionen in verschiedenen Zielsprechen zu beachten. So können sprachlich homologe Konzepte, wie beispielsweise *in* und *innerhalb*, in Taxonomien formuliert werden. Die sprachspezifische Semantik, welche sich durch die Bedeutungsmächtigkeit der jeweiligen Zielsprache ergibt, ist jedoch differenziert zu beschreiben. So besitzt im deutschen die Präposition *vor* eine sowohl zeitliche, als auch räumliche Bedeutung. Im englischen hingegen wird durch *before* und *in front of* zwischen den zeitlichen und räumlichen Konzepten unterschieden. Dieser Sachverhalt hat einen nachweislichen Einfluss auf den Gültigkeitsraum der jeweiligen Relation, welcher funktional zu berücksichtigen ist.

Ferner können die bestehenden Betrachtungen auf semantischer und funktionaler Ebene erweitert werden. So zeigten erste Untersuchungen, dass die Einbeziehung regionaler wie auch konzeptioneller Nachbarschaften nutzbare Kontextinformation bereitstellt (vgl. [Gold, 1992]). Der Informationsgewinn wird dabei beispielsweise in der Bestimmung, respektive Nutzung von Gefährdungspotentialen zur Hypothesenstützung gesehen, wie auch in der Auflösung nachbarschaftlicher Referenzierungen. Funktional sind regionale Nachbarschaften basierend auf Voronoi Diagrammen, sowie unter Nutzung der Delaunay Triangulation für jedes Objekt geometrisch bestimmbar. Konzeptionelle Nachbarschaften hingegen sind auf Basis der ontologischen Modellierung ableitbar.

---

<sup>59</sup> Englischsprachiger Fachterminus: *blog* oder auch *weblog*.

Unter Einbeziehung von rückgekoppelter Information im Sinne von Verlaufsinformation wäre des Weiteren eine Prädiktion konkreter Hypothesen vorstellbar.

Von Interesse ist ferner eine Untersuchung der Eignung des entwickelten Verfahrens im Kontext von Routenbeschreibungen. Diese wäre durchaus vorstellbar, da es sich bei Routenbeschreibungen um Aufdatierungen räumlicher Referenzen handelt, wie sie Kern dieser Ausarbeitung waren. Eine Eignung zur Bearbeitung kumulativer räumlicher Referenzen konnte schon in Kapitel 5.3.4 (Seite 62) nachgewiesen werden. Auszubauen wäre dabei jedoch die semantische Modellierungsebene, da sich diese gänzlich unterscheidet.

International wird die Themenstellung der computergestützten Verarbeitung verbaler Information zwar grundsätzlich von verschiedenen aktiven Communitys verfolgt, jedoch liegt deren Schwerpunkt zumeist außerhalb der vorliegend definierten Zielstellung. So wird mehrheitlich eine Anwendung im Routing oder in der Analyse von Landmarken fokussiert. Die Resultate der vorliegenden Ausarbeitung stellen jedoch ebenfalls für die noch offenen Fragen dieser Themengebiete nützliche Erfahrungen sowie Erkenntnisse bereit.

## 9 Verzeichnisse

### 9.1 Literaturverzeichnis

- [Bähr, 2001] Bähr, H.-P. (2001). The Power of the Links. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 1, Seiten 23–31.
- [Bähr, 2005] Bähr, H.-P. (2005). Sprache - ein Datentyp der Bildanalyse. In Bähr, H.-P. und Vögtle, T., Editoren, *Digitale Bildverarbeitung - Neue Entwicklungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS*, Volume 4, Kapitel 2.6, Seiten 217–234. Wichmann Verlag Heidelberg.
- [Bähr und Lenk, 2002] Bähr, H.-P. und Lenk, H. (2002). Steps to Cognition in Image Analysis and in Philosophy - a Comparison. In *Proc. of ISPRS*, Volume XXXI, Comm. VI, Part B6, Seiten 13–17.
- [Barkowsky, 2001] Barkowsky, T. (2001). Mental processing of geographic knowledge. *Spatial Information Theory. Foundations of Geographic Information Science : Int. Conf.*, Seiten 371–386.
- [Barkowsky, 2002] Barkowsky, T. (2002). *Mental representation and processing of geographic knowledge*. Nummer 2541 in *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer Berlin.
- [Biewer, 1997] Biewer, B. (1997). *Fuzzy Methoden: Praxisrelevante Rechenmodelle und Fuzzy-Programmiersprache*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [Borgelt und Kruse, 2001] Borgelt, C. und Kruse, R. (2001). Unsicherheit und Vagheit: Begriffe, Methoden, Forschungsthemen. *Künstliche Intelligenz, Themenheft Unsicherheit und Vagheit*, 15(3), Seiten 5–8.
- [Bridgeman und Tamassia, 1998] Bridgeman, S. und Tamassia, R. (1998). Difference metrics for interactive orthogonal graph drawing algorithms. In *Graph Drawing*, Volume 1547/1998 der *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 57–71. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Clarke, 1981] Clarke, B. L. (1981). A calculus of individuals based on "connection". *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 22(3), Seiten 204–218.
- [Clementini et al., 1997] Clementini, E., Di Felice, P., und Hernandez, D. (1997). Qualitative representation of positional information. *Artificial Intelligence*, 95, Seiten 317–356.
- [Cunningham et al., 2002] Cunningham, H., Maynard, D., Bontcheva, K., und Tablan, V. (2002). Gate: A framework and graphical development environment for robust nlp tools and applications. In *Proc. of the 40th Annual Meeting of the ACL*.
- [Dehak et al., 2005] Dehak, S. M. R., Bloch, I., und Maitre, H. (2005). Spatial reasoning with incomplete information on relative positioning. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 27(9), Seiten 1473–1484.
- [Dubois und Prade, 1988] Dubois, D. und Prade, H. (1988). *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. Plenum Press.
- [Duda et al., 2002] Duda, R., Hart, P.-E. und Stork, G.-D. (2002). *Pattern Classification*. Wiley-Interscience, 2. Edition.
- [Dyckhoff und Pedrycz, 1984] Dyckhoff, H. und Pedrycz, W. (1984). Generalized means as a model of compensative connectives. *Fuzzy Sets and Systems*, 14, Seiten 143–154.
- [Eclipse, 2009] Eclipse (2009). <http://www.eclipse.org/>, (aufgerufen am 11.12.2009).
- [Egenhofer und Franzosa, 1991] Egenhofer, M. und Franzosa, B. (1991). Point-Set topological spatial relations. *Int. Journal of Geographical Information Systems*, 5(2), Seiten 161–174.
- [Egenhofer und Herring, 1991] Egenhofer, M. und Herring, J. (1991). Categorizing binary topological relations between regions, lines, and points in geographic databases. Technischer Report, Department of Surveying Engineering, University of Maine.
- [Egenhofer und Mark, 1995] Egenhofer, M. und Mark, D. (1995). Naive geography. In Frank, A. und Kuhn, W., Editoren, *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS*, Volume 988, Seiten 1–15. Springer-Verlag.

- [Egenhofer et al., 1994] Egenhofer, M., Mark, D., und Herring, J. (1994). The 9-intersection: Formalism and its use for natural language spatial predicates. Technischer Report, National Center for Geographic Information and Analysis.
- [Elias, 2006] Elias, B. (2006). *Extraktion von Landmarken für die Navigation*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Universität Hannover.
- [Frank, 1992] Frank, A. (1992). Qualitative spatial reasoning about distances and directions in geographic space. *Journal of Visual Languages and Computing*, 3, Seiten 343–371.
- [Freksa, 1992] Freksa, C. (1992). Using orientation information for qualitative spatial reasoning. In Frank, A., Campari, I., und U., F., Editoren, *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space*, Seiten 162–178. Springer.
- [GLL, 2009] GLL (2009). <http://www.gll.niedersachsen.de>, (aufgerufen am 17.12.2009).
- [Gold, 1992] Gold, C. M. (1992). The meaning of "neighbour". In *Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*, Volume 639 der *Lecture Notes In Computer Science*, Seiten 220–235. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [Goyal, 2000] Goyal, R. (2000). *Similarity Assessment for Cardinal Directions Between Extended Spatial Objects*. Dissertation, University of Maine.
- [Grice, 1975] Grice, P. (1975). Logic and conversation. In Cole, P. und Morgan, J., Editoren, *Syntax and Semantics*, Volume 3 der *Speech Acts*, Seiten 41–58. New York: Academic Press.
- [Gruber, 1993] Gruber, T.-R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. In *Knowledge Acquisition*, Seiten 199–220. X.
- [GUM, 1995] GUM (1995). Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. Technischer Report, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN).
- [Guo et al., 2008] Guo, Q., Liu, Y., und Wieczorek, J. (2008). Georeferencing locality descriptions and computing associated uncertainty using a probabilistic approach. *Int. Journal of Geographical Information Science*, 22(10), Seiten 1067 – 1090.
- [Güting, 1988] Güting, R. (1988). Geo-relational algebra: A model and query language for geometric database systems. In Schmidt, J., Ceri, S., und Missikoff, M., Editoren, *Advances in Database Technology, Proc. of the Int. Conf. on Extending Database Technology*, Seiten 506–527.
- [Haar, 1976] Haar, R. (1976). Computational models of spatial relations. Technical Report TR-478 MCS-72-0361-10 47, Department of Computer Science, University of Maryland.
- [Hartung et al., 2005] Hartung, J., Elpelt, B., und Klösener, K.-H. (2005). *Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*, Volume 14. R. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH München Wien.
- [Hernandez, 1994] Hernandez, D. (1994). *Qualitative Representation of Spatial Knowledge*, Volume 804 der *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer-Verlag.
- [Herrmann und Schweizer, 1998] Herrmann, T. und Schweizer, K. (1998). *Sprechen über Raum: sprachliches Lokalisieren und seine kognitiven Grundlagen*. Verlag Hans Huber.
- [Horrocks, 2005] Horrocks, I. (2005). Owl: A description logic based ontology language. In *Proc. of Int. Conf. on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2005)*, Volume 3709 der *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 5–8. Springer.
- [Jähne, 2005] Jähne, B. (2005). *Digitale Bildverarbeitung*. 6. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- [Java, 2009] Java (2009). <http://java.sun.com/>, (aufgerufen am 11.12.2009).
- [Johansson et al., 2004] Johansson, R., Williams, D., Berglund, A., und Nugues, P. (2004). Carsim: A system to visualize written road accident reports as animated 3d scenes. In *Proc. of the 2nd Joint SAIS/SSLS Workshop Artificial Intelligence and Learning Systems*, Seiten 76–86, Lund, Sweden.
- [Jones und Botterell, 2005] Jones, E. und Botterell, A. (2005). Common Alerting Protocol (CAP). Technischer Report v1.1, OASIS Emergency Management TC.

- [Jones et al., 2006] Jones, E., Raymond, M., Webb, S., und Aymond, I. (2006). Emergency Data Exchange Language (EDXL) Distribution Element. Technischer Report 1.0, OASIS Emergency Management TC.
- [KBSI, 1993] KBSI (1993). Integration definition for information modeling (idef1x). Technischer Report, Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, Computer Systems Laboratory.
- [Klippel, 2003] Klippel, A. (2003). *Wayfinding choremes. Conceptualizing wayfinding and route direction elements*. Dissertation, Universität Bremen.
- [Klippel und Winter, 2005] Klippel, A. und Winter, S. (2005). Structural salience of landmarks for route directions. In Cohn, A. und Mark, D., Editoren, *Spatial Information Theory*, Volume 3693 der *Lecture Notes In Computer Science*, Seiten 347–362. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [Klir, 1999] Klir, G.-J. (1999). On fuzzy-set interpretation of possibility theory. *Fuzzy Sets and Systems*, 108, Seiten 263–273.
- [Leidner et al., 2003] Leidner, J., Sinclair, G., und Webber, B. (2003). Grounding spatial named entities for information extraction and question answering. In *Proc. of the Works. on the Analysis of Geographic References, Joint Conf. for Human Language Technology and the Annual Meeting of the North American Chapter of the Ass. for Computational Linguistics 2003 (HLT/NAACL'03)*, Seiten 31–38, Edmonton, Alberta, Canada.
- [Lucas et al., 2008] Lucas, C., Müller, M., und Bähr, H.-P. (2008). Integration of Language in GIS: Models in Ownership Cadastre and Disaster Management. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 3, Seiten 217–225.
- [Mavrovouniotis und Stephanopoulos, 1990] Mavrovouniotis, M. L. und Stephanopoulos, G. (1990). Formal order-of-magnitude reasoning in process engineering. In *Readings in qualitative reasoning about physical systems*, Seiten 323–336. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- [MESA, 2006] MESA, T. S. G. (2006). MayDayML - Emergency Data Exchange Standard. Technischer Report TS 70.004 2 V2.0.0, Mobility for Emergency and Safety Applications (MESA).
- [MIP, 2005] MIP (2005). Command and Control Information Exchange Data Model, (C2IEDM). Technischer Report, Multilateral Interoperability Programme.
- [MIP, 2007] MIP (2007). Joint Command, Control and Consultation Information Exchange Data Model, (JC3IEDM). Technischer Report, Multilateral Interoperability Programme.
- [Montello, 1993] Montello, D. (1993). Scale and multiple psychologies of space. In *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS*, Volume 716 der *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 312–321. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Nagao, 1990] Nagao, M. (1990). *Knowledge and Inference*. Academic Press Inc., San Diego, Boston, London, Sydney, New York, Tokyo, Toronto.
- [Natvig, 1981] Natvig, B. (1981). Possibility versus Probability. *Fuzzy Sets and Systems*, 10, Seiten 31–36.
- [Pellet, 2010] Pellet (2010). <http://clarkparsia.com/pellet>, (aufgerufen am 05.01.2010).
- [Peuquet und Ci-Xiang, 1987] Peuquet, D. und Ci-Xiang, Z. (1987). An algorithm to determine the directional relationship between arbitrarily-shaped polygons in the plane. *Pattern Recognition*, 20(1), Seiten 65–74.
- [Preparata und Shamos, 1993] Preparata, F. P. und Shamos, M. I. (1993). *Computational Geometry*. Nummer 5 in Monographs in Computer Science. Springer.
- [Pribbenow, 1992] Pribbenow, S. (1992). *Zur Verarbeitung von Lokalisierungsaustrücken in einem hybriden System*. IWBS Report 211, IBM Germany Science Center, Institute for Knowledge Based Systems.
- [Protege, 2009] Protege (2009). <http://protege.stanford.edu/> (aufgerufen am 11.12.2009).
- [Randal, 1988] Randal, D. (1988). *Approaches to Knowledge Representation*, Kapitel Semantic Networks, Seiten 45–80. Knowledge-Based and Expert Systems Series. Research Studies Press LTD.
- [Randell et al., 1992] Randell, D. A., Cui, Z., und Cohn, A. G. (1992). A spatial logic based on regions and connection. In *Proc. of the 3rd Int. Conference on Knowledge Representation and Reasoning*.

- [Raubal und Winter, 2002] Raubal, M. und Winter, S. (2002). Enriching wayfinding instructions with local landmarks. In Egenhofer, M. und Mark, D., Editoren, *Geographic Information Science: 2nd Int. Conf.*, Volume 2478 der *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 243–259. Springer.
- [Renz, 2002] Renz, J. (2002). *Qualitative Spatial Reasoning with Topological Information*, Volume 2293 der *Lecture Notes in Computer Science*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [Russell, 1923] Russell, B. (1923). Vagueness. *Australian Journal of Psychology and Philosophy*, 1, Seiten 84–92.
- [Schade et al., 2006] Schade, U., Frey, M., und Dürr, G. (2006). Abschlussbericht SOKRATES - Ontologiegestützte semantische Anreicherung für Interoperabilität und Lagedarstellung. Technischer Report, Forschungsinstitut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie.
- [Sirin et al., 2007] Sirin, E., Parsia, B., Grau, B., Kalyanpur, A., und Katz, Y. (2007). Pellet: A practical OWL-DL reasoner. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 5(2), Seiten 51–53.
- [SKK, 1999] SKK (1999). Leitung im Einsatz: Entwurf einer Dienstvorschrift (DV 100). Technischer Report, Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz.
- [Sowa, 1995] Sowa, J. (1995). Top-level ontological categories. *Int. Journal of Human-Computer Studies*, 43(5-6), Seiten 669–685.
- [Spott, 2000] Spott, M. (2000). *Schliessen mit unscharfen Begriffen*. Dissertation, Fakultät für Informatik der Universität Fridericiana zu Karlsruhe.
- [Stegmüller, 1970] Stegmüller, W. (1970). *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie*. Nummer Band II Theorie und Erfahrung. Springer.
- [Stuckenschmidt, 2009] Stuckenschmidt, H. (2009). *Ontologien : Konzepte, Technologien und Anwendungen*. Informatik im Fokus. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [Sun, 2008] Sun, H. (2008). Computational models for computing fuzzy cardinal directional relations between regions. *Knowledge-Based Systems*, 21(7), Seiten 599 – 603.
- [Tenbrink, 2005] Tenbrink, T. (2005). Semantics and application of spatial dimensional terms in english and german. Technischer Report 004-03/2005, Transregional Collaborative Research Center SFB/TR 8 Spatial Cognition Universität Bremen / Universität Freiburg.
- [Twitter, 2010] Twitter (2010). <http://twitter.com/>, (aufgerufen am 05.01.2010).
- [Wieczorek et al., 2004] Wieczorek, J., Guo, Q., und Hijmans, R. (2004). The point-radius method for georeferencing locality descriptions and calculating associated uncertainty. *Int. Journal of Geographical Information Science*, 18, Seiten 745–767.
- [Winter et al., 2005] Winter, S., Raubal, M., und Nothegger, C. (2005). Focalizing measures of salience for wayfinding. In Meng, L., Zipf, A., und Reichenbacher, T., Editoren, *Map-based Mobile Services -Theories, Methods and Implementations-*, Seiten 125 – 139. Springer Berlin Heidelberg.
- [Wolff, 1736] Wolff, C. (1736). *Philosophia prima sive Ontologia*. Nachdruck der 2. Aufl. Frankfurt. Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1962.
- [Yager, 1980a] Yager, R.-R. (1980a). Aspects of possibistic uncertainty. *Int. Journal of Man-Machine Studies*, 12(3), Seiten 283–298.
- [Yager, 1980b] Yager, R.-R. (1980b). On a general class of fuzzy connectives. *Fuzzy Sets and Systems*, 4(3), Seiten 235–242.
- [Yager, 1986] Yager, R.-R. (1986). A modification of the certainty measure to handle subnormal distributions. *Fuzzy Sets and Systems*, 20, Seiten 317–324.
- [Zadeh, 1965] Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, Seiten 338–353.
- [Zadeh, 1978] Zadeh, L. (1978). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, Seiten 3–28.
- [Zimmermann, 1995] Zimmermann, K. (1995). Measuring without measures - The Delta-Calculus. In Frank, A. U. und Kuhn, W., Editoren, *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS*, Volume 988 der *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 59–67. Springer.

## 9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erscheinungsformen von perfektem ( $\textcircled{P}$ ) und imperfektem Wissen .....	15
Abbildung 2: graphische Repräsentation der entsprechend der Metrik zulässigen topologischen Relationen von $\Omega_R$ .....	18
Abbildung 3: Unterteilung der Kardinalrichtungen in Level <sub>1-4</sub> .....	24
Abbildung 4: Unterteilung der acht Kardinalrichtungen mit neutraler Zone ( $\emptyset$ ) .....	25
Abbildung 5: vektorbasierte Richtungsrelationen zwischen Relatum R und intendiertem Objekt $O_i$ (links), räumliche Richtungsrelationen mit 8 Richtungen in Vektorsicht (mittig) sowie deren inverse Relation (rechts) .....	25
Abbildung 6: ein östlich des Relatum R gelegenes Objekt O liegt im Gültigkeitsbereich der Relation nördlich .....	26
Abbildung 7: Verschiebung der Richtungsrelation entlang der Relationenachse (gestrichelter Pfeil) bis zum Schnitt mit den Eckpunkten der Umrandungsbox (gestrichelt) .....	26
Abbildung 8: komplexe Objektszene mit Relatum R und intendiertem Objekt $O_i$ .....	27
Abbildung 9: Relatum R wird von einer Umrandungsbox (gestrichelt) umschlossen, welche den Mittelpunkt des umgebenden Orientierungsregionenmodelles bildet .....	27
Abbildung 10: Semantik der durch den RCC5 definierten topologischen Relationen ( $\Omega_{RCC5}$ , oben) sowie die Relationensemantik des regionenbasierten Schnittmengenmodells ( $\Omega_{4IM}$ , unten) .....	29
Abbildung 11: durch die Punkt-Radius Methode bestimmter Unsicherheitsbereich der Beispielaussage 9 km nordöstlich von Bakersfield im lokalen Koordinatensystem, mit Bakersfield im Ursprung .....	30
Abbildung 12: semantisches Netz als Categoriesystem (links) und mit konkreten Objekten (rechts) getrennt durch eine gestrichelte Linie .....	33
Abbildung 13: unabhängige Superklassen des $DM^2$ inklusive ihrer Relationen .....	37
Abbildung 14: Entitäten der Superklasse Objekt .....	38
Abbildung 15: Subklassen der Superklasse Objekt .....	38
Abbildung 16: Modellierung der Objekteigenschaften eines Gebäudes .....	38
Abbildung 17: Modellierung der Objektklasse Lokation .....	39
Abbildung 18: Subklassen der Superklasse Aktion .....	39
Abbildung 19: Modellierung der Superklasse ReportDaten .....	40
Abbildung 20: topologische Interpretation der modellierten Objektrelationen (links) sowie das darauf aufbauende Inferenznetz (rechts, gestrichelt) .....	41
Abbildung 21: innerstädtische räumliche Ausgangsszene (links); schematische Darstellung der Möglichkeitsräume (grün) basierend auf einem mehrdeutigen Faktum (dunkelgrau: Relata; rechts) ...	50
Abbildung 22: Bewertung nach Betrachtung eines zweiten Faktums (links); resultierende Objektbewertung (hohe Bewertung: rot, mittlere Bewertung: gelb und grün, niedrige Bewertung: blau; rechts) .....	50
Abbildung 23: Szene des Campus Süd des KIT zur Erhebung der raumkognitiven Wahrnehmung (im relativen Koordinatensystem); zugunsten der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Bahnstation Durlacher Tor (Bestandteil der Szene) verzichtet .....	52
Abbildung 24: Häufigkeitsdichte der Residuen in Klassen zu 50 Meter Breite (blau) und die Dichtefunktion der Normalverteilung (rot; links); gemittelte Residuen unter Bezug zur geschätzten und wahren Entfernung (blau) mit Regressionspolynom ersten Grades (rot) und Schätzungshypothese (grün; rechts) .....	53
Abbildung 25: Histogramm der residualen Klassenhäufigkeit (blau) nach Eliminierung des Schätzfehlers sowie $N(\mu_0, \sigma_0^2)$ -Dichte (rot; links); Häufigkeitsdichte der normierten Residuen (blau) mit $N(\mu_0, \sigma_0^2)$ -Dichte (rot; rechts) .....	54

Abbildung 26: mittlere Standardabweichung (m) der geschätzten Entfernungen des Skalenbereichs in Klassen von 25 Meter (Punkte) und deren Regressionsgerade (Linie) .....	55
Abbildung 27: Zugehörigkeitsfunktion der quantitativen Distanzrelation 200 Meter (links) und 500 Meter (rechts).....	56
Abbildung 28: normierte Häufigkeit der Nutzung der Relation nah in Abhängigkeit zur wahren Objektentfernung (links); Approximation der Verteilung durch eine gaußsche Exponentialfunktion (rechts) .....	56
Abbildung 29: Approximation der Verteilung durch eine gaußsche Exponentialfunktion (blau: nah, grün: mittel, rot: fern; links); abgeleitete Zugehörigkeitsfunktionen (blau: nah, grün: mittel, rot: fern; rechts) .....	57
Abbildung 30: Überlagerung der approximierten Residuen des Level <sub>2</sub> (cyan), Level <sub>3</sub> (grün) und Level <sub>4</sub> (rot; links); Häufigkeitsdichte der Richtungsschätzungen mit $N(\mu_0, \sigma_0^2)$ -Dichte (rot; rechts).....	59
Abbildung 31: normierte Häufigkeit der Residuen (Level <sub>2</sub> : cyan, Level <sub>3</sub> : grün, Level <sub>4</sub> : rot) und einschließende Bewertungsfunktion (blau; links); Bewertungsfunktion für Richtungsschätzungen im Wertebereich von null bis zwei $\pi$ (rechts) .....	59
Abbildung 32: Möglichkeitsraum der kombinierten Distanz- und Richtungsrelation 250 Meter östlich (links) und nah östlich (rechts) im relativen Koordinatensystem (Relatum: roter Punkt) .....	60
Abbildung 33: Möglichkeitsraum der Relation 100 Meter östlich ausgehend von einem zweidimensionalen Relatum (20 x 20 Meter) im relativen Koordinatensystem (links); gleiche Szene wie links, allerdings mit einem geometrisch verschiedenen Relatum irregulärer Form im relativen Koordinatensystem (rechts).....	61
Abbildung 34: stützpunktbestimmter Möglichkeitsraum der Relation 100 Meter östlich ausgehend von dem in Abbildung 33 (links) dargestellten Relatum im relativen Koordinatensystem (links); stützpunktbestimmter Möglichkeitsraum der Relation 250 Meter östlich des Ettlinger Tor Center (Karlsruhe) im relativen Koordinatensystem (rechts).....	61
Abbildung 35: dominante quantitative Distanzrelationen (nah: blau, mittel: grün, fern: rot) im Vergleich zu den jeweiligen diskreten Relationen (gestrichelt) .....	62
Abbildung 36: Möglichkeitsraum der Kernrelation, hier 250 Meter östlich, mit markiertem Zoomfenster (links); Dezimierung der Kernrelation durch Abzug „unmöglicher“ Beobachtungsstandorte (dunkelblau, rechts).....	63
Abbildung 37: Möglichkeitsräume der Kernrelation (Konturlinien) sowie der Zielrelation 350 Meter südlich (Regionen) im relativen Koordinatensystem (links); Differenzendiagramm der Zielrelation unter Berücksichtigung und Vernachlässigung des Objektabzuges (rechts).....	63
Abbildung 38: Distanzkomponente der Objektrelation zwischen (hier für die Distanz der Relata von 500 Metern; links); Breitenkomponente der Objektrelation, bestimmt auf Basis des Winkels (rechts) .....	65
Abbildung 39: Möglichkeitsraum der Relation zwischen zweier Objekte (weiße Quadrate) in einer Distanz von 300 Metern (links) und einer Distanz von 500 Metern (rechts) im relativen Koordinatensystem .....	65
Abbildung 40: Diagramm der temporalen Gültigkeit eines Faktums .....	66
Abbildung 41: Möglichkeitsraum aufgespannt durch zehn Lagebeschreibungen der Mensa (rotes Viereck) relativ zum Chemieturm (gelbes Viereck, Koordinatennull) mit optimalen Beobachtungsparametern (links) und unter Anwendung der Bedingung $\Pi(O)$ größer $N(O)$ (rechts) - weiße Quadrate: Position weitere Gebäude der Szene.....	67
Abbildung 42: gleiche Situation wie in Abbildung 41, allerdings unter veränderten Beobachtungsparametern $\Pi_M = 0,9$ ; $\Pi_E = 0,9$ (links) sowie mit $\Pi_E = 0,8$ (rechts).....	68
Abbildung 43: auf den Möglichkeitsräumen basierende Clusterbildung.....	69
Abbildung 44: Möglichkeitsraum basierend auf jeweils zehn verbalen Beschreibungen der Lage zweier Objekte (AKK-Gebäude, Sprachzentrum) unter Verzicht (links) und unter Nutzung des Clusteralgorithmus (rechts).....	70

Abbildung 45: Möglichkeitsraum basierend auf zehn verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz quantitativ, Richtung qualitativ) der Mensa (links, [0,728; 0,209]) und des Sprachzentrums (rechts, [0,517; 0,454]); (gelb: Relatum, rot: intendiertes Objekt).....	71
Abbildung 46: Möglichkeitsraum basierend auf zehn verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz und Richtung qualitativ) der Mensa (links, [0,563; 0,302]) und des Sprachzentrums (rechts, [0,372; 0,610]); (gelb: Relatum, rot: intendiertes Objekt).....	72
Abbildung 47: Möglichkeitsraum basierend auf zehn verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz qualitativ/quantitativ, Richtung qualitativ) der Mensa (links, [0,674; 0,207]) und des Sprachzentrums (rechts, [0,535; 0,394]); (gelb: Relatum, rot: intendiertes Objekt).....	72
Abbildung 48: Möglichkeitsraum basierend auf zehn verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz quantitativ, Richtung qualitativ) des Studentenwerks (links, [0,385; 0,356]) und des Durlacher Tors (rechts, [0,384; 0,388]); (gelb: Relatum, rot: intendiertes Objekt).....	73
Abbildung 49: Möglichkeitsraum basierend auf sieben verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz quantitativ, Richtung qualitativ) des Chemieturms (rot), ausgehend von verschiedenen Relata (gelb); links [0,798; 0,176], rechts [0,614; 0,507].....	73
Abbildung 50: Möglichkeitsraum basierend auf sieben verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz und Richtung qualitativ) des Chemieturms (rot), ausgehend von verschiedenen Relata (gelb); links [0,689; 0,202], rechts [0,345; 0,456].....	74
Abbildung 51: Möglichkeitsraum basierend auf sieben verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz qualitativ/quantitativ, Richtung qualitativ) des Chemieturms (rot), ausgehend von verschiedenen Relata (gelb); links [0,707; 0,279], rechts [0,316; 0,679].....	74
Abbildung 52: Möglichkeitsraum basierend auf 70 verbalen Beschreibungen der Lage (Distanz qualitativ/quantitativ, Richtung qualitativ) des Chemieturms (rot), ausgehend von verschiedenen sieben Relata (gelb); Bewertung [0,542; 0,410], rechts mit Bedingung: $\Pi(O) > N(O)$ .....	75
Abbildung 53: Möglichkeitsraum basierend auf jeweils zehn verbalen Beschreibungen der Lage zweier Objekte (Mensa, Sprachzentrum, rot), unter Verzicht (links) und unter Nutzung des Clusteralgorithmus.....	76
Abbildung 54: Möglichkeitsraum basierend auf jeweils zehn verbalen Beschreibungen der Lage zweier Objekte (Mensa, AKK-Gebäude, rot), unter Verzicht (links) und unter Nutzung des Clusteralgorithmus.....	76
Abbildung 55: Bildschirmfoto des Prototypen Seneca.....	78
Abbildung 56: Rahmenstruktur des Prototypen Seneca.....	79
Abbildung 57: Meldungsmaske des Prototypen Seneca (links) sowie aus der Meldung generiertes XML (rechts).....	80
Abbildung 58: Visualisierungskomponente des Prototypen Seneca im kleinen (links) und großen (rechts) Abbildungsmaßstab.....	80
Abbildung 59: räumliche Beispielszene mit Haus, Baum, Eichhörnchen und Auto.....	92

## 9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisunterschiede der Operationen nah + <sub>d</sub> nah, nah + <sub>d</sub> fern sowie fern + <sub>d</sub> fern bei der Nutzung der drei Distanzsysteme, angewandt auf die vierteilige Wertmenge $D_4 = \{\text{sehr nah, nah, fern, sehr fern}\}$ .....	21
Tabelle 2: geometrische Interpretation der Relationenaddition angewandt auf die dreiteilige Wertmenge $D_d = \{\text{nah, mittel, fern}\}$ .....	21
Tabelle 3: Basisrelationen des Größenvergleichsverfahrens nach [Mavrovouniotis und Stephanopoulos, 1990] 23	
Tabelle 4: tabellarische Gegenüberstellung der Distanzsysteme (Bedingung: ✓- erfüllt, ✗-nicht erfüllt) .....	32
Tabelle 5: tabellarische Gegenüberstellung der Richtungssysteme (Bedingung: ✓- erfüllt, ✗-nicht erfüllt) .....	32
Tabelle 6: tabellarische Gegenüberstellung der Topologiesysteme (Bedingung: ✓- erfüllt, ✗- nicht erfüllt, ○- nicht vergleichbar) .....	32
Tabelle 7: tabellarische Gegenüberstellung der kombinierten Verfahren (Bedingung: ✓-erfüllt, ✗- nicht erfüllt) 32	
Tabelle 8: empirische Varianz und Exzess als Dispersionsmaße der Häufigkeitsverteilung.....	58
Tabelle 9: Bewertung der entwickelten Verfahren hinsichtlich der Zielstellung (Bedingung: ✓- erfüllt, ✗ - nicht erfüllt, ○ - nicht vergleichbar) .....	70
Tabelle 10: Längen- und Winkeldifferenzen der Lage intendierter Objekte, bezogen auf das Relatum .....	76
Tabelle 11: „wahre“ Lage der Validierungsobjekte (Distanz in Meter, Richtung in Level <sub>3</sub> Relation).....	95
Tabelle 12: verbale Raumrelationen von zehn Passanten zur räumlichen Lage der Mensa im Bezug zum Relatum (vgl. Abbildung 23; Zeile 1: Richtung, Zeile 2: quantitative Distanz, Zeile 3: quantitative Distanz, Zeile 4: gemischte Distanzen) .....	95
Tabelle 13: verbale Raumrelationen von zehn Passanten zur räumlichen Lage des Sprachzentrum im Bezug zum Relatum (vgl. Abbildung 23; Zeile 1: Richtung, Zeile 2: quantitative Distanz, Zeile 3: quantitative Distanz, Zeile 4: gemischte Distanzen) .....	95
Tabelle 14: Intervallbewertung der intendierten Objekte basierend auf qualitativen Richtungs- und quantitativen Distanzschätzungen (Bedingung: ✓- erfüllt, ✗-nicht erfüllt).....	96
Tabelle 15: Intervallbewertung der intendierten Objekte basierend auf qualitativen Richtungs- und Distanzschätzungen (Bedingung: ✓- erfüllt, ✗-nicht erfüllt).....	96
Tabelle 16: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 49, links.....	96
Tabelle 17: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 49, rechts.....	96
Tabelle 18: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 50, links.....	97
Tabelle 19: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 50, rechts.....	97
Tabelle 20: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 51, links.....	97
Tabelle 21: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 51, rechts.....	97

## 9.4 Algorithmenverzeichnis

Algorithmus 1: Clusteralgorithmus (Modellierungssprache JANA) .....	69
---	----

## 10 Anhang

### 10.1 Anhang A: Räumliche Beispielszene

Im Verlauf der Ausarbeitung wurde eine räumliche Beispielszene weitgehend widerspruchsfrei aufgebaut. Dabei wurde bewusst auf eine graphische Darstellung verzichtet, zum einen um dem Leser die Möglichkeit zu geben, diese Szene sukzessive und frei auszubauen ohne gedanklich eingeschränkt zu werden, und zum anderen, um beispielhaft auch davon abweichen zu können. Um dennoch Gewissheit bezüglich dieser räumlichen Konstellation zu schaffen, löst Abbildung 59 dieses Gedankenkonstrukt auf.

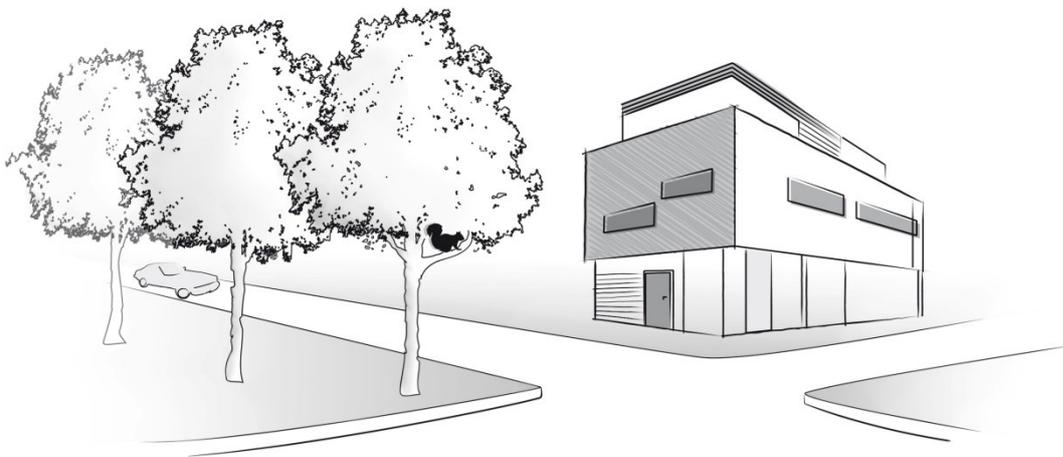


Abbildung 59: räumliche Beispielszene mit Haus, Baum, Eichhörnchen und Auto

### 10.2 Anhang B: Geometrische Grundlagen

#### 10.2.1 $L_p$ -Metrik zur Distanzbestimmung

Der  $L_p$ -Raum ist eine Verallgemeinerung des normierten  $n$ -dimensionalen Vektorraumes (vgl. [Preparata und Shamos, 1993]). Die Abbildung  $d := P \times \dots \times P \in \mathbb{R}^n$  zwischen zwei Punkten  $p_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$  einer beliebigen Punktmenge  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  in diesem endlich dimensionalen Vektorraum erfolgt nach:

$$d_q(p_1, p_2) = \left( \sum_{j=1}^n |p_{1j} - p_{2j}|^q \right)^{1/q} \quad 10.1$$

Herunter gebrochen auf den hier vorliegenden zweidimensionalen Fall entspricht dies der euklidischen Norm  $\|x\|_2$  und wird folglich euklidischer Abstand, im Weiteren  $d_{eukl}$ , genannt.

#### 10.2.2 Winkelbestimmung im Polar- und Vektorraum

Ein Winkel zwischen zwei Vektoren  $v_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$  einer beliebigen Vektormenge  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  im  $n$ -dimensionalen Vektorraum  $V \times \dots \times V \in \mathbb{R}^n$ , in dem das Skalarprodukt  $\langle v_i, v_j \rangle$  definiert ist, wird bestimmt durch:

$$\varphi(v_1, v_2) = \arccos \frac{\langle v_1, v_2 \rangle}{|v_1||v_2|} \quad 10.2$$

mit  $\varphi \in [0, 2\pi]$

Die Bestimmung der Richtungswinkel zwischen zwei Punkten  $p_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$  einer beliebigen Punktmenge  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  im polaren Raum, hier gegeben als Sonderfall des euklidischen Raumes, abgebildet in die euklidische Ebene  $P \times P \in \mathbb{R}^2$ , ergibt sich ohne Fallunterscheidung durch:

$$\varphi(p_1, p_2) = (\text{sgn}\Delta p_y + 1 - |\text{sgn}\Delta p_y|) \cdot \arccos \frac{\Delta p_x}{d_{\text{eukl}}(p_1, p_2)} \quad 10.3$$

mit  $\Delta p_x = x_{1,2} - x_{1,1}$

$\Delta p_y = x_{2,2} - x_{2,1}$

$\varphi \in [-\pi, \pi]$

### 10.3 Anhang D: Prädikatenlogik erste Stufe

Die folgenden Betrachtungen beruhen maßgeblich auf den Ausführungen von [Stuckenschmidt, 2009] und sollen einen Einblick in die Formalismen und Notationen der Prädikatenlogik geben.

Die Basis prädikatenlogischer Formeln bilden Terme, welche abstrakte Beschreibungen von realwertigen Objekten, unter Nutzung von Variablen und Funktionen, darstellen. Definiert sind diese wie folgt:

*Term*

Definition 10.1

Jede Variable  $x_i \mid i = 1, \dots, n$  ist ein Term. Sei  $f_i$  ein  $k$ -stelliges Funktionssymbol und sind Terme durch  $t_1, \dots, t_n$  gegeben, so sind auch  $f_i(t_1, \dots, t_n)$  Terme.

Atomare Formeln können durch die wahrheitswertige Anwendung von Prädikaten auf Termen über Aussagen gebildet werden.

*Atomare Formel*

Definition 10.2

Sei  $P_i$  ein Prädikatensymbol der Stelligkeit  $k$  und sind  $t_1, \dots, t_n$  Terme, so ist  $P_i(t_1, \dots, t_n)$  eine atomare Formel. Zudem sei  $t_1 = t_n$  ebenfalls eine atomare Formel.

Basierend auf atomaren Formeln lassen sich komplexe Zustandsaussagen über die Welt wie folgt darstellen:

- Jede atomare Formel  $F_i$  ist eine Formel.
- Sei  $F$  eine Formel, dann ist auch  $\neg F$  eine Formel.
- Seinen  $F_1$  und  $F_2$  Formeln, dann sind auch deren Konjunktion  $F_1 \wedge F_2$ , Disjunktion  $F_1 \vee F_2$  und Implikation  $F_1 \rightarrow F_2$  Formeln.
- Sei  $x_i$  eine Variable und  $F$  eine Formel, dann sind auch  $\forall x_i F$  und  $\exists x_i F$  Formeln.

Die Semantik einer prädikatenlogischen Formel ergibt sich nun durch die Abbildung der Terme und Prädikate auf einer formalen Struktur der realen Welt, dem Universum  $U$ . Ein Universum ist eine nicht leere Menge von Objekten der realen Welt, welche in bestimmten Beziehungen zueinander stehen können. Jede prädikatenlogische Formel bildet nun eine Beschreibung derartiger Beziehungen ab, ohne jedoch Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Die Abbildung der Formel in das Universum erfolgt durch die Interpretationsabbildung  $I$ .

*Interpretationsabbildung*

Definition 10.3

- $I$  weist jedem in der Formel befindlichen  $k$ -stelligem Prädikatensymbol  $P_i$  eine  $k$ -stellige Relation  $P_i^I$  über  $U$  zu.
- $I$  weist jedem in der Formel befindlichen  $k$ -stelligem Funktionssymbol  $f_i$  eine  $k$ -stellige Funktion  $f_i^I$  über den Elementen von  $U$  zu.
- $I$  weist jeder Variablen  $x_i$  und jeder Konstanten  $c_i$  ein Element  $x_i^I$  und  $c_i^I$  von  $U$  zu.
- $I$  weist jedem komplexen Term  $t$  einen entsprechenden Wert  $I(t) = x_i^I$ ,  $I(t) = c_i^I$  oder  $I(t) = f_i^I(t_1^I, \dots, t_n^I)$  zu.

Derart kann garantiert werden, dass jeder Term auf das Universum verweist. Zur Ermittlung der entsprechenden Wahrheitswerte muss überprüft werden, ob die beschriebenen Relationen tatsächlich bestehen. Formal geschieht dies über die Abbildung  $A$ , die jeder Formel einen Wert *falsch* (0) oder *richtig* (1) zuordnet.

*Abbildung atomarer Formeln*

Definition 10.4

- Sei  $F$  eine atomare Formel der Form  $P(t_1, \dots, t_k)$ , so gilt  $A(F) = 1$  falls  $(t_1^I, \dots, t_k^I) \in P^I$ , ansonsten  $A(F) = 0$ .
- Sei  $F$  eine atomare Formel der Form  $t_1 = t_2$ , so gilt  $A(F) = 1$  falls  $t_1^I = t_2^I$  ansonsten  $A(F) = 0$ .

Wahrheitswerte für nicht atomare Formeln lassen sich aus den Wahrheitswerten enthaltener atomarer Formeln ableiten

*Abbildung nichtatomarer Formeln*

Definition 10.5

- Sei  $F$  eine Formel der Form  $\neg G$  so gilt  $A(F) = 1$  falls  $A(G) = 0$ , sonst  $A(F) = 0$ .
- Sei  $F$  eine Formel der Form  $F_1 \wedge F_2$ , so gilt  $A(F) = 1$  falls  $A(F_1) = 1$  und  $A(F_2) = 1$ , sonst  $A(F) = 0$ .
- Sei  $F$  eine Formel der Form  $F_1 \vee F_2$ , so gilt  $A(F) = 1$  falls  $A(F_1) = 1$  oder  $A(F_2) = 1$ , sonst  $A(F) = 0$ .
- Sei  $F$  eine Formel der Form  $F_1 \rightarrow F_2$ , so gilt  $A(F) = 1$  falls  $A(F_2) = 1$  oder  $A(F_1) = 0$ , sonst  $A(F) = 0$ .

Deutlich komplizierter ist die Bestimmung der Wahrheitswerte für quantifizierte Formeln. Dafür müssen unterschiedliche mögliche Abbildungen von Variablen auf dem Universum betrachtet werden.

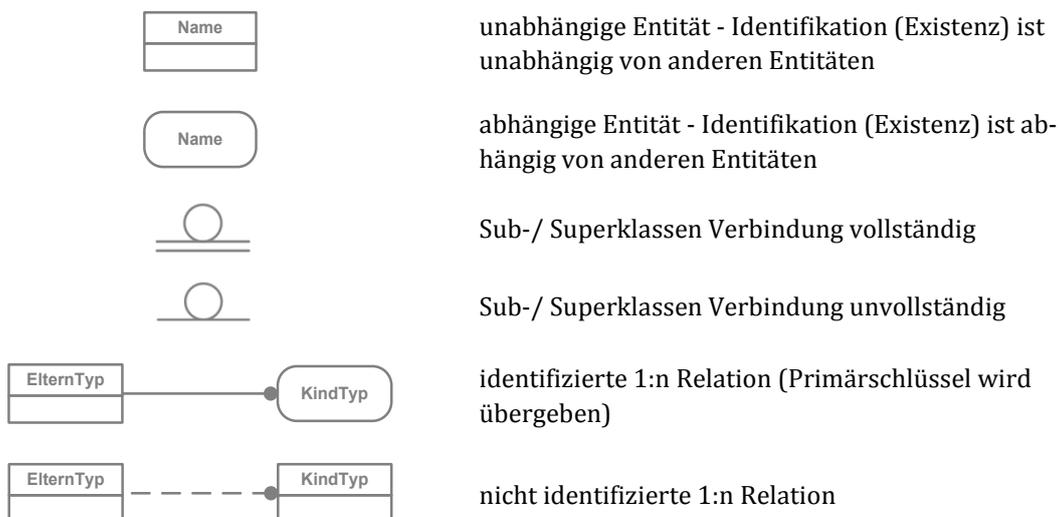
*Abbildung quantifizierter Formeln*

Definition 10.6

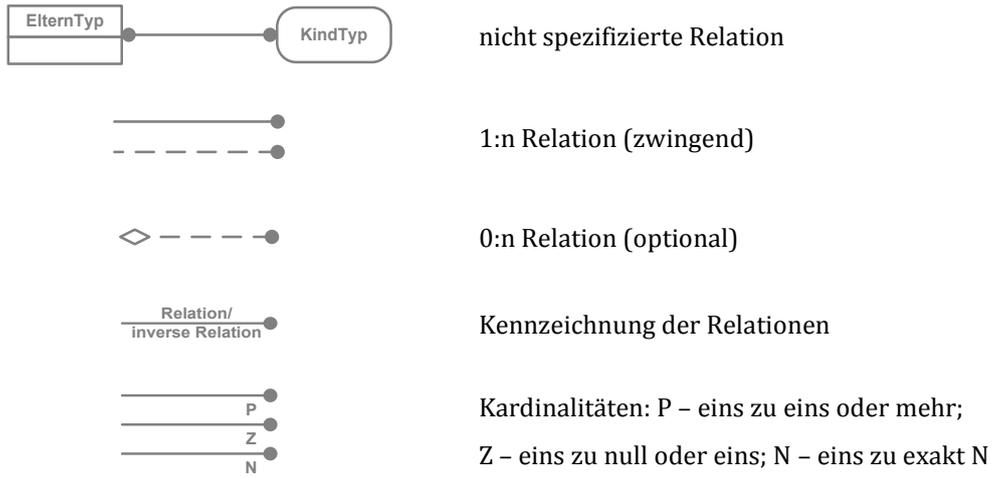
- Sei  $F$  eine Formel der Form  $\forall x G$ , so gilt  $A(F) = 1$  falls  $A(G) = 1$  für alle möglichen Werte  $x^I$  aus  $U$ , ansonsten  $A(F) = 0$ .
- Sei  $F$  eine Formel der Form  $\exists x G$ , so gilt  $A(F) = 1$  falls für einen möglichen Werte  $x^I$  aus  $U$  gilt  $A(G) = 1$ , ansonsten  $A(F) = 0$ .

## 10.4 Anhang E: IDEF1X Notation

IDEF1X ist eine Modellierungssprache aus der IDEF Sprachfamilie<sup>60</sup>, wobei die 1 darauf hinweist, dass es sich um die Modellierung von Informationsstrukturen handelt und das X die Nutzung einer Erweiterung andeutet (vgl. [KBSI, 1993]). Die IDEF1X Notation ist speziell auf das Gegenstands-Beziehungs-Modell (kurz: ERM, Entity-Relationship-Modell) fokussiert. Im Folgenden wird die Bedeutung der möglichen Notationen spezifiziert.



<sup>60</sup> IDEF ist die englischsprachige Abkürzung für *Integrated Definition Methods*.



### 10.5 Anhang F: Wertetabellen zur Verifikation (Kapitel 6)

	Bibliothek	Audimax	AKK	Durlacher Tor	Mensa	Studentenwerk	Sprachenzentrum
Distanz	179,6	68,8	145,7	435,1	166,4	226,3	332,4
Richtung	SSO	0	SSO	SSO	OSO	OSO	SO

Tabelle 11: „wahre“ Lage der Validierungsobjekte (Distanz in Meter, Richtung in Level<sub>3</sub> Relation)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0	0	SO	0	0	0	0	SO
300	100	100	100	80	120	100	130	150	250
mittel	nah	mittel							
300	100	nah	nah	nah	nah	100	130	150	250

Tabelle 12: verbale Raumrelationen von zehn Passanten zur räumlichen Lage der Mensa im Bezug zum Relatum (vgl. Abbildung 23; Zeile 1: Richtung, Zeile 2: quantitative Distanz, Zeile 3: quantitative Distanz, Zeile 4: gemischte Distanzen)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	SO	SW	SO	SO	SO	SO	SO	SO
450	250	400	250	350	200	300	400	550	280
fern	mittel	fern	mittel	fern	mittel	mittel	fern	fern	mittel
450	mittel	400	mittel	350	mittel	mittel	400	550	mittel

Tabelle 13: verbale Raumrelationen von zehn Passanten zur räumlichen Lage des Sprachzentrum im Bezug zum Relatum (vgl. Abbildung 23; Zeile 1: Richtung, Zeile 2: quantitative Distanz, Zeile 3: quantitative Distanz, Zeile 4: gemischte Distanzen)

	$\Pi(O)$	$N(O)$	Objekt gefunden
AKK-Gebäude	0,615	0,311	✓
Audimax	0,656	0,303	✓
Bibliothek	0,568	0,371	✓
Durlacher Tor	0,384	0,388	✗
Mensa	0,728	0,209	✓
Sprachzentrum	0,517	0,454	✓
Studentenwerk	0,385	0,356	✗

Tabelle 14: Intervallbewertung der intendierten Objekte basierend auf qualitativen Richtungs- und quantitativen Distanzschätzungen (Bedingung: ✓- erfüllt, ✗-nicht erfüllt)

	$\Pi(O)$	$N(O)$	Objekt gefunden
AKK-Gebäude	0,659	0,286	✓
Audimax	0,685	0,303	✓
Bibliothek	0,391	0,465	✓
Durlacher Tor	0,377	0,351	✗
Mensa	0,563	0,302	✓
Sprachzentrum	0,372	0,610	✓
Studentenwerk	0,146	0,647	✗

Tabelle 15: Intervallbewertung der intendierten Objekte basierend auf qualitativen Richtungs- und Distanzschätzungen (Bedingung: ✓- erfüllt, ✗-nicht erfüllt)

	Bibliothek	Audimax	AKK	Durlacher Tor	Mensa	Studentenwerk	Sprachzentrum
Distanz	100	30	150	400	100	250	400
Richtung	NW	W	N	NW	W	W	NW

Tabelle 16: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 49, links

	Bibliothek	Audimax	AKK	Durlacher Tor	Mensa	Studentenwerk	Sprachzentrum
Distanz	100	30	70	350	120	70	300
Richtung	NW	NW	N	NW	W	SW	NW

Tabelle 17: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 49, rechts

	Bibliothek	Audimax	AKK	Durlacher Tor	Mensa	Studentenwerk	Sprachenzentrum
Distanz	nah	nah	nah	fern	nah	mittel	mittel
Richtung	N	W	N	NW	W	W	NW

*Tabelle 18: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 50, links*

	Bibliothek	Audimax	AKK	Durlacher Tor	Mensa	Studentenwerk	Sprachenzentrum
Distanz	mittel	nah	nah	mittel	nah	nah	mittel
Richtung	NW	SW	N	NW	W	NW	NW

*Tabelle 19: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 50, rechts*

	Bibliothek	Audimax	AKK	Durlacher Tor	Mensa	Studentenwerk	Sprachenzentrum
Distanz	150	nah	60	fern	nah	mittel	fern
Richtung	N	W	N	NW	W	NW	NW

*Tabelle 20: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 51, links*

	Bibliothek	Audimax	AKK	Durlacher Tor	Mensa	Studentenwerk	Sprachenzentrum
Distanz	mittel	50	70	fern	nah	fern	250
Richtung	NW	W	N	NW	W	W	NO

*Tabelle 21: Wertetabelle der genutzten verbalen Raumrelationen in Abbildung 51, rechts*

