UNIVERSITÄT HAMBURG
FACHBEREICH INFORMATIK

Diplomarbeit

Bestimmung von Position und Sicht des imaginären Wanderers in Routenbeschreibungen

Tobias Bosch
3. Mai 2004

Diplomarbeit am
Fachbereich Informatik
der Universität Hamburg

Betreuer:
Prof. Dr. Christopher Habel
Dr. Carola Eschenbach

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Routenbeschreibungen . . . 1
1.2 Motivation und Einbettung . . . 2
1.3 Positionierungsaussagen . . . 4
1.3.1 Topologische Präpositionen . . . 4
1.3.2 Dimensionale Präpositionen . . . 4
1.3.3 Sonstige lokale Präpositionen . . . 5
1.4 Bewegungsaussagen . . . 6
1.5 Sichtaussagen . . . 6

2 Grundlagen **9**
2.1 Situationen . . . 10
2.1.1 Zustände und Ereignisse . . . 10
2.1.2 Formalisierung . . . 11
2.2 Geometrie . . . 12
2.2.1 Regionen . . . 13
2.2.2 Mereologie . . . 14
2.2.3 Topologie . . . 15
2.2.4 Geraden . . . 16
2.2.5 Ebenen . . . 17
2.2.6 Halbräume . . . 17
2.2.7 Richtungen . . . 18
2.2.8 Pfade . . . 19
2.2.9 Referenzrahmen . . . 19
2.3 Lokalisierung . . . 20
2.3.1 Position . . . 21
2.3.2 Proximale Außenregion . . . 21
2.3.3 Orientierung . . . 22

3 Repräsentationssprache **23**
3.1 Positionierungsaussagen . . . 23
3.1.1 Topologische Präpositionen . . . 24
3.1.2 Dimensionale Präpositionen . . . 24
3.1.3 Sonstige lokale Präpositionen . . . 25
3.2 Bewegungsaussagen . . . 25
3.3 Sichtaussagen . . . 27

4 Beobachtungen **28**
4.1 Stark begrenzte Container . . . 28
4.1.1 Löcher und Enthalten-Relation . . . 29
4.1.2 Explizites Erwähnen . . . 31
4.1.3 Starke Begrenztheit . . . 33
4.1.4 Enthaltensein-Position . . . 35
4.2 Thesen für die Sicht . . . 35
4.2.1 Die Sicht in Positionierungsaussagen . . . 36
4.2.2 Die Sicht in Bewegungsaussagen . . . 38
4.2.3 Die Sicht in Sichtaussagen . . . 40
4.3 Thesen für die Enthaltensein-Position . . . 41
4.3.1 Nicht grenzüberschreitende Entitäten . . . 41
4.3.2 Innere Entitäten . . . 42
4.3.3 Nicht enthaltene Entitäten . . . 42
4.3.4 Grenzöffnungen . . . 43
4.3.5 Direktionale Präpositionen „in“ und „aus“ . . . 44

5 Axiomatisierung der Repräsentationssprache **46**
5.1 Bewegungsverben . . . 46
5.2 Verben des Sehens . . . 47
5.2.1 Sichtlinien und transparente Entitäten . . . 47
5.2.2 Sichtfeld . . . 48
5.3 Lokale Präpositionen . . . 49
5.3.1 Ortsrelationen . . . 49
5.3.2 Einschränkende Relationen . . . 50
5.4 Direktionale Präpositionen . . . 52
5.4.1 Pfad-Relationen . . . 52
5.4.2 Einschränkende Prädikate . . . 53
5.5 Innere Entitäten . . . 56
5.6 Eingänge und Ausgänge . . . 56

6 Auswertung **59**
6.1 Analyse von Routenbeschreibungen . . . 59
6.1.1 Verarbeitung von natürlicher Sprache . . . 59
6.1.2 Sorten in der Analyse . . . 60
6.1.3 Routenbeschreibung eg4 . . . 61
6.1.4 Routenbeschreibung eg5 . . . 64
6.2 Diskussion . . . 69
6.2.1 Bestimmung der Sicht des imaginären Wanderers . . . 69
6.2.2 Bestimmung der Position des imaginären Wanderers . . . 70
6.3 Resümee und Ausblick . . . 71

A Routenbeschreibungen **73**

Abbildungsverzeichnis

2.1 Grundlegende Sorten der Logik 10
2.2 Sortierung der geometrischen Entitäten 13

4.1 Sortierung der Landmarken 29
4.2 Unmögliche Konstellation für „Du bist bei Haus F“ 36
4.3 Sicht in Bewegungsaussagen 39
4.4 Auswirkung der direktionalen Präposition „in“ 44

5.1 Unmögliche Sichtlinien 48
5.2 Einzig mögliche Konstellation für `IN-BOUNDARY-OF` 57
5.3 Modellierung von Eingängen und Ausgängen 58

6.1 Sorten der Analyse 61
6.2 Routenbeschreibung eg4 62
6.3 Routenbeschreibung eg5 65

Kapitel 1

Einleitung

Routenbeschreibungen entstehen dadurch, dass eine Person einer anderen den Weg von einem Ort zu einem anderen in natürlicher Sprache erklärt. Es handelt sich bei Routenbeschreibungen also um eine spezielle Art der Kommunikation über Raum. Sie werden in Abschnitt 1.1 näher beschrieben. In Abschnitt 1.2 wird die Motivation dieser Arbeit sowie ihre Einbettung in den Kontext eines wissenschaftlichen Projektes an der Universität Hamburg erläutert. Die Analysen dieser Arbeit basieren nur auf einem Teil der möglichen Arten von Sätzen in Routenbeschreibungen: *Positionierungs-*, *Bewegungs-* und *Sichtaussagen*. Die Eigenschaften dieser Satzarten werden in den Abschnitten 1.3, 1.4 und 1.5 dargestellt.

In Kapitel 3 wird eine geeignete Repräsentationssprache für Positionierungs-, Bewegungs- und Sichtaussagen eingeführt. Im darauffolgenden Kapitel 4 werden Thesen darüber, welche Aussagen über Position und Sicht ein Mensch automatisch aus diesen Sätzen folgern würde, beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 5 die Repräsentationssprache auf eine solche Art und Weise axiomatisiert, dass diese Thesen ableitbar sind. Die gemeinsamen formalen Grundlagen der Repräsentationssprache, der Beobachtungen und der Axiomatisierung werden zuvor in Kapitel 2 beschrieben. In Kapitel 6 werden schließlich die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert und bewertet.

1.1 Routenbeschreibungen

Um eine Routenbeschreibung zu erzeugen, die einem Fragenden hilft, den Weg von einem Startpunkt zu einem bestimmten Zielpunkt zu finden, muss ein Auskunftgebender drei Aufgaben lösen (vgl. Daniel und Denis 1998): Zunächst muss er eine interne Repräsentation des Raumes aktivieren, in der sowohl der Start- als auch der Zielpunkt enthalten sind. Diese interne Repräsentation ist sehr wahrscheinlich nicht sprachlich, und enthält Informationen über Topologie und Sichtbarkeit. Sie wird oft als *kognitive Karte* oder *mentale Karte* bezeichnet, wobei sie der Metapher der Karte nicht vollständig gerecht wird, da teilweise räumliche Relationen verzerrt gespeichert werden (vgl. Tversky 1993).

Als nächstes muss eine Route in dieser internen Repräsentation geplant werden. Dabei muss die Struktur des Raumes berücksichtigt werden, beispielsweise ob Straßen benutzt oder Hindernisse umgangen werden sollen. Diese Route wird nach bestimmten Kriterien optimal geplant; eines davon ist eine möglichst kurze Gesamtlänge der Route.

Die letzte Aufgabe besteht darin, die Anweisungen zu formulieren, die nötig

sind, um der geplanten Route in der realen Umgebung folgen zu können. Die daraus resultierende Folge von Sätzen wird dann als *Routenbeschreibung* bezeichnet. Dazu nimmt der Auskunftgebende hauptsächlich die Perspektive einer Person ein, die dieser Route vom Start bis zum Ziel folgt (vgl. Denis u. a. 1999). Diese Person wird als *imaginärer Wanderer* bezeichnet, in Anlehnung an den Begriff der *imaginären Wanderung* von Klein (1979).

Die Routenbeschreibung enthält zunächst eine teilweise Beschreibung dessen, was der imaginäre Wanderer während seiner Wanderung entlang der Route wahrnimmt. Außerdem wird darin beschrieben, wie die Fortbewegung an welchen Positionen geändert werden muss, um der Route folgen zu können. Diese Positionen werden als *Reorientierungspunkte* bezeichnet. Der Verlauf der Fortbewegung und die Positionen, an denen sie geändert werden muss, wird hauptsächlich durch *Landmarken* beschrieben, und nicht durch die Angabe von exakten Distanzen oder Winkeln (vgl. Denis u. a. 1999). Landmarken sind Objekte oder Strukturen, die einen Ort markieren und sich von Objekten in ihrer Nähe hervorheben (vgl. Raubal und Winter 2002). Sie spielen eine entscheidende Rolle in Routenbeschreibungen und werden im Umfeld der Positionen, an denen eine Reorientierung stattfinden soll, im allgemeinen gehäuft erwähnt (vgl. Denis u. a. 1999).

Der Instruierte muss, während der Auskunftgebende die Routenbeschreibung gibt, diese verstehen. Dazu erzeugt und speichert er eine mentale Repräsentation der Route, die einerseits räumliche Informationen über die Route und andererseits die Folge von Handlungen, die ausgeführt werden sollen, enthält (vgl. Tschander u. a. 2003). Eine solche Repräsentation enthält nur einen Teil der Objekte und räumlichen Konfigurationen, die der Instruierte während der Ausführung der Routenbeschreibung wahrnehmen wird (vgl. Denis 1997). Da der Auskunftgebende das Konzept des imaginären Wanderers zur Erzeugung von Routenbeschreibungen benutzt, verwendet er die *Routenperspektive* für die Beschreibung räumlicher Informationen, im Gegensatz zur *Übersichtsperspektive* (vgl. Daniel und Denis 1998). Dadurch muss auch der Instruierte die Perspektive eines imaginären Wanderers einnehmen, um die Routenbeschreibungen verarbeiten zu können (vgl. Tschander u. a. 2003).

1.2 Motivation und Einbettung

Eine Routenbeschreibung kann dadurch bewertet werden, wie leicht es einem Instruierten fällt, der beschriebenen Route zu folgen. Dabei kann ein Mensch eine Routenbeschreibung, noch bevor er sie ausführt, bewerten (vgl. Denis u. a. 1999). Dadurch ist es ihm möglich zu entscheiden, ob er genügend Informationen besitzt, um der Route folgen zu können, oder ob er noch weitere Beschreibungen einholen muss. Ein wichtiges Kriterium für eine solche Bewertung ist die Art und Weise, wie Reorientierungspunkte beschrieben werden: In guten Routenbeschreibungen werden Reorientierungspunkte durch ihre Konstellation zu Landmarken beschrieben. Falls solche Landmarken fehlen, hat ein Instruierter oft Schwierigkeiten, der Route ohne Probleme folgen zu können (vgl. Michon und Denis 2001). Dieses Kriterium kann also schon bevor die Routenbeschreibung ausgeführt wird, überprüft werden, indem bestimmt wird, von welcher Position der Route aus der imaginäre Wanderer welche Landmarken sieht.

Daraus ergibt sich die Fragestellung dieser Diplomarbeit, nämlich, aus Routenbeschreibungen Aussagen zur Position und zur Sicht des imaginären Wanderers zu

machen, die dazu beitragen, die Qualität der Routenbeschreibungen bewerten zu können.

In dieser Arbeit werden nur die drei Arten von Sätzen in Routenbeschreibungen untersucht, von denen man intuitiv am ehesten erwarten würde, dass sie Informationen über die Position und die Sicht des imaginären Wanderers liefern: Die direkteste Art, in Routenbeschreibungen die Position von Objekten anzugeben, sind *Positionierungsaussagen*. Dabei handelt es sich um einen Teilsatz, der zwei Entitäten räumlich in Relation zueinander setzt, beispielsweise „Haus E ist vor Dir“. Durch eine *Bewegungsaussage* wie „Gehe an Haus E vorbei zu Haus F“ wird eine Bewegung durch die Angabe von verschiedenen Landmarken beschrieben. Auch sie gibt die Position von Entitäten an, im Gegensatz zu Positionierungsaussagen jedoch auf den Lauf der Zeit bezogen. Die Sicht eines Beobachters wird explizit durch *Sichtaussagen* beschrieben. Diese drücken die unmittelbare Wahrnehmung eines Objektes aus, wie in dem Beispiel „Du siehst Haus E“.

Eine spezielle Art der Positionsangabe ist es, diejenigen Landmarken anzugeben, in denen sich der imaginäre Wanderer befindet („Enthaltensein-Position“). Da es die Sicht stark einschränken kann, wenn man sich in einer Landmarke befindet, soll auch die Enthaltensein-Position näher untersucht werden.

Diese Diplomarbeit ist eingebettet in das Projekt „Geometrischer Agent“ am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg (vgl. Tschander u. a. 2003). Darin wird ein Agent modelliert, der, basierend auf vorher gegebenen Instruktionen in natürlicher Sprache, Routen in einer virtuellen Umgebung folgen kann. Dabei wird der spezielle Fall betrachtet, dass weder der Auskunftgebende noch der Instruierte etwas von der Umgebung wahrnehmen, in der die Navigation stattfinden soll. Außerdem werden die Routenbeschreibungen nicht in einem Gespräch gegeben, sondern liegen als niedergeschriebene Texte vor. Dadurch müssen alle nötigen Informationen verbalisiert werden, und können nicht auch durch Gesten ausgedrückt werden.

Bei der Verarbeitung von Routenbeschreibungen werden dabei zwei Phasen unterschieden: In der *Instruktionsphase* erklärt ein Auskunftgebender, der mit der Umgebung, in der die Route verläuft, vertraut ist, einem Instruierten die Route. Da sich weder der Auskunftgebende noch der Instruierte vor Ort befinden, ist die *Navigationsphase*, in der die Routeninstruktionen ausgeführt werden sollen, zeitlich von der Instruktionsphase getrennt. Das Projekt „Geometrischer Agent“ hat nicht zum Ziel, die Erkennung von Landmarken zu untersuchen. Durch die virtuelle Umgebung, in der die Handlungen und Wahrnehmung des Agenten simuliert werden, kann auch seine Fähigkeit, Landmarken zu identifizieren, kontrolliert und festgelegt werden.

Das Ziel des Projektes ist es, ein formales Rahmenwerk zu erstellen, mit dessen Hilfe der Zusammenhang der räumlichen Informationen, die durch Routeninstruktionen gegeben werden, mit den räumlichen Informationen, die durch die Wahrnehmung während der Ausführung der Instruktionen gewonnen werden, untersucht werden kann.

Da es sich bei den Routenbeschreibungen, die in dieser Arbeit analysiert werden, um niedergeschriebene Beschreibungen handelt, wird automatisch davon ausgegangen, dass eine solche Routenbeschreibung über einen gewissen Zeitraum hinweg gültig bleibt. Es soll angenommen werden, dass alle Landmarken, die in einer Routenbeschreibung erwähnt werden, bezüglich der Umgebung der Routenbeschreibung als immobil betrachtet werden können. Beispielsweise wird selbst in dem Satz „Gehe zum Pförtner“ der Pförtner mit seinem Haus gleichgesetzt, das nicht beweglich ist.

Die Basis für die Beobachtungen dieser Arbeit bildet eine Menge von willkürlich ausgewählten Routenbeschreibungen, die für dieses Projekt aufgezeichnet wurden. Die von ihnen beschriebenen Routen befinden sich alle auf dem Gelände des Fachbereichs Informatik der Universität Hamburg. Es sind allerdings zu wenige, um diese Arbeit zu einer empirischen Studie zu machen. Die Beschreibungen wurden in Teilsätze zerlegt. Verweise darauf haben im Folgenden das Format „kürzel:teilsatz“, wobei „kürzel“ eine eindeutige Bezeichnung für eine Routenbeschreibung ist und „teilsatz“ die Nummer des Teilsatzes innerhalb dieser Routenbeschreibung angibt. Die verwendeten Routenbeschreibungen sind im Anhang aufgelistet.

1.3 Positionierungsaussagen

Eine Positionierungsaussage ist ein (Teil-)satz, der das Subjekt (*lokalisiertes Objekt*, mit „LO“ bezeichnet) durch ein *Positionierungsverb* (z.B. „sich befinden“ oder „sein“) und eine *lokale Präposition* (z.B. „bei“) räumlich relativ zu einem oder mehreren *Referenzobjekten* („RO“) und gegebenenfalls einem *Referenzsystem* positioniert.

Es soll zugelassen werden, dass sich sowohl das lokalisierte Objekt als auch die Referenzobjekte und das Referenzsystem in der Situation, die eine Positionierungsaussage beschreibt, bewegen können. Dies muss in einer geeigneten Repräsentation berücksichtigt werden.

Unter den lokalen Präpositionen werden nur die *topologischen Präpositionen*, die *dimensionalen Präpositionen* und die Präposition „zwischen“ betrachtet.

1.3.1 Topologische Präpositionen

Als *topologische Präpositionen* werden die Präpositionen „in“, „bei“, „an“ und „auf“ bezeichnet. Sie beziehen sich nur auf ein Referenzobjekt und benötigen kein Referenzsystem (vgl. Wunderlich und Herweg 1991).

Die Präposition „in“ lokalisiert LO in der Region, die den Ort von RO umfasst. Durch die Präpositionen „an“, „bei“ und „auf“ wird LO in der *proximalen Außenregion* von RO lokalisiert. Dabei handelt es sich um diejenige Region, „innerhalb der ein potentieller Akteur mit dem Objekt (inter-)agieren kann oder allgemein ein Zusammenhang mit dem Objekt etabliert werden kann“ (Wunderlich und Herweg 1991, S.778). Diese Region ist einerseits von vielen Faktoren abhängig und ist deshalb nicht einfach durch ein Entfernungsmaß angebbar. Andererseits besitzt ein Mensch einen relativ klaren Begriff davon, was sich in einer bestimmten Situation in dieser Region befindet (vgl. Herweg 1988). Die Präpositionen „bei“ und „auf“ legen außer der Lokalisierung von LO in der proximalen Außenregion von RO zusätzliche Einschränkungen bezüglich der räumlichen Konstellation von LO und RO fest, beispielsweise dürfen sich durch die Verwendung von „bei“ LO und RO nicht berühren (vgl. Herweg 1988). Diese Unterschiede sollen in dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt werden.

1.3.2 Dimensionale Präpositionen

Die Präpositionen „vor“, „hinter“, „links“, „rechts“, „unter“ und „über“ werden als *dimensionale Präpositionen* bezeichnet (vgl. Wunderlich und Herweg 1991). Ihre Bedeutung ist außer von dem Referenzobjekt noch von einem weiteren Parameter,

dem *Referenzsystem*, abhängig. Dieses beschreibt, von welchem Standpunkt aus die dimensionale Präposition betrachtet wird, und kann in der natürlichen Sprache durch den Ausdruck „von ... aus gesehen“ beschrieben werden (vgl. Eschenbach 1999b).

Es sind drei verschiedene Arten von Referenzsystemen möglich (vgl. Eschenbach 1999b): Zunächst kann durch die Orientierung von RO ein räumliches Referenzsystem gegeben sein. Dazu muss RO jedoch eine eindeutige Orientierung besitzen. Die Vorderseite eines Bildschirms ist beispielsweise durch die kanonische Position eines Benutzers des Bildschirms gegeben. Dadurch ist die Aussage „Die Tastatur ist vor dem Bildschirm“ unabhängig von einem Beobachter. Diese Art der Verwendung von dimensionalen Präpositionen wird als *intrinsisch* bezeichnet.

Falls das Referenzsystem durch die gemeinsame Umgebung von LO und RO gebildet wird, spricht man von *absoluter* Verwendung. Dieser Fall wird vor allem bei den Präpositionen „über“ und „unter“ verwendet, wobei dort die Gravitation als Referenzsystem dient. Absolute Verwendung wird auch bei Himmelsrichtungen wie „nördlich von“ eingesetzt.

Schließlich kann das Referenzsystem auch durch eine Entität, die nicht RO oder LO entspricht, gegeben sein (*relativer* Gebrauch der Präposition). Wenn es sich dabei um einen Beobachter handelt, ist das Referenzsystem durch seine Blickrichtung festgelegt (z.B. „Der rote Ball ist vor dem grünen (von hier aus gesehen)“). Das Referenzsystem kann im relativen Fall auch durch eine Bewegung gegeben sein, wodurch dann deren Trajektorie bestimmt, was „vor“ oder „hinter“ bedeutet. Dieser Fall wird beispielsweise dann verwendet, wenn im Kontext eines Rennens der Satz „Zabel ist vor Ulrich“ oder in einer Routenbeschreibung der Satz „hinter der nächsten Abbiegung“ geäußert wird.

Die Bestimmung des Referenzsystems ist nicht immer eindeutig möglich. Zum Beispiel können sich bei einem Auto die Präpositionen links/rechts sich sowohl auf einen Betrachter als Referenzsystem beziehen, der sich in dem Auto befindet (intrinsisch) als auch außerhalb des Autos (relativ) (vgl. Wunderlich und Herweg 1991). Retz-Schmidt (1988) stellt ein implementierten System vor, das versucht, das Referenzsystem für beliebige Sätze mit lokalen Präpositionen zu bestimmen. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse ist es jedoch nur in einem Fall nötig, das Referenzsystem zu bestimmen: In Routenbeschreibungen ist der einzige Beobachter, der beschrieben wird, der imaginäre Wanderer. Deshalb soll angenommen werden, dass eine dimensionale Präposition dann intrinsisch verwendet wird, wenn ihr Referenzobjekt der imaginäre Wanderer ist. Bei dem Referenzsystem handelt es sich dann also auch um den imaginären Wanderer.

Falls bei einer dimensionalen Präposition kein Referenzobjekt erwähnt wird wie in „Rechts ist Haus F“, soll angenommen werden, dass es sich in Routenbeschreibungen dann um den imaginären Wanderer handelt.

1.3.3 Sonstige lokale Präpositionen

Neben den topologischen und dimensionalen Präpositionen soll auch die Präposition „zwischen“ näher untersucht werden. Dabei soll nur der Fall betrachtet werden, in dem diese Präposition auf zwei Referenzobjekte angewendet wird, beispielsweise „Du befindest Dich zwischen dem Zaun und dem Haus“. Dieser Fall wird als *linearer Fall* bezeichnet.

1.4 Bewegungsaussagen

Bewegungsaussagen sind (Teil-)Sätze, die ein *Bewegungsverb* (z.B. „gehen“) enthalten, und deren Subjekt der imaginäre Wanderer ist. Dabei sollen nur solche Bewegungsverben betrachtet werden, die ausschließlich mit *direktionalen Präpositionen* verwendet werden. Direktionale Präpositionen (z.B. „durch“) beschreiben den Verlauf der Bewegung relativ zu einem oder mehreren *Referenzobjekten* („RO“) und gegebenenfalls einem Referenzsystem (vgl. Eschenbach u. a. 2000). Es soll außerdem angenommen werden, dass in der Situation, die eine Bewegung beschreibt, die Orientierung des Subjektes durch den Bewegungsverlauf gegeben ist.

Aus der oben gemachten Festlegung von Bewegungsaussagen folgt, dass ein Satz wie „Betrete das Haus“ keine Bewegungsaussage ist, da darin Referenzobjekte ohne direktionale Präposition verwendet werden. Es soll jedoch davon ausgegangen werden, dass solche Sätze in Bewegungsaussagen umformuliert werden können. Für den genannten Satz könnte dazu beispielsweise „Trete in das Haus ein“ verwendet werden. Dabei muss beachtet werden, dass die direktionalen Präpositionen „in“, „aus“ und „durch“ nicht auf Entitäten angewendet werden können, die flach sind und sich auf dem Boden befinden (*Boden-Entitäten*). Deshalb kann ein Satz wie „Betrete den Marktplatz“ nicht in den Satz „Gehe in den Marktplatz“ umgewandelt werden.

Es handelt sich bei den Referenzobjekten und Referenzsystemen der direktionalen Präpositionen um Landmarken der Routenbeschreibung. Deshalb kann angenommen werden, dass diese immobil bezüglich der Umgebung der Route sind (siehe Abschnitt 1.2).

Direktionale Präpositionen, die den Verlauf des Pfades ohne die Angabe eines Referenzobjektes beschreiben, sollen in dieser Arbeit nicht betrachtet werden (z.B. „Gehe *nach rechts*“). Sie beziehen sich auf die Orientierung und Position des imaginären Wanderers im Startpunkt der Bewegung. Diese Art von direktionalen Präpositionen haben engen Bezug zu Richtungsänderungen (vgl. Habel u. a. 2000)

1.5 Sichtaussagen

Die in den Texten vorkommenden Teilsätze, die direkt etwas über die Sicht des imaginären Wanderers aussagen, sind im Folgenden aufgelistet. In den Klammern stehen jeweils die Verweise auf die entsprechenden Teilsätze der Routenbeschreibungen.

- „dann siehst du das höchste Gebäude auf dem Gelände Haus F“ (lt8:2)
- „bis auf deiner rechten Seite Haus E erscheint“ (lt8:6)
- „die bereits vom Pförtnerhaus sichtbar ist“ (lt9:5)
- „und siehst als erstes Gebäude rechts Haus E“ (lt10:5)
- „aus dem Fenster ist dann schon Haus E zu sehen“ (lt14:4)
- „kannst du das Pförtnerhaus in vielleicht hundert Meter Entfernung sehen“ (eg3:2)
- „geradeaus ist dagegen das flache Gebäude des Pförtners zu sehen“ (eg3:11)
- „sobald sie einen Aschenbecher vor der Tür sehen“ (eg4:9)

- „Von dort aus können sie rechts schon das Haus F erkennen“ (eg5:3)
- „Von dort aus kann man die Mensa, die sich in Haus B befindet, ungefähr auf zwei Uhr sehen“ (eg6:4-6)
- „sieht man bei ziemlich genau zwölf Uhr das Haus F“ (eg7:3)

Die oben erwähnte Sätze enthalten, bis auf einen, ein *Verb des Sehens* („sehen“, „erscheinen“, „sehen können“). Die Ausnahme bildet der Teilsatz lt9:15. Dort wird der Ausdruck „sichtbar sein“ verwendet, der aber in einen entsprechenden Teilsatz mit dem Verb „sehen können“ umgewandelt werden kann. Außerdem beschreibt jeder dieser Sätze die unmittelbare Wahrnehmung eines physikalischen Objektes (*Zielobjekt*), zum Beispiel die Wahrnehmung von Haus E in dem Satz „Du siehst Haus E“. Fälle, in denen die indirekte Wahrnehmung eines Objektes oder die Wahrnehmung einer Situation beschrieben wird, sollen nicht als Sichtaussagen verstanden werden. Dazu gehört beispielsweise der Satz „Ich sehe ihn die Straße entlang gehen“, der ein Sichtverb enthält, jedoch die Wahrnehmung einer Situation anstatt eines physikalischen Objektes beschreibt. Usoniene (2001) diskutiert die verschiedenen möglichen Arten der Indirektheit bezüglich des Verbs „sehen“ genauer.

Eine Sichtaussage gibt zunächst an, dass in der Situation, die sie beschreibt, zu jedem Zeitpunkt eine *Sichtlinie* existiert, die an der Position des imaginären Wanderers beginnt und an dem Zielobjekt endet. Eine Sichtlinie ist gerade und beschreibt den geometrischen Zusammenhang, dass sich zwischen ihrem Start- und Endpunkt kein Hindernis für die Sicht befindet. Dadurch kann ein Objekt auch dann das Zielobjekt einer Sichtaussage sein, wenn es teilweise verdeckt ist. Beispielsweise wird der Kirchturm der St. Stephan Kathedrale in Wien auch von einem Ort aus, an dem nur der Kirchturm sichtbar ist, in der menschlichen Kommunikation mit der Kathedrale identifiziert (vgl. Winter 2003).

Wenn in der Sichtaussage direktionale Präpositionen vorkommen, dann beschreiben diese den Verlauf der Sichtlinien näher. Eine Lokalisierung des Startpunktes der Sichtlinien geschieht genau wie bei der Angabe des Startpunktes von Bewegungen durch die Angabe der Präposition „von“, z.B. „die bereits vom Pförtnerhaus aus sichtbar ist“. Dieses Beispiel zeigt, dass mit Hilfe dieser Präposition Sichtaussagen gemacht werden können, in denen der imaginäre Wanderer nicht als Subjekt vorkommt. In einer Routenbeschreibung ist es jedoch sinnlos, eine Sichtaussage zu machen, ohne dass sich der imaginäre Wanderer während seiner imaginären Wanderung einmal an dem Startpunkt der entsprechenden Sichtlinien befindet. Deshalb soll davon ausgegangen werden, dass sich in jeder Sichtaussage der imaginäre Wanderer auch am Startpunkt der entsprechenden Sichtlinien befindet. Falls die Sichtlinie durch bestimmte Entitäten geht, kann dies durch die direktionale Präposition „durch“ angegeben werden (z.B. „Durch das Fenster ist Haus E zu sehen“). Es sollen nur die direktionalen Präpositionen „aus“, „durch“ und „von“ für Sichtaussagen zugelassen werden. Andere direktionale Präpositionen, wie beispielsweise „in Richtung von“ oder „zu“, beschreiben eine indirekte Wahrnehmung und leiten eine direkte Wahrnehmung ein, wie in dem Satz „Wenn Du in Richtung des Fernsehturms schaust, kannst Du das Haus sehen“. In den vorliegenden Routenbeschreibungen kommen solche direktionalen Präpositionen in Sichtaussagen jedoch nicht vor.

In einer Sichtaussage können auch lokale Präpositionen vorkommen, die dann, genau wie in einer Positionierungsaussage, das Zielobjekt während der Situation lokalisieren. Diese Lokalisierung kann einerseits relativ zum imaginären Wanderer

(z.B. „Auf Deiner linken Seite siehst Du Haus E“) oder relativ zu anderen Objekten (z.B. „sobald Sie einen Aschenbecher vor der Türe sehen“) geschehen. Falls bei der lokalen Präposition kein Referenzobjekt erwähnt wird, soll davon ausgegangen werden, dass sie sich auf den imaginären Wanderer bezieht (z.B. „Rechts siehst du Haus F“).

Da Routenbeschreibungen für Menschen gemacht sind, werden auch implizit dem imaginären Wanderer bestimmte menschliche Eigenschaften der Perzeption zugeschrieben. Dazu gehört, dass ein Mensch keinen Rundum-Blick besitzt. Das *Sichtfeld* des imaginären Wanderers zu einem Zeitpunkt soll diejenige Region sein, in der er mit seiner aktuellen Orientierung Objekte wahrnehmen kann. Als Näherung wird angenommen, dass das Sichtfeld diejenige Region ist, die sich nicht hinter dem imaginären Wanderer befindet.

Eine Sichtaussage kann auch temporale Aspekte enthalten, speziell durch das Verb „erscheinen“. Beispielsweise wird durch den Satz „bis auf deiner rechten Seite Haus E erscheint“ beschrieben, dass dieses kurz vorher noch nicht gesehen werden konnte. Dieser Aspekt wird jedoch in dieser Arbeit nicht näher untersucht.

Analog zu Bewegungsaussagen wird auch in Sichtaussagen die Annahme getroffen, dass das Zielobjekt und die in direktionalen Präpositionen verwendeten Referenzobjekte und Referenzsysteme als immobil betrachtet werden können. Das ist auch in den oben genannten Beispielen der Fall. Es soll jedoch nicht angenommen werden, dass sich der imaginäre Wanderer in der Situation, die durch die Sichtaussage beschrieben wird, zu jedem Zeitpunkt an derselben Position befindet.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel werden die formalen Grundlagen beschrieben, die zur Formalisierung von Positionierungs-, Bewegungs- und Sichtaussage und ihrer Axiome benötigt werden. Als Formalismus wird eine ordnungssortierte Prädikatenlogik erster Stufe benutzt. Axiome werden in dieser Arbeit durch ein „A“, Theoreme durch ein „T“ und Definitionen durch ein „D“ im Bezeichner gekennzeichnet. Für die Beschreibung von stark begrenzten Containern wird diese später zu einer Modallogik erweitert (siehe Abschnitt 4.1.2). Abbildung 2.1 beschreibt die grundlegenden Sorten der Logik. Dabei bezeichnet `top` diejenige Sorte, zu der jedes Individuum gehört.

Um Sachverhalte in Relation zur Zeit setzen zu können, werden *Situationen* (Sorte `situation`) verwendet. Sie stehen in engem Zusammenhang mit *Situationstypen* (Sorte `situation-type`). Um geometrische Aussagen über die Struktur des Raumes machen zu können, wird die mathematische Disziplin der Geometrie verwendet. In Abschnitt 2.2 werden dazu *geometrische Entitäten* (Sorte `geometric-entity`) und verschiedene Relationen unter ihnen eingeführt. *Immobile* Entitäten (Sorte `mobile`) sind solche, die sich nicht bezüglich der Umgebung, in der sich die Route befindet, bewegen können. Dazu gehören alle geometrischen Entitäten, da durch sie der Raum beschrieben wird. Alle Entitäten, die sich gegenüber der Umgebung der Route bewegen können, gehören zur Sorte der *mobilen* Entitäten. Jedes wahrnehmbare physikalische oder funktionale Objekt gehört zur Sorte der *wahrnehmbaren Entitäten* (`perceptible-entity`). Wenn eine wahrnehmbare Entität immobil ist, dann kann sie als Landmarke in einer Routenbeschreibung verwendet werden. Deshalb werden solche wahrnehmbaren, immobilen Entitäten zur Sorte der Landmarken (`landmark`) zusammengefasst. Alle mobilen wahrnehmbaren Entitäten werden als *Agenten* (Sorte `agent`) bezeichnet. Dazu gehört vor allem der imaginäre Wanderer. Um geometrische Zusammenhänge zwischen wahrnehmbaren Entitäten beschreiben zu können, ist es notwendig, Abbildungen von wahrnehmbaren Entitäten auf geometrische Entitäten einzuführen. Der Vorgang dieser Abbildung wird als *Lokalisierung* bezeichnet.

Da relativ viele Sorten verwendet werden, wird eine spezielle Notation für die Sortierung der Variablen eingeführt: In der Formel $\forall x \in \texttt{sorte}\ [\texttt{P}(x)]$ wird beschrieben, dass x eine Variable der Sorte `sorte` ist und dass für alle Individuen dieser Sorte das Prädikat `P` gilt. Außerdem soll für jede Sorte `sorte` ein entsprechendes einstelliges Prädikat $\in$ `sorte` in Postfix-Notation eingeführt werden (D2.0.1). In der Definition von $\in$ `sorte` wird das Prädikat $=$ verwendet. Dieses wird in der Infix-Notation verwendet und sagt von jeweils zwei Termen, dass beide in allen Interpretationen

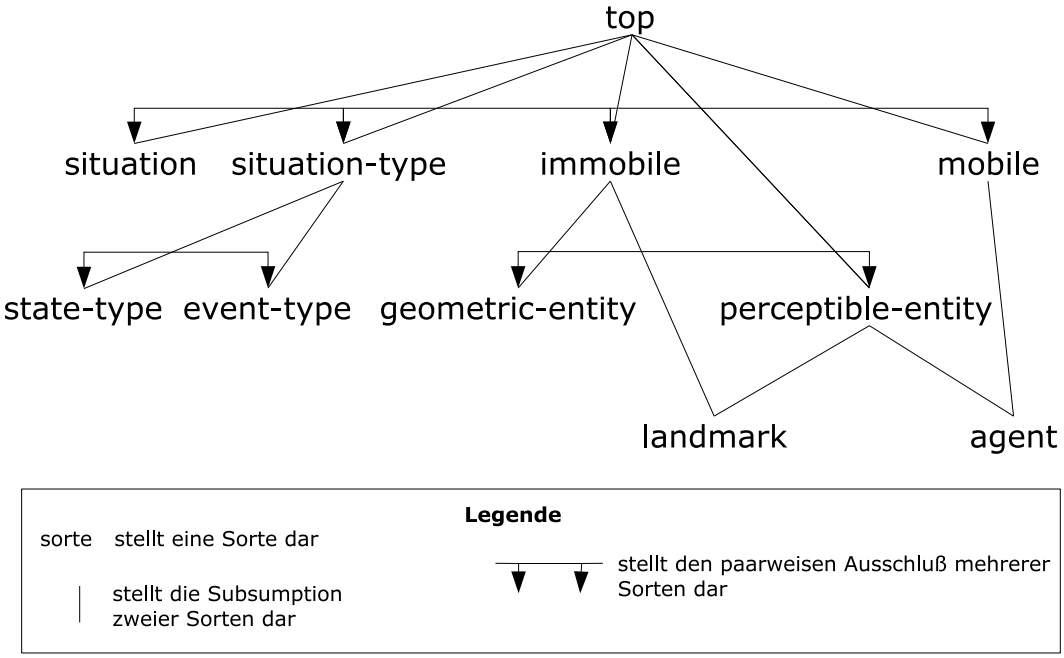

Abbildung 2.1: Grundlegende Sorten der Logik

dasselbe Individuum repräsentieren. Es ist reflexiv, transitiv und symmetrisch.

(D2.0.1) $\forall x \in \texttt{top}\ [x \in \texttt{sorte} \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists y \in \texttt{sorte}\ [y = x]]$

2.1 Situationen

Aussagen, die abhängig von der Zeit sind, beschreiben *Situationen* (Sorte `situation`). In diesen Aussagen wird ein Sachverhalt, der *Situationstyp* (Sorte `situation-type`), in den Lauf der Zeit eingeordnet.

2.1.1 Zustände und Ereignisse

Situationen können in zwei Klassen unterteilt werden: *Ereignisaussagen* (z.B. „Peter lief heute früh eine Runde um den Sportplatz“) betrachten eine Situation als spezielles Individuum in der Zeit (ein *Ereignis*), wogegen *Zustandsaussagen* (z.B. „Peter war heute früh auf dem Sportplatz“) Situationen als Zeiten, zu denen ein bestimmter Sachverhalt gilt, betrachten (als *Zustand*) (vgl. Herweg 1991).

Ereignisaussagen können daran erkannt werden, dass sie mit Frequenz-Adverbialen („zweimal“) und Zeitrahmen-Adverbialen („innerhalb von zwei Minuten“), jedoch nicht mit Zeitdauer-Adverbialen („für zwei Minuten“) kombiniert werden können. Bei Zustandsaussagen ist es genau umgekehrt.

Eine Zustandsaussage und eine Ereignisaussage können dieselben objektiven Eigenschaften von Situationen beschreiben und sogar oft ineinander überführt werden (vgl. Herweg 1991). Es kann daher sein, dass eine Situation einmal als Zustand und einmal als ein Ereignis beschrieben wird. So kann der Zustand „Gehe in Richtung von Haus F“ in ein Ereignis der Art „Gehe von A nach B“ umgewandelt werden, wobei in diesem Fall der Anfang und das Ende des Ereignisses unterspezifiziert bleiben.

Situationen können aus Teilen bestehen: Beispielsweise besitzt das Ereignis, ein Haus zu bauen, das Teilereignis, das Dach zu decken. Dabei kann eine Situation sowohl aus Zuständen als auch aus Ereignissen als Teile bestehen.

2.1.2 Formalisierung

Nach diesen Vorüberlegungen kann nun eine Formalisierung erfolgen. Situationen werden durch die Sorte `situation` dargestellt. Auf ihnen ist die Relation $\sqsubseteq$ definiert, die die Teil-Von-Struktur von Situationen repräsentiert.

Der Sachverhalt einer Situation wird durch *Situationstypen* (Sorte `situation-type`) beschrieben. Für Zustände existiert dafür die spezielle Sorte der *Zustandstypen* (`state-type`) und für Ereignisse die Sorte der *Ereignistypen* (`event-type`). In der formalen Sprache werden sie jeweils durch Terme repräsentiert, in Anlehnung an den Ansatz von Allen (1984).

Die Zeitdimension von Situationen wird im Folgenden nicht explizit modelliert. Es wird davon ausgegangen, dass sie aus ausgedehnten Entitäten, sogenannten *Perioden* besteht (vgl. Herweg 1991). Es ist allerdings, speziell im Zusammenhang von Bewegungen, nötig, von Zuständen auszusagen, dass sie nur zu einem Zeitpunkt gelten. Zum Beispiel kann der Zustand, dass ein sich bewegendes Objekt sich an einem bestimmten Ort befindet, nur für einen Zeitpunkt gelten, da sich das Objekt sonst nicht bewegen würde. Es soll jedoch nicht festgelegt werden, ob Perioden als Intervalle über Zeitpunkte, oder Zeitpunkte durch die Grenze zwischen zwei Perioden gegeben sind (vgl. Galton 1990).

Das Prädikat $\texttt{HOLDS-IN}(s, z)$ betrachtet die Situation s als Zustand und drückt aus, dass s eine Situation ist, innerhalb derer mindestens einmal ein Zustand gilt, der durch den Zustandstyp z beschrieben wird. Auch durch die Prädikate $\texttt{INIT}(s, z)$ bzw. $\texttt{FIN}(s, z)$ wird s als Zustand betrachtet. Sie drücken aus, dass der Zustandstyp z zum Anfangs- bzw. Endzeitpunkt einer Situation gilt. Diese Zeitpunkte werden durch $\texttt{HOLDS-IN}(s, z)$ nicht berücksichtigt Zur Anschauung kann man sich Perioden als Intervalle auf den reellen Zahlen vorstellen: `HOLDS-IN` berücksichtigt dann nur die inneren Punkte des Intervalls, `INIT` und `FIN` die Endpunkte des Intervalls (vgl. Eschenbach u. a. 2000).

Um auszudrücken, dass zwei Zustandstypen z_1 und z_2 mindestens einmal, aber gleichzeitig, während einer Situation gelten, soll der Ausdruck $\texttt{HOLDS-IN}(s, z_1 \& z_2)$ benutzt werden. Dabei ist & ein Operator, der zwei Zustandstypen auf einen neuen Zustandstypen abbildet. Dieser soll kommutativ (A2.1.1), assoziativ (A2.1.2) und idempotent (A2.1.3) sein. Aufgrund der Assoziativität kann dann die Klammerung auch weggelassen werden (vgl. Eschenbach u. a. 1999).

(A2.1.1) $\forall s \in \texttt{situation}\, z_1, z_2 \in \texttt{state-type}\ [$
$\texttt{HOLDS-IN}(s, z_1 \& z_2) \Leftrightarrow \texttt{HOLDS-IN}(s, z_2 \& z_1)]$

(A2.1.2) $\forall s \in \texttt{situation}\, z_1, z_2, z_3 \in \texttt{state-type}\ [$
$\texttt{HOLDS-IN}(s, (z_1 \& z_2) \& z_3) \Leftrightarrow \texttt{HOLDS-IN}(s, z_1 \& (z_2 \& z_3))]$

(A2.1.3) $\forall s \in \texttt{situation}\, z \in \texttt{state-type}\ [$
$\texttt{HOLDS-IN}(s, z) \Leftrightarrow \texttt{HOLDS-IN}(s, z \& z)]$

Des weiteren soll, wann immer der Zustandstyp $z_1 \& z_2$ in einer Situation mindestens einmal gilt, auch der Zustandstyp z_1 und z_2 jeweils mindestens einmal gelten (A2.1.4) (vgl. Eschenbach u. a. 1999).

Das Prädikat HOLDS-ON(s, z) besagt von einem Zustandstyp z, dass er während der gesamten Situation s gilt (vgl. Galton 1990). Zwei Zustandstypen gelten genau dann während einer ganzen Situation gleichzeitig, wenn jeder von ihnen während der ganzen Situation gilt (A2.1.5).

(A2.1.4) $\forall s \in \texttt{situation}\, z_1, z_2 \in \texttt{state-type}\ [$
$\texttt{HOLDS-IN}(s, z_1 \& z_2) \Rightarrow \texttt{HOLDS-IN}(s, z_1) \wedge \texttt{HOLDS-IN}(s, z_2)]$

(A2.1.5) $\forall s \in \texttt{situation}\, z_1, z_2 \in \texttt{state-type}\ [$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, z_1 \& z_2) \Leftrightarrow \texttt{HOLDS-ON}(s, z_1) \wedge \texttt{HOLDS-ON}(s, z_2)]$

Der Zustandstyp, der durch die Konstante nothing bezeichnet wird, ist derjenige, der nichts aussagt. Damit gilt er während jeder Situation (A2.1.6) und ist er gleichzeitig zu jedem anderen Zustandstypen (A2.1.7).

(A2.1.6) $\forall s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{nothing})]$

(A2.1.7) $\forall z \in \texttt{state-type}\ [z \& \texttt{nothing} = z]$

Ereignisaussagen betrachten eine Situation als Ereignis. Dazu wird das Prädikat OCCURS-ON(s, e) verwendet, das angibt, dass e der Ereignistyp der Situation s ist. Um auszudrücken, dass während eines Ereignisses s ein Ereignis mit dem Ereignistyp e stattfindet, wird das Prädikat OCCURS-IN(s, e) eingeführt (D2.1.8) (vgl. Eschenbach u. a. 2000).

(D2.1.8) $\forall s \in \texttt{situation} \forall e \in \texttt{event-type}\ [$
$\texttt{OCCURS-IN}(s, e) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists s' \in \texttt{situation}\ [s' \sqsubseteq s \wedge \texttt{OCCURS-ON}(s', e)]]$

Im Folgenden werden Zustands- oder Ereignistypen durch Funktionen beschrieben. Dabei werden diese Funktionen oft nicht allgemein definiert, sondern nur ihre Bedeutung im Zusammenhang mit HOLDS-IN, HOLDS-ON, INIT, FIN, OCCURS-ON oder OCCURS-IN durch ein Axiom angegeben (siehe beispielsweise die Beschreibung eines Bewegungsverbs, Axiom (A5.1.1)).

2.2 Geometrie

Die mathematische Disziplin der Geometrie beschäftigt sich mit der formalen Beschreibung der Struktur des Raumes und der Untersuchung räumlicher Konzepte. Dabei gibt es nicht mehr nur *die Geometrie* (die das Ziel von Euklid war), sondern mehrere Geometrien, die sich zum Teil widersprechen (z.B. die euklidische Geometrie und die nicht-euklidischen Geometrien) oder auch gegenseitig enthalten (z.B. ist die Topologie, als Geometrie aufgefasst, sehr allgemein und ist dadurch in vielen anderen Geometrien enthalten).

In dieser Arbeit wird zur Beschreibung einer Geometrie die axiomatische Methode verwendet werden. Sie wurde von Euklid eingeführt und geht von Basis-Ausdrücken wie „Punkt“, „Region“ und „Inzidenz“ aus, deren Eigenschaften und Zusammenhänge durch Axiome beschrieben werden. Dadurch werden nur Einschränkungen für diese Basis-Ausdrücke festgelegt, sie werden jedoch selber nicht definiert und bleiben somit unabhängig von der Domäne (Habel und Eschenbach 1997). Eine mögliche Interpretation ist die Mengenlehre der Mathematik, in der die

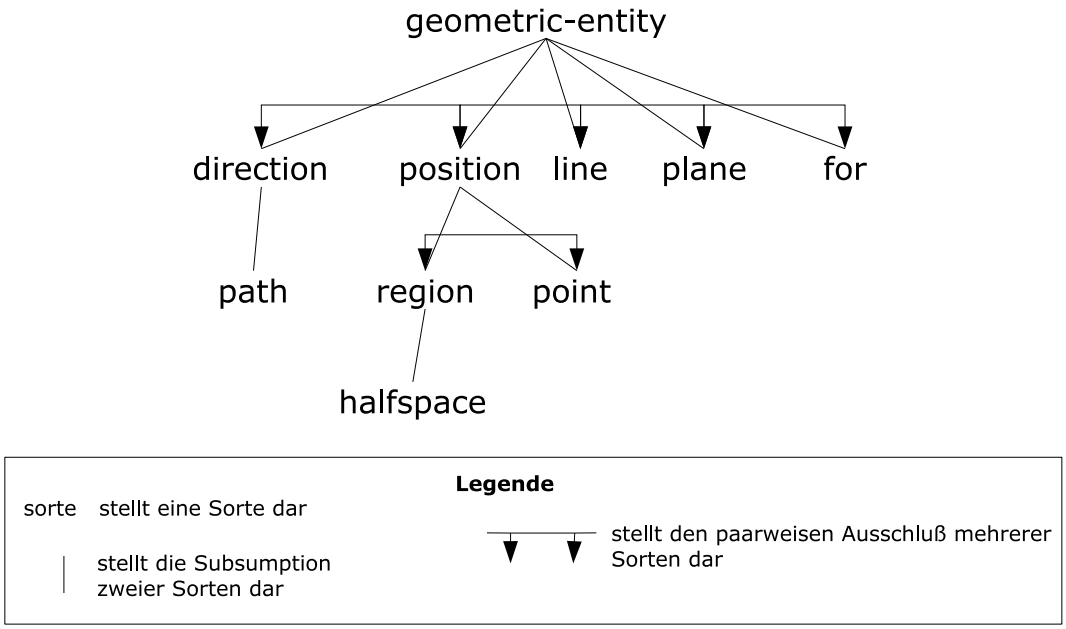

Abbildung 2.2: Sortierung der geometrischen Entitäten

meisten der hier beschriebenen Entitäten spezielle Mengen von Punkten wären. Die Relation der Inzidenz (s.u.) würde dann der Relation „Element von“ entsprechen. Aber auch bei dieser Interpretation ist sowohl eine diskrete als auch kontinuierliche Variante möglich.

In diesem Abschnitt werden zur Beschreibung des Raumes geometrische Entitäten (Sorte `geometric-entity`) eingeführt. Diese sind in mehrere Untersorten gegliedert (siehe Abbildung 2.2): *Punkte* (Sorte `point`), *Regionen* (Sorte `region`), *Geraden* (Sorte `line`), *Ebenen* (Sorte `plane`), *Halbräume* (Sorte `halfspace`), *Richtungen* (Sorte `direction`), *Pfade* (Sorte `path`) und *Referenzrahmen* (Sorte `for`). *Positionen* (Sorte `position`) ermöglichen es, Punkte und Regionen einheitlich zu behandeln.

Die Hauptrelation zwischen allen geometrischen Entitäten mit Ausnahme von Referenzrahmen und Punkten ist die Relation der *Inzidenz* (oder „Zugehörigkeit“). Die Formel $q \,\iota\, e$ gibt an, dass der Punkt q zur geometrischen Entität e inzident ist. Sie ist auch für Punkte definiert, die nur zu sich selber inzident sind:

(D2.2.1) $$\forall q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [\, q_1 \,\iota\, q_2 \Leftrightarrow_{\text{def}} q_1 = q_2]$$

2.2.1 Regionen

Regionen werden benötigt, um den Raum, den Landmarken (Entitäten der Sorte `landmark`) umfassen, zu beschreiben. Um ihre räumliche Relation zueinander zu beschreiben wird das Kalkül CRC (Closed Region Calculus) verwendet (vgl. Eschenbach 1999a). Darin werden Relationen zur Beschreibung der *Mereologie* (Teil-Von-Struktur von Regionen) und *Topologie* (Struktur, die auf der Verbundenheit von Regionen basiert) eingeführt. Das CRC ist eine Verallgemeinerung des Kalküls der verbundenen Regionen (*region connection calculus* oder *RCC*) (vgl. Randell u. a. 1992). In letzterem werden zusätzliche Axiome gefordert, die dazu führen, dass es in

jedem Modell des Kalküls unendlich viele Regionen geben muss und es keine Region geben kann, die keine echten Teile besitzt. Dieses Kalkül wird nicht verwendet, um die möglichen Anwendungsfelder nicht unnötig einzuschränken. Deshalb soll nicht definiert werden, was Regionen sind, sondern nur Relationen eingeführt werden, die auf Regionen angewendet werden können und die bestimmte Eigenschaften besitzen. Ein mögliches Modell für die hier eingeführten Regionen ist die mathematische Mengenlehre.

Die Relationen, die von Eschenbach (1999a) eingeführt werden, müssen hier in Zusammenhang mit Punkten gebracht werden, um Grenzüberschreitungen der Regionen von Landmarken durch Richtungen analysieren zu können (siehe z.B. Abschnitt 4.1.1).

2.2.2 Mereologie

Das Kalkül der Mereologie setzt die Begriffe „Teil von“, „Überlappung“ und „Summe“ gegenseitig in Beziehung. Um diese definieren zu können wird die Relation *Teil-von* (P) benötigt. Auf der Relation Teil-Von basierend können die Relationen *Echter-Teil-Von* (PP, siehe D2.2.2), *Überlappung* (O, siehe D2.2.3) und *Disjunktheit* (DR, siehe D2.2.4) definiert werden. Außerdem wird noch ein Operator benötigt, der alle Regionen, die ein bestimmtes Prädikat erfüllen, vereinigt (*allgemeine Summe*). Dabei wird die Schema-Variable ϕ für ein beliebiges Prädikat verwendet, das als Argument eine Region verwendet (D2.2.5) (vgl. Eschenbach 1999a). Es soll angenommen werden, dass eine Region genau dann ein Teil einer anderen Region ist, wenn alle Punkte, die zu ersterer inzident sind, auch zu letzterer inzident sind (D2.2.6).

(D2.2.2) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\texttt{PP}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{P}(r_1, r_2) \wedge \neg\, \texttt{P}(r_2, r_1)]$

(D2.2.3) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\texttt{O}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists r_3 \in \texttt{region}\ [\texttt{P}(r_3, r_1) \wedge \texttt{P}(r_3, r_2)]]$

(D2.2.4) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\texttt{DR}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \neg\, \texttt{O}(r_1, r_2)]$

(D2.2.5) $\forall r_1 \in \texttt{region}\ [r_1 = \Sigma r_2\ [\phi(r_2)] \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\forall r' \in \texttt{region}\ [\texttt{O}(r_1, r') \Leftrightarrow \exists r_2 \in \texttt{region}\ [\phi(r_2) \wedge \texttt{O}(r_2, r')]]]$

(D2.2.6) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\texttt{P}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \forall q \in \texttt{point}\ [q\, \iota\, r_1 \Rightarrow q\, \iota\, r_2]]$

Eine Region r ist die Differenz aus einer Region r_1 und einer Region r_2, wenn jede Region genau dann ein Teil von r ist, wenn sie ein Teil von r_1 ist und sich nicht mit r_2 überlappt (D2.2.7). Dabei ist zu beachten, dass die allgemeine Summe für ein Prädikat und die Differenz-Region zweier Regionen nicht immer existieren müssen.

(D2.2.7) $\forall r_1, r_2, r_3 \in \texttt{region}\ [r_1 = r_2 - r_3 \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\forall r' \in \texttt{region}\ [\texttt{P}(r', r_2) \wedge \neg\, \texttt{O}(r', r_3) \Leftrightarrow \texttt{P}(r', r_1)]]$

Durch die folgenden Axiome werden Zusammenhänge zwischen der Existenz von Regionen festgelegt: Zwei Regionen sind dann gleich, wenn sie jeweils ein Teil der anderen sind (A2.2.8). Eine Region enthält genau dann eine andere Region, wenn sich erstere mit mindestens den Regionen überlappt, mit denen sich auch letztere überlappt (A2.2.9) Aus diesen Axiomen lässt sich ableiten, dass die Relation Teil-

Von reflexiv (T2.2.10) und transitiv (T2.2.11) ist (vgl. Eschenbach 1999a).

(A2.2.8) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\texttt{P}(r_1, r_2) \wedge \texttt{P}(r_2, r_1) \Rightarrow r_1 = r_2]$

(A2.2.9) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\forall r' \in \texttt{region}\ [\texttt{O}(r', r_1) \Rightarrow \texttt{O}(r', r_2)] \Leftrightarrow \texttt{P}(r_1, r_2)]$

(T2.2.10) $\forall r \in \texttt{region}\ [\texttt{P}(r, r)]$

(T2.2.11) $\forall r_1, r_2, r_3 \in \texttt{region}\ [\texttt{P}(r_1, r_2) \wedge \texttt{P}(r_2, r_3) \Rightarrow \texttt{P}(r_1, r_3)]$

2.2.3 Topologie

Durch die mereologischen Relationen ist es nicht möglich zwischen disjunkten Regionen, die sich berühren, und solchen, die sich nicht berühren, zu unterscheiden. Deshalb wird die Relation der *Separiertheit* (DC) eingeführt. Auf der Relation der Separiertheit können die Relationen *Verbundenheit* (C, siehe D2.2.12), *Berührung von außen* (EC, siehe D2.2.13) und *innerer Teil* (NTPP, siehe D2.2.14) definiert werden (vgl. Eschenbach 1999a).

(D2.2.12) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\texttt{C}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \neg\, \texttt{DC}(r_1, r_2)]$

(D2.2.13) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\texttt{EC}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{C}(r_1, r_2) \wedge \neg\, \texttt{O}(r_1, r_2)]$

(D2.2.14) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\texttt{NTPP}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\texttt{P}(r_1, r_2) \wedge \neg \exists r_3 \in \texttt{region}\ [\texttt{EC}(r_3, r_1) \wedge \texttt{EC}(r_3, r_2)]]$

Zwei Regionen sollen genau dann separiert sein, wenn es keinen Punkt gibt, der zu beiden inzident ist (D2.2.15). Dabei wird angenommen, dass jede Region mindestens einen Punkt besitzt (A2.2.16). Daraus folgt, dass die Relation der Verbundenheit reflexiv ist (T2.2.17) und dass zwei Regionen, die sich überlappen, auch verbunden sind (T2.2.18).

(D2.2.15) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\texttt{DC}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \neg \exists q \in \texttt{point}\ [q\, \iota\, r_1 \wedge q\, \iota\, r_2]]$

(A2.2.16) $\forall r \in \texttt{region}\, \exists q \in \texttt{point}\ [q\, \iota\, r]$

(T2.2.17) $\forall r \in \texttt{region}\ [\texttt{C}(r, r)]$

(T2.2.18) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\ [\texttt{O}(r_1, r_2) \Rightarrow \texttt{C}(r_1, r_2)]$

Ein Punkt ist genau dann ein *Randpunkt* einer Region, wenn er inzident zu ihr und einer Region ist, die die erstere von außen berührt (D2.2.19). Alle anderen Punkte, die inzident zu einer Region sind, sollen als *innere Punkte* bezeichnet werden (D2.2.20).

(D2.2.19) $\forall r \in \texttt{region}\, \forall q \in \texttt{point}\ [\texttt{BDPT}(q, r) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\exists r' \in \texttt{region}\ [\texttt{EC}(r', r) \wedge q\, \iota\, r' \wedge q\, \iota\, r]]$

(D2.2.20) $\forall r \in \texttt{region}\, \forall q \in \texttt{point}\ [\texttt{IPT}(q, r) \Leftrightarrow_{\text{def}} q\, \iota\, r \wedge \neg\, \texttt{BDPT}(q, r)]$

Es soll gelten, dass zwei Regionen sich dann überlappen, wenn ein innerer Punkt der einen Region inzident zur anderen ist (A2.2.21). Dieses Axiom wird benötigt, um die Eigenschaften von Inneren Entitäten beweisen zu können (siehe dazu Abschnitt 4.3).

(A2.2.21) $\forall r_1, r_2 \in \texttt{region}\, \forall q \in \texttt{point}\ [q\, \iota\, r_1 \wedge \texttt{IPT}(q, r_2) \Rightarrow \texttt{O}(r_1, r_2)]$

Schließlich soll die Relation P für Punkte erweitert werden, um sie einheitlich für Positionen verwenden zu können: Da Regionen, die disjunkt sind, trotzdem einen gemeinsamen Randpunkt besitzen können, soll ein Punkt genau dann ein Teil einer Region sein, wenn er ein innerer Punkt der Region ist (D2.2.22). Auch für die Relation O ist es nützlich, sie für Punkte zu erweitern. Ein Punkt überlappt sich mit einer Region genau dann, wenn er ein Teil von ihr ist (D2.2.23).

(D2.2.22) $\forall q \in \texttt{point}\, \forall r \in \texttt{region}\ [\texttt{P}(q,r) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{IPT}(q,r)]$

(D2.2.23) $\forall q \in \texttt{point}\, \forall r \in \texttt{region}\ [\texttt{O}(q,r) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{P}(q,r)]$

2.2.4 Geraden

Auch für Geraden (Sorte line) wird die Relation der Inzidenz vorausgesetzt, um sie in Beziehung zu Punkten zu setzen. Für jede Gerade gibt es mindestens zwei Punkte, die auf ihr liegen (A2.2.24), und zwei verschiedene Geraden haben höchstens einen Punkt gemeinsam (A2.2.25). Schließlich wird definiert, dass drei Punkte genau dann *kolinear* sind, wenn sie verschieden sind und es eine Gerade gibt, auf der sie liegen (D2.2.26) (Eschenbach 1999b).

(A2.2.24) $\forall l \in \texttt{line}\, \exists q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [\neg(q_1 = q_2) \wedge q_1 \,\iota\, l \wedge q_2 \,\iota\, l]$

(A2.2.25) $\forall l_1, l_2 \in \texttt{line}\, \forall q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [$
$\neg(q_1 = q_2) \wedge q_1 \,\iota\, l_1 \wedge q_1 \,\iota\, l_2 \wedge q_2 \,\iota\, l_1 \wedge q_2 \,\iota\, l_2 \Rightarrow l_1 = l_2]$

(D2.2.26) $\forall q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\ [\texttt{COL}(q_1,q_2,q_3) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\neg(q_1 = q_2 \vee q_2 = q_3 \vee q_1 = q_3) \wedge \exists l \in \texttt{line}\ [q_1 \,\iota\, l \wedge q_2 \,\iota\, l \wedge q_3 \,\iota\, l]]$

Die dreistellige Relation der *Zwischenheit* steht in engem Zusammenhang mit Geraden. Sie wird speziell für die Definition von Halbräumen benötigt. Dabei soll $\beta(q_1, q_2, q_3)$ gelesen werden als „q_2 ist zwischen q_1 und q_3“. Für diese Relation gelten die folgenden Axiome (vgl. Eschenbach u. a. 1998): Wenn q_2 zwischen q_1 und q_3 ist, dann sind diese drei Punkte kolinear (A2.2.27). Außerdem ist die Relation der Zwischenheit symmetrisch bezüglich des ersten und dritten Parameters (A2.2.28). Axiom (A2.2.29) besagt, dass von drei Punkten höchstens einer zwischen den anderen beiden sein kann. Wenn drei Punkte kolinear sind, dann ist einer davon zwischen den beiden anderen (A2.2.30). Falls q zwischen q_1 und q_2 liegt und q' kolinear zu ihnen ist, dann liegt q' auf einer Seite bezüglich q (A2.2.31). Axiom (A2.2.32) legt fest, dass Geraden unbeschränkt sind.

(A2.2.27) $\forall q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\ [\beta(q_1,q_2,q_3) \Rightarrow \texttt{COL}(q_1,q_2,q_3)]$

(A2.2.28) $\forall q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\ [\beta(q_1,q_2,q_3) \Rightarrow \beta(q_3,q_2,q_1)]$

(A2.2.29) $\forall q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\ [\beta(q_1,q_2,q_3) \Rightarrow \neg\,\beta(q_2,q_1,q_3)]$

(A2.2.30) $\forall q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\ [\texttt{COL}(q_1,q_2,q_3) \Rightarrow$
$\beta(q_1,q_2,q_3) \vee \beta(q_2,q_1,q_3) \vee \beta(q_3,q_1,q_2)]$

(A2.2.31) $\forall q, q', q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [\beta(q_1,q,q_2) \wedge \texttt{COL}(q_1,q',q_2) \Rightarrow$
$\beta(q',q,q_2) \vee \beta(q_1,q,q')]$

(A2.2.32) $\forall q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [\neg(q_1 = q_2) \Rightarrow \exists q_3 \in \texttt{point}\ [\beta(q_1,q_2,q_3)]]$

Die Relation der Zwischenheit wird nun erweitert, um auch auf Positionen angewendet werden zu können: Eine Position p_1 ist genau dann zwischen zwei anderen

Positionen p_2 und p_3, wenn jeder Punkt von p_1 zwischen einem Punkt von p_2 und einem Punkt von p_3 ist, aber kein Punkt von p_1 zwischen einem Punkt von p_2 und p_3 und kein Punkt von p_3 zwischen einem Punkt von p_1 und p_2 liegt (D2.2.33).

(D2.2.33) $$\begin{aligned}&\forall p_1, p_2, p_3 \in \texttt{position}\ [\beta(p_1, p_2, p_3) \Leftrightarrow_{\text{def}}\\ &\quad \forall q_2 \in \texttt{point}\ [q_2\, \iota\, p_2 \Rightarrow \exists q_1, q_3 \in \texttt{point}\ [\\ &\qquad q_1\, \iota\, p_1 \wedge q_3\, \iota\, p_3 \wedge \beta(q_1, q_2, q_3)]] \wedge\\ &\quad \forall q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\ [q_1\, \iota\, p_1 \wedge q_2\, \iota\, p_2 \wedge q_3\, \iota\, p_3 \Rightarrow\\ &\qquad \neg\, \beta(q_2, q_3, q_1) \wedge \neg\, \beta(q_3, q_1, q_2)]]\end{aligned}$$

2.2.5 Ebenen

Ebenen (Sorte `plane`) besitzen immer mindestens drei Punkte, die nicht kolinear sind (A2.2.34). Zwei Ebenen, die verschieden sind, haben nie drei Punkte gemeinsam, die nicht kolinear sind (A2.2.35). Ebenen sind unbeschränkt (A2.2.36) und konvex (A2.2.37). Schließlich wird durch Axiom (A2.2.38) eine zusätzliche Einschränkung für die Ordnung in einer Ebene gemacht: Wenn eine Gerade ein Dreieck betritt und die Gerade und das Dreieck in derselben Ebene liegen, dann verlässt sie es auch. Dieses Axiom wird auch als *Axiom von Pasch* bezeichnet. Eine Illustration zu diesem Axiom wird von Eschenbach u. a. (1998) gegeben.

(A2.2.34) $$\begin{aligned}&\forall pl \in \texttt{plane}\, \exists q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\ [\\ &\quad \neg(q_1 = q_2 \vee q_2 = q_3 \vee q_1 = q_3) \wedge \neg\, \texttt{COL}(q_1, q_2, q_3) \wedge\\ &\quad q_1\, \iota\, pl \wedge q_2\, \iota\, pl \wedge q_3\, \iota\, pl]\end{aligned}$$

(A2.2.35) $$\begin{aligned}&\forall pl_1, pl_2 \in \texttt{plane}\, \forall q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\ [\\ &\quad \neg(q_1 = q_2 \vee q_2 = q_3 \vee q_1 = q_3) \wedge \neg\, \texttt{COL}(q_1, q_2, q_3) \wedge\\ &\quad q_1\, \iota\, pl_1 \wedge q_1\, \iota\, pl_2 \wedge q_2\, \iota\, pl_1 \wedge q_2\, \iota\, pl_2 \wedge q_3\, \iota\, pl_1 \wedge q_3\, \iota\, pl_2 \Rightarrow pl_1 = pl_2]\end{aligned}$$

(A2.2.36) $$\begin{aligned}&\forall pl \in \texttt{plane}\, \forall q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [\\ &\quad \neg(q_1 = q_2) \wedge q_1\, \iota\, pl \wedge q_2\, \iota\, pl \Rightarrow \exists q_3 \in \texttt{point}\ [q_3\, \iota\, pl \wedge \beta(q_1, q_2, q_3)]]\end{aligned}$$

(A2.2.37) $$\forall pl \in \texttt{plane}\, \forall q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\ [q_1\, \iota\, pl \wedge q_3\, \iota\, pl \wedge \beta(q_1, q_2, q_3) \Rightarrow q_2\, \iota\, pl]$$

(A2.2.38) $$\begin{aligned}&\forall q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\, \forall pl \in \texttt{plane}\, \forall l \in \texttt{line}\ [\\ &\quad q_1\, \iota\, pl \wedge q_2\, \iota\, pl \wedge q_3\, \iota\, pl \wedge\\ &\quad \neg(q_1\, \iota\, l) \wedge \neg(q_2\, \iota\, l) \wedge \neg(q_3\, \iota\, l) \wedge \exists q \in \texttt{point}\ [q\, \iota\, l \wedge \beta(q_1, q, q_3)] \Rightarrow\\ &\qquad \exists q' \in \texttt{point}\ [q'\, \iota\, l \wedge (\beta(q_1, q', q_2) \vee \beta(q_2, q', q_3))]]\end{aligned}$$

2.2.6 Halbräume

Halbräume (Sorte `halfspace`) sind Regionen mit bestimmten Eigenschaften. Die Randpunkte eines Halbraumes bilden eine Ebene (A2.2.39), die als *Randebene* (`BPL`) bezeichnet wird (D2.2.40). Außerdem sind Halbräume konvex (A2.2.41). Zwei Halbräume sind genau dann kongruent, wenn der eine den andere enthält (D2.2.42). Diese Axiomatisierung von Halbräumen geschieht in Anlehnung an die Beschreibung von Halbebenen von Eschenbach (1999b). Dort wird jedoch der Begriff des

Randpunktes über die Relation β und nicht über Regionen definiert.

(A2.2.39) $\forall h \in \texttt{halfspace}\, \exists pl \in \texttt{plane}\, \forall q \in \texttt{point}\ [\, q \,\iota\, pl \Leftrightarrow \texttt{BDPT}(q, h)]$

(D2.2.40) $\forall h \in \texttt{halfspace}\, \forall pl \in \texttt{plane}\ [$
$\texttt{BPL}(h) = pl \Leftrightarrow_{\text{def}} \forall q \in \texttt{point}\ [\, q \,\iota\, pl \Leftrightarrow \texttt{BDPT}(q, h)]]$

(A2.2.41) $\forall h \in \texttt{halfspace}\, \forall q_1, q_1, q_3 \in \texttt{point}\ [\, q_1 \,\iota\, h \wedge q_3 \,\iota\, h \wedge \beta(q_1, q_2, q_3) \Rightarrow q_2 \,\iota\, h]$

(D2.2.42) $\forall h_1, h_2 \in \texttt{halfspace}\ [\, h_1 \lesssim h_2 \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{P}(h_1, h_2) \vee \texttt{P}(h_2, h_1)]$

2.2.7 Richtungen

Richtungen (Sorte `direction`) sind lineare und gerichtete geometrische Entitäten. Auf ihnen ist die lineare Ordnungsrelation der *Präzedenz* ($\prec$) definiert. Der Ausdruck $\prec(d, q_1, q_2)$ gibt an, dass der Punkt q_1 bezüglich dieser Ordnung vor dem Punkt q_2 auf der Richtung d liegt (vgl. Eschenbach 1999b). Im Folgenden werden zusätzliche Eigenschaften für Richtungen eingeführt, die von Eschenbach u. a. (2000) für Pfade gefordert werden. Ein Punkt ist zu einer Richtung genau dann inzident, wenn er durch Präzedenz mit einem anderen Punkt der Richtung verbunden ist (D2.2.43). Die Relation der Präzedenz ist transitiv (A2.2.44) und irreflexiv (A2.2.45). Außerdem wird jedes Paar von verschiedenen Punkten, die zu der Richtung inzident sind, durch die Präzedenz in Relation gesetzt (A2.2.46). Damit können Richtungen keine Zyklen oder Zweige und auch keine unzusammenhängenden Teile besitzen.

(D2.2.43) $\forall d \in \texttt{direction}\, \forall q_1 \in \texttt{point}\ [$
$q_1 \,\iota\, d \Leftrightarrow \exists q_2 \in \texttt{point}\ [\prec(d, q_1, q_2) \vee \prec(d, q_2, q_1)]]$

(A2.2.44) $\forall d \in \texttt{direction}\, \forall q_1, q_2, q_3 \in \texttt{point}\ [\prec(d, q_1, q_2) \wedge \prec(d, q_2, q_3) \Rightarrow$
$\prec(d, q_1, q_3)]$

(A2.2.45) $\forall d \in \texttt{direction}\, \forall q \in \texttt{point}\ [\neg \prec(d, q, q)]$

(A2.2.46) $\forall d \in \texttt{path}\, \forall q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [\, q_1 \,\iota\, d \wedge q_2 \,\iota\, d \wedge \neg(q_1 = q_2) \Rightarrow$
$(\prec(d, q_1, q_2) \vee \prec(d, q_2, q_1))]$

Eine Richtung d_1 ist genau dann ein Teil einer anderen Richtung d_2, wenn Präzedenz auf d_1 Präzedenz auf d_2 impliziert (D2.2.47). Diese Relation ist antisymmetrisch (A2.2.48) (vgl. Eschenbach u. a. 2000).

(D2.2.47) $\forall d_1, d_2 \in \texttt{direction}\ [\, d_1 \sqsubseteq d_2 \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\forall q_1, q_2 \in \texttt{point}[\prec(d_1, q_1, q_2) \Rightarrow \prec(d_2, q_1, q_2)]]$

(A2.2.48) $\forall d_1, d_2 \in \texttt{direction}\ [\, d_1 \sqsubseteq d_2 \wedge d_2 \sqsubseteq d_1 \Rightarrow d_1 = d_2]$

Die Relation der Präzedenz soll nun auf Positionen erweitert werden: Eine Position p_1 ist präzedent zu einer Position p_2 relativ zu der Richtung d genau dann, wenn es einen Punkt von p_1 gibt, der präzedent zu einem Punkt von p_2 ist, und es keinen Punkt in p_2 gibt, der präzedent zu einem Punkt von p_1 ist (D2.2.49) (vgl. Eschenbach 1999b).

(D2.2.49) $\forall d \in \texttt{direction}\, \forall p_1, p_2 \in \texttt{position}\ [\prec(d, p_1, p_2) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\exists q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [\, q_1 \,\iota\, p_1 \wedge q_2 \,\iota\, p_2 \wedge \prec(d, q_1, q_2)] \wedge$
$\forall q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [\, q_1 \,\iota\, p_1 \wedge q_2 \,\iota\, p_2 \Rightarrow \neg \prec(d, q_2, q_1)]]$

2.2.8 Pfade

Pfade (Sorte `path`) sind Richtungen, die beschränkt sind. Deshalb besitzen Pfade sowohl einen Startpunkt (D2.2.50 und A2.2.51) als auch einen Endpunkt (D2.2.52 und A2.2.53) (vgl. Eschenbach u. a. 2000). Wenn alle Punkte zweier Pfade w und w' auf einer Geraden liegen, sie denselben Startpunkt haben und der Endpunkt von w' auf w liegt, dann soll w' ein Teil von w sein (A2.2.54). Dieses Axiom kann nicht aus den Axiomen für Richtungen abgeleitet werden. Es wird benötigt, um das Theorem (T4.2.17) in Abschnitt 4.2 beweisen zu können.

(D2.2.50) $\forall q \in \texttt{point}\, \forall w \in \texttt{path}\ [q = \texttt{STPT}(w) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$q\, \iota\, w \wedge \forall q' \in \texttt{point}\ [\neg(q' = q) \wedge q'\, \iota\, w \Rightarrow \prec(w, q, q')]]$

(A2.2.51) $\forall w \in \texttt{path}\, \exists q \in \texttt{point}\ [q = \texttt{STPT}(w)]$

(D2.2.52) $\forall q \in \texttt{point}\, \forall w \in \texttt{path}\ [q = \texttt{FPT}(w) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$q\, \iota\, w \wedge \forall q' \in \texttt{point}\ [\neg(q' = q) \wedge q'\, \iota\, w \Rightarrow \prec(w, q', q)]]$

(A2.2.53) $\forall w \in \texttt{path}\, \exists q \in \texttt{point}\ [q = \texttt{FPT}(w)]$

(A2.2.54) $\forall l \in \texttt{line}\, \forall w, w' \in \texttt{path}\ [$
$(\forall q \in \texttt{point}\ [(q\, \iota\, w \vee q\, \iota\, w') \Rightarrow q\, \iota\, l] \wedge$
$\texttt{STPT}(w) = \texttt{STPT}(w') \wedge \texttt{FPT}(w')\, \iota\, w) \Rightarrow w' \sqsubseteq w]$

2.2.9 Referenzrahmen

Referenzrahmen bestehen aus einer Position und einer Menge von Richtungen und Halbebenen. Sie beschreiben die Orientierung und Position einer wahrnehmbaren Entität zu einem Zeitpunkt auf geometrische Art und Weise (vgl. Eschenbach 1999b). Dazu werden die Abbildungen `LEFT-HS`, `RIGHT-HS`, `FRONT-BACK-DIR` und `TOP-BOTTOM-DIR` eingeführt. Wenn die Formel $\texttt{LEFT-HS}(h, f)$ bzw. $\texttt{RIGHT-HS}(h, f)$ gilt, dann bezeichnet h denjenigen Halbraum, der bezüglich des Referenzrahmens f links bzw. rechts ist. Der Ausdruck $\texttt{FRONT-BACK-DIR}(d, f)$ bzw. $\texttt{TOP-BOTTOM-DIR}(d, f)$ drückt aus, dass d eine Richtung ist, durch deren Präzedenz-Relation angegeben wird, welche Punkte vor bzw. über anderen Punkten relativ zu dem Referenzrahmen f liegen (*vor-hinter-Richtung* bzw. *oben-unten-Richtung*). Zur Orientierung einer wahrnehmbaren Entität können mehrere solcher Richtungen gehören, beispielsweise wenn die wahrnehmbare Entität eine breite Vorderseite besitzt (vgl. Eschenbach 1999b). Es kann auch sein, dass durch eine wahrnehmbare Entität nicht alle dieser Richtungen oder Halbebenen gegeben sind. Zum Beispiel liefert ein Bleistift nur einen Referenzrahmen, durch den „vor“ von „hinter“, aber nicht „links“ von „rechts“ unterschieden werden kann (vgl. Wunderlich und Herweg 1991). Schließlich soll jeder Referenzrahmen auch die Position der wahrnehmbaren Entität, in der sich diese zum Zeitpunkt ihrer Abbildung auf den Referenzrahmen befunden hat, enthalten. Sie wird durch die Funktion $\texttt{POS}(f)$ beschrieben.

Die Region, die vor bzw. über einer Position p relativ zu einem Referenzrahmen ist, ist die Summe aller Regionen, die Präzedent zu p bezüglich der vor-hinter-Richtung bzw. über-unter-Richtung sind. Dabei darf sich die Position nicht mit der Ergebnisregion überlappen (D2.2.55 bzw. D2.2.56). Analog wird diejenige Region definiert, die sich hinter bzw. unter einer Position befindet (D2.2.57 bzw. D2.2.58). Die Region, die sich links bzw. rechts von einer Position befindet, ist durch den Halbraum gegeben, der kongruent zu einem Halbraum des Referenzrahmens ist und der durch

die Position von außen berührt wird (D2.2.59 bzw. D2.2.60). Diese Definitionen sind angelehnt an die Untersuchungen von Eschenbach (1999b). Dort wird jedoch nur der zweidimensionale Fall betrachtet und es wird keine Summierung durchgeführt. Die Summierung wird in dieser Arbeit benötigt, da die hier eingeführten Funktionen zur Definition der Ortsfunktionen von dimensionalen Präpositionen verwendet werden, und deren Ergebnis eine eindeutige Region sein muss. Es ist zu beachten, dass die hier beschriebenen Funktionen nicht für alle Referenzrahmen definiert sind, da nicht alle Referenzrahmen einen linken bzw. rechten Halbraum spezifizieren.

(D2.2.55) $\forall f \in \texttt{for}\, \forall r \in \texttt{region}\, \forall p \in \texttt{position}\ [r = \texttt{VOR}(p, f) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\neg\, \texttt{O}(p, r) \wedge r = \Sigma r' \in \texttt{region}\ [$
$\exists d \in \texttt{direction}\ [\texttt{FRONT-BACK-DIR}(d, f) \wedge \prec(d, r', p)]]]$

(D2.2.56) $\forall f \in \texttt{for}\, \forall r \in \texttt{region}\, \forall p \in \texttt{position}\ [r = \texttt{ÜBER}(p, f) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\neg\, \texttt{O}(p, r) \wedge r = \Sigma r' \in \texttt{region}\ [$
$\exists d \in \texttt{direction}\ [\texttt{TOP-BOTTOM-DIR}(d, f) \wedge \prec(d, r', p)]]]$

(D2.2.57) $\forall f \in \texttt{for}\, \forall r \in \texttt{region}\, \forall p \in \texttt{position}\ [r = \texttt{HINTER}(p, f) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\neg\, \texttt{O}(p, r) \wedge r = \Sigma r' \in \texttt{region}\ [$
$\exists d \in \texttt{direction}\ [\texttt{FRONT-BACK-DIR}(d, f) \wedge \prec(d, p, r')]]]$

(D2.2.58) $\forall f \in \texttt{for}\, \forall r \in \texttt{region}\, \forall p \in \texttt{position}\ [r = \texttt{UNTER}(p, f) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\neg\, \texttt{O}(p, r) \wedge r = \Sigma r' \in \texttt{region}\ [$
$\exists d \in \texttt{direction}\ [\texttt{TOP-BOTTOM-DIR}(d, f) \wedge \prec(d, p, r')]]]$

(D2.2.59) $\forall f \in \texttt{for}\, \forall r \in \texttt{region}\, \forall p \in \texttt{position}\ [r = \texttt{LINKS}(p, f) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\exists h \in \texttt{halfspace}\ [\texttt{LEFT-HS}(h, f) \wedge r \leqslant h \wedge$
$\exists q \in \texttt{point}\ [\texttt{BDPT}(q, r) \wedge q\, \iota\, p] \wedge \neg\, \texttt{O}(p, r)]]$

(D2.2.60) $\forall f \in \texttt{for}\, \forall r \in \texttt{region}\, \forall p \in \texttt{position}\ [r = \texttt{RECHTS}(p, f) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\exists h \in \texttt{halfspace}\ [\texttt{RIGHT-HS}(hp, f) \wedge r \leqslant h \wedge$
$\exists q \in \texttt{point}\ [\texttt{BDPT}(q, r) \wedge q\, \iota\, p] \wedge \neg\, \texttt{O}(p, r)]]$

Außerdem soll es möglich sein, einen Referenzrahmen tangential zu einer Richtung d in einem Punkt p zu bilden, zum Beispiel für einen Bewegungsverlauf. Der Referenzrahmen wird durch die Funktion $\texttt{FOR}(d, p)$ beschrieben. Er soll der Orientierung des imaginären Wanderers in diesem Punkt, falls dieser eine Bewegung mit der Trajektorie d durchführt, entsprechen.

2.3 Lokalisierung

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie wahrnehmbare Entitäten auf geometrische Entitäten abgebildet werden können. Dazu gehören zunächst Position und Orientierung der wahrnehmbaren Entität. Da die proximale Außenregion von vielen Parametern abhängt, werden auch für sie separate Abbildungen eingeführt.

Bei der Lokalisierung muss generell zwischen mobilen und immobilen wahrnehmbaren Entitäten unterschieden werden, da im ersten Fall eine Lokalisierung nur durch eine Situation, im zweiten Fall auch unabhängig davon geschehen kann.

2.3.1 Position

Der Ort einer wahrnehmbaren Entität wird durch eine Position (Sorte `position`) repräsentiert. Die Position von Landmarken soll als Region angenommen werden. Die Position von Agenten, insbesondere diejenige des imaginären Wanderers, soll dagegen durch einen Punkt repräsentiert werden. Dadurch kann ein Agent keine anderen wahrnehmbaren Entitäten enthalten und er kann dadurch auch keine wahrnehmbaren Entitäten verdecken, wodurch Sichtlinien als statisch angenommen werden können (zur Definition von Sichtlinien siehe Abschnitt 5.2).

Da Positionen nicht beweglich sind, muss eine Abbildung von mobilen wahrnehmbaren Entitäten auf Positionen an Situationen gebunden werden. Die Formel $\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{BE-AT}(e, p))$ drückt aus, dass sich die wahrnehmbare Entität e mindestens einmal während der Situation s an der Position p befindet. Jede wahrnehmbare Entität soll in jeder Situation eine Position besitzen (A2.3.1 und A2.3.2). Immobile wahrnehmbare Entitäten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie sich in jeder Situation an derselben Position befinden (A2.3.3). Diese kann dann auch direkt durch eine Funktion ohne Bezug auf eine Situation angegeben werden (D2.3.4).

(A2.3.1) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \exists q \in \texttt{point}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{BE-AT}(a, q))]$

(A2.3.2) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall l \in \texttt{landmark}\, \exists r \in \texttt{region}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{BE-AT}(l, r))]$

(A2.3.3) $\forall l \in \texttt{landmark}\, \forall r \in \texttt{region}\ [$
$\exists s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{BE-AT}(l, r))] \Rightarrow$
$\forall s' \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s', \texttt{BE-AT}(l, r))]]$

(D2.3.4) $\forall l \in \texttt{landmark}\, \forall r \in \texttt{region}\ [$
$\texttt{PLACE}(l) = r \Leftrightarrow_{\text{def}} \forall s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{BE-AT}(l, r))]]$

2.3.2 Proximale Außenregion

Bei mobilen Entitäten ist außer ihrer Position auch ihre proximale Außenregion von der Zeit abhängig. Durch den Ausdruck $\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{EXT}(e, r))$ wird beschrieben, dass in der Situation s die proximale Außenregion der wahrnehmbaren Entität e mindestens einmal der Region r entspricht. Es soll angenommen werden, dass jede wahrnehmbare Entität eine proximale Außenregion besitzt (A2.3.5). Für alle immobilen wahrnehmbaren Entitäten soll angenommen werden, dass sich diese nicht verändert (A2.3.6).

(A2.3.5) $\forall e \in \texttt{perceptible-entity}\, \forall s \in \texttt{situation}\, \exists r \in \texttt{region}\ [$
$\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{EXT}(r, e))]$

(A2.3.6) $\forall l \in \texttt{landmark}\, \forall r \in \texttt{region}\ [$
$\exists s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{EXT}(r, l))] \Rightarrow$
$\forall s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{EXT}(r, l))]]$

Die proximale Außenregion einer Landmarke kann deshalb durch eine Funktion, `EXT`, beschrieben werden (D2.3.7). Außerdem soll bei Landmarken davon ausgegangen werden, dass ihre proximale Außenregion ihre Position von außen berührt (A2.3.8)

(vgl. Wunderlich und Herweg 1991).

(D2.3.7) $\forall l \in \texttt{landmark}\, \forall r \in \texttt{region}\ [r = \texttt{EXT}(l) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\forall s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{EXT}(r, l))]]$

(A2.3.8) $\forall l \in \texttt{landmark}\, \forall r \in \texttt{region}\ [$
$r = \texttt{EXT}(l) \Rightarrow \texttt{EC}(r, \texttt{PLACE}(l))]$

2.3.3 Orientierung

Die Orientierung einer wahrnehmbaren Entität kann durch einen *Referenzrahmen* (siehe Abschnitt 2.2.9) geometrisch beschrieben werden. Da wahrnehmbare Entitäten mobil sein können, muss ihre Abbildung auf Referenzrahmen an Situationen gebunden werden. Der Ausdruck $\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{FOR}(f, e))$ beschreibt, dass während der Situation s die wahrnehmbare Entität e mindestens einmal den Referenzrahmen f induziert. Referenzrahmen sollen auch die Position der wahrnehmbaren Entität, deren Orientierung sie beschreiben, beinhalten (A2.3.9). Referenzrahmen müssen nicht für jede wahrnehmbare Entität existieren, beispielsweise induziert ein Ball keinen sinnvollen Referenzrahmen. Für den imaginären Wanderer wird jedoch angenommen, dass für ihn zu jedem Zeitpunkt ein solcher existiert (A2.3.10). Für Landmarken soll gelten, dass diese, falls sie einen Referenzrahmen besitzen, in jeder Situation denselben Referenzrahmen induzieren (A2.3.11). Dadurch kann für Landmarken eine Funktion definiert werden, die ihren Referenzrahmen unabhängig von Situationen zurückgibt (D2.3.12).

(A2.3.9) $\forall e \in \texttt{perceptible-entity}\, \forall s \in \texttt{situation}\, \forall p \in \texttt{position}\, \forall f \in \texttt{for}\ [$
$\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{FOR}(f, e) \& \texttt{BE-AT}(e, p)) \Rightarrow \texttt{POS}(f) = p]$

(A2.3.10) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \exists f \in \texttt{for}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{FOR}(f, a))]$

(A2.3.11) $\forall l \in \texttt{landmark}\, \forall f \in \texttt{for}\ [$
$\exists s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{FOR}(f, l))] \Rightarrow$
$\forall s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{FOR}(f, l))]]$

(D2.3.12) $\forall l \in \texttt{landmark}\, \forall f \in \texttt{for}\ [r = \texttt{FOR}(l) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\forall s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{FOR}(r, l))]]$

Kapitel 3

Repräsentationssprache

In diesem Kapitel wird die formale Sprache beschrieben, durch die Positionierungs-, Bewegungs- und Sichtaussagen repräsentiert werden. Dabei werden die Anforderungen dieser drei Arten von Sätzen, die in Kapitel 1 beschrieben wurden, berücksichtigt. Dies gilt besonders für die Aussagen über eine mögliche Mobilität von beteiligten Entitäten. Außerdem werden, soweit möglich, bestehende Vorschläge zur Repräsentation von Positionierungs-, Bewegungs- und Sichtaussagen integriert.

Zur Repräsentation der Positionierungs-, Bewegungs- und Sichtaussagen wird nicht die formale Sprache verwendet, die in dem Projekt „Geometrischer Agent“ (siehe Abschnitt 1.2) benutzt wird. Diese ist zunächst noch in der Entwicklung. Außerdem ist sie unvollständig im Hinblick auf die Repräsentation von Sichtaussagen. Schließlich werden Erweiterungen benötigt, um die Beobachtungen, die in dieser Arbeit gemacht werden, formalisieren zu können.

3.1 Positionierungsaussagen

Positionierungsaussagen setzen das zu lokalisierende Objekt („LO“) durch ein Positionierungsverb und eine lokale Präposition räumlich in Bezug zu einem oder mehreren Referenzobjekten („RO“) und gegebenenfalls einem Referenzsystem (siehe Abschnitt 1.3).

Die lokale Präposition beschreibt zunächst eine Relation (*Ortsrelation*, durch * in den Formeln markiert), die die Referenzobjekte und gegebenenfalls das Referenzsystem auf eine Region (*charakteristische Region*) abbildet, in der LO lokalisiert wird. Diese Region ist dabei zu jedem Zeitpunkt eindeutig bestimmt. Falls die Referenzobjekte und das Referenzsystem immobil sind, ist diese Region unabhängig von der Zeit. Die Ortsrelation ist dann eine Funktion bezüglich der Referenzobjekte und des Referenzsystems und wird als *Ortsfunktion* bezeichnet. Sie wird ebenfalls durch * in den Formeln gekennzeichnet. Außer der Ortsfunktion kann eine lokale Präposition noch eine zusätzliche Einschränkung für die räumliche Relation zwischen den Referenzobjekten und dem zu lokalisierenden Objekt festlegen. zum Beispiel wird durch die lokale Präposition „auf“ in dem Satz „das Blatt ist auf dem Tisch“ festgelegt, dass das Blatt und der Tisch sich berühren müssen. Diese Einschränkung wird durch die *einschränkende Relation* von lokalen Präpositionen ausgedrückt und ist in den Formeln durch den Index $_c$ gekennzeichnet (vgl. Wunderlich und Herweg 1991, dort jedoch ohne Bezug auf die Zeit).

Wie bereits erwähnt werden in dieser Arbeit unter den lokalen Präpositionen nur

die topologischen Präpositionen, die dimensionalen Präpositionen und die Präposition „zwischen“ näher betrachtet.

3.1.1 Topologische Präpositionen

Die topologischen Präpositionen beziehen sich nur auf ein Referenzobjekt und benötigen kein Referenzsystem. Da sich sowohl das zu lokalisierende Objekt als auch das Referenzobjekt bewegen können, werden Positionierungsaussagen, die eine topologische Präposition enthalten, durch die Formel $\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{TOP-PRÄP}(lo, ro))$ repräsentiert. Dabei bezeichnet s die Situation der Positionierungsaussage, lo das zu lokalisierende Objekt und ro das Referenzobjekt. Bei TOP-PRÄP handelt es sich um eine Schema-Variable für die topologische Präposition, die in der Positionierungsaussage verwendet wird. Die topologische Präposition bestimmt zu jedem Zeitpunkt der Situation durch die Ortsrelation $\texttt{TOP-PRÄP}^*$ die charakteristische Region, in der dann LO lokalisiert wird. Außerdem gilt während der gesamten Situation die einschränkende Relation $\texttt{TOP-PRÄP}_c$ zwischen LO und RO (A3.1.1):

$$\begin{aligned}(\text{A3.1.1}) \quad \forall lo, ro \in \texttt{perceptible-entity}\ [&\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{TOP-PRÄP}(lo, ro)) \Leftrightarrow \\ &\forall p \in \texttt{position}\, \forall r \in \texttt{region}\ [\\ &\quad \texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{BE-AT}(lo, p) \& \texttt{TOP-PRÄP}^*(r, ro)) \Rightarrow \texttt{P}(p, r)] \wedge \\ &\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{TOP-PRÄP}_c(lo, ro))]\end{aligned}$$

Falls das Referenzobjekt immobil ist, ist die charakteristische Region in jeder Situation dieselbe und kann durch die Ortsfunktion der lokalen Präposition beschrieben werden (D3.1.2):

$$\begin{aligned}(\text{D3.1.2}) \quad \forall ro \in \texttt{landmark}\, \forall r \in \texttt{region}\ [&r = \texttt{TOP-PRÄP}^*(ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} \\ &\forall s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{TOP-PRÄP}^*(r, ro))]]\end{aligned}$$

3.1.2 Dimensionale Präpositionen

Die dimensionalen Präpositionen benötigen außer dem Referenzobjekt noch ein Referenzsystem, um eindeutig zu sein. Es wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um eine wahrnehmbare Entität handelt. Positionierungsaussagen, die eine dimensionale Präposition enthalten, werden durch die Formel $\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{DIM-PRÄP}(lo, ro, rs))$ repräsentiert. Dabei bezeichnet s die Situation der Positionierungsaussage, lo das zu lokalisierende Objekt, ro das Referenzobjekt und rs das Referenzsystem. Die Schema-Variable DIM-PRÄP steht für die verwendete dimensionale Präposition. Die Ortsrelation von dimensionalen Präpositionen ($\texttt{DIM-PRÄP}^*$) ist außer von dem Referenzobjek, auch von dem Referenzsystem abhängig. Deshalb kann die Bedeutung von dimensionalen Präpositionen folgendermaßen beschrieben werden (A3.1.3):

$$\begin{aligned}(\text{A3.1.3}) \quad \forall lo, ro, rs \in \texttt{perceptible-entity}\ [&\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{DIM-PRÄP}(lo, ro, rs)) \Leftrightarrow \\ &\forall p \in \texttt{position}\, \forall r \in \texttt{region}\ [\\ &\quad \texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{BE-AT}(lo, p) \& \texttt{TOP-PRÄP}^*(r, ro, rs)) \Rightarrow \texttt{P}(p, r)] \wedge \\ &\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{DIM-PRÄP}_c(lo, ro))]\end{aligned}$$

Auch hierbei bezeichnet $\texttt{DIM-PRÄP}_c$ wieder die einschränkende Relation der dimensionalen Präposition.

Wenn das Referenzobjekt und das Referenzsystem immobil sind, dann kann die Ortsfunktion der dimensionalen Präposition definiert werden als (D3.1.4):

(D3.1.4) $$\forall ro, rs \in \texttt{landmark}\, \forall r \in \texttt{region}\ [r = \texttt{DIM-PRÄP}^*(ro, rs) \Leftrightarrow_{\text{def}} \forall s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{DIM-PRÄP}^*(r, ro, rs))]]$$

3.1.3 Sonstige lokale Präpositionen

Der lineare Fall der Präposition „zwischen“ wird durch die Formel $\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{ZWISCHEN}(lo, ro_1, ro_2))$ repräsentiert. Sie besagt, dass sich die wahrnehmbare Entität lo während der Situation s zwischen den wahrnehmbaren Entitäten ro_1 und ro_2 befindet. Die Bedeutung der lokalen Präposition „zwischen“ kann somit durch (A3.1.5) beschrieben werden:

(A3.1.5)
$$\forall lo, ro_1, ro_2 \in \texttt{perceptible-entity}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{ZWISCHEN}(lo, ro, rs)) \Leftrightarrow \forall p \in \texttt{position}\, \forall r \in \texttt{region}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{BE-AT}(lo, p) \& \texttt{ZWISCHEN}^*(r, ro_1, ro_2)) \Rightarrow \texttt{P}(p, r)] \wedge \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{ZWISCHEN}_c(lo, ro_1, ro_2))]$$

Dabei bezeichnet $\texttt{ZWISCHEN}_c$ die einschränkende Relation der lokalen Präposition „zwischen“. Falls beide Referenzobjekte der lokalen Präposition immobil sind, kann die Ortsfunktion von „zwischen“ verwendet werden (D3.1.6):

(D3.1.6) $$\forall ro_1, ro_2 \in \texttt{landmark}\, \forall r \in \texttt{region}\ [r = \texttt{ZWISCHEN}^*(ro_1, ro_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \forall s \in \texttt{situation}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{ZWISCHEN}^*(r, ro_1, ro_2))]]$$

3.2 Bewegungsaussagen

Bewegungsaussagen sind Sätze, die ein Bewegungsverb enthalten. Der Verlauf der Bewegung wird durch direktionale Präpositionen relativ zu einem oder mehreren Referenzobjekten („RO“) und gegebenenfalls einem Referenzsystem näher beschrieben (siehe Abschnitt 1.4).

Bewegungsverben werden durch den Ausdruck $\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w))$ repräsentiert, der besagt, dass während der Situation s der Agent a den Pfad w vollständig durchläuft (vgl. Eschenbach u. a. 2000).

Direktionale Präpositionen beschreiben zunächst eine Funktion (*Ortsfunktion*), die die Referenzobjekte und, falls vorhanden, das Referenzsystem auf eine Region abbilden. Durch diese Funktion wird dann mit Hilfe einer weiteren Relation (*Pfad-Relation*) der Verlauf des Pfades beschrieben (vgl. Eschenbach u. a. 2000). Da angenommen wird, dass die Referenzobjekte und das Referenzsystem immobil sind, kann diese Funktion unabhängig von Situationen beschrieben werden. Hier wird außerdem im Folgenden ein *einschränkendes Prädikat* analog zu Positionierungsaussagen eingeführt, durch das zusätzliche Einschränkungen für das Verhältnis zwischen dem Pfad und den Referenzobjekten ausgedrückt werden können.

Die Pfad-Relation $\texttt{TO}(w, r)$ drückt aus, dass der Pfad w in der Region r endet, aber nicht darin beginnt. Durch $\texttt{FROM}(w, r)$ wird genau der umgekehrte Fall

beschrieben. Besitzt ein Pfad eine Verlängerung, die in r beginnt bzw. endet, dann wird dies durch die Pfad-Relation $\texttt{AWAY-FROM}(w, r)$ bzw. $\texttt{TOWARDS}(w, r)$ ausgedrückt. Das Prädikat $\texttt{VIA}(w, r)$ schließlich beschreibt, dass der Pfad w durch die Region r geht und $\texttt{ALONG}(w, r)$ gibt an, dass er vollständig in r enthalten ist (bis auf ALONG vgl. Eschenbach u. a. 2000).

Direktionale Präpositionen können in Kombination mit einer lokalen Präposition verwendet werden. Beispielsweise wird in der Bewegungsaussage „Gehe unter dem Übergang durch“ die direktionale Präposition „durch“ in Verbindung mit der lokalen Präposition „unter“ verwendet. In einem solchen Fall ist dann die Ortsfunktion der direktionalen Präposition durch die Ortsfunktion der lokalen Präposition gegeben.

Die direktionalen Präpositionen „in“ (z.B. „Gehe in das Haus“) und „zu“ (z.B. „Gehe zu dem Haus“) können nicht in Kombination mit einer lokalen Präposition verwendet werden. Beide sagen aus, dass der Pfad, den sie beschreiben, durch die Pfad-Relation TO in Beziehung zu dem Ergebnis ihrer Ortsfunktion steht. Dabei besitzt die direktionale Präposition „in“, analog zu der lokalen Präposition „in“, die Ortsfunktion $\texttt{IN}^*$ und „zu“ die Ortsfunktion $\texttt{BEI}^*$. Auch die direktionalen Präpositionen „aus“ und „von“ können mit keiner lokalen Präposition kombiniert werden. Sie beschreiben den entsprechenden Pfad durch die Pfad-Relation FROM. Dabei wird bei „aus“ die Ortsfunktion $\texttt{IN}^*$ und bei „von“ die Ortsfunktion $\texttt{BEI}^*$ verwendet. Die direktionalen Präpositionen „in Richtung von“ und „aus der Richtung von“ geben beide an, dass der Pfad durch die Ortsfunktion $\texttt{BEI}^*$ beschrieben wird. Bei der Präposition “in Richtung von“ wird dazu die Pfad-Relation TOWARDS verwendet und für die Präposition „aus der Richtung von“ die Pfad-Relation AWAY-FROM. Ein Pfad wird mit Hilfe der Pfad-Relation VIA beschrieben, wenn eine der Präpositionen „durch“ oder „vorbei“ verwendet wird. Werden diese Präpositionen in Kombination mit einer lokalen Präposition gebraucht, dann ist ihre Ortsfunktion durch diese lokale Präposition bestimmt (z.B. „Gehe unter dem Übergang durch“ oder „Gehe an dem Haus vorbei“). Bei „vorbei“ muss die lokale Präposition immer vorhanden sein, „durch“ kann jedoch auch ohne lokale Präposition benutzt werden („Gehe durch die Türe“). In diesem Fall findet die Ortsfunktion $\texttt{IN}^*$ Verwendung. Wenn die direktionale Präposition „entlang“ gebraucht wird, dann wird der Pfad durch die Pfad-Relation ALONG beschrieben. Diese Präposition kann in Kombination mit einer lokalen Präposition verwendet werden (z.B. „Gehe zwischen dem Zaun und dem Haus entlang“). Dann ist ihre Ortsfunktion durch die Ortsfunktion der lokalen Präposition gegeben. Wenn sie ohne lokale Präposition vorkommt, ist die verwendete Ortsfunktion von der Art des Referenzobjektes abhängig. Falls „entlang“ auf eine Boden-Entität angewendet wird (z.B. einem Flur oder Gang), dann wird die Ortsfunktion $\texttt{AUF}^*$ (sonst $\texttt{IN}^*$) benutzt.

Nach dieser Analyse kann das Repräsentationsformat von direktionalen Präpositionen festgelegt werden. Es müssen dabei die verschiedenen Varianten der möglichen Ortsfunktionen berücksichtigt werden. Die Ortsfunktionen der direktionalen Präpositionen entsprechen immer der Ortsfunktion einer lokalen Präposition:

$$\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [\texttt{DIR-TOP-PRÄP}(w, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{PATH-RELATION}(w, \texttt{TOP-PRÄP}^*(ro)) \wedge \texttt{DIR-TOP-PRÄP}_c(w, ro)]$$

$$\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro, rs \in \texttt{landmark}\ [\texttt{DIR-DIM-PRÄP}(w, ro, rs) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{PATH-RELATION}(w, \texttt{DIM-PRÄP}^*(ro, rs)) \wedge \texttt{DIR-DIM-PRÄP}_c(w, ro)]$$

$$\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro_1, ro_2 \in \texttt{landmark}\ [\texttt{DIR-ZWISCHEN-PRÄP}(w, ro_1, ro_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{PATH-RELATION}(w, \texttt{ZWISCHEN}^*(ro_1, ro_2)) \wedge \texttt{DIR-ZWISCHEN-PRÄP}_c(w, ro_1, ro_2)]$$

Dabei bezeichnet DIR-TOP-PRÄP bzw. DIR-DIM-PRÄP bzw. DIR-ZWISCHEN-PRÄP jeweils eine Schema-Variable für diejenige direktionale Präposition, deren Ortsfunktion durch eine lokale Präposition bzw. durch eine dimensionale Präposition bzw. durch die Präposition „zwischen“ gegeben ist. Die Schema-Variable TOP-PRÄP* bezeichnet die Ortsfunktion einer topologischen Präposition und DIM-PRÄP* diejenige einer dimensionalen Präposition. Die einschränkenden Prädikate einer direktionalen Präposition werden durch Schema-Variablen beschrieben, die durch den Index $_c$ gekennzeichnet sind.

3.3 Sichtaussagen

Um die Bedeutung von Sichtaussagen erklären zu können, werden zunächst Sichtlinien benötigt. Da das Zielobjekt einer Sichtaussage als immobil angenommen wird, können Sichtlinien durch das Prädikat $\texttt{LOS}(q, w, t)$ repräsentiert werden. Es gibt an, dass von dem Punkt q eine Sichtlinie zu dem Zielobjekt t existiert, deren Verlauf durch den Pfad w beschrieben wird.

Durch das Prädikat $\texttt{VIEW}(f, w, t)$ wird ausgedrückt, dass bezüglich des Referenzrahmens f, der die Orientierung und Position des imaginären Wanderers zu einem Zeitpunkt beschreibt, eine Sichtlinie zu dem Zielobjekt t existiert, deren Verlauf durch den Pfad w gegeben ist. Außerdem müssen sich alle Punkte von w im Sichtfeld bezüglich des Referenzrahmens f befinden. Wenn dieses Prädikat gilt, dann existiert auch eine Sichtlinie von der Position des Referenzrahmens zu dem Zielobjekt (T3.3.1).

(T3.3.1)
$$\forall f \in \texttt{for}\, \forall w \in \texttt{path}\, \forall t \in \texttt{landmark}\ [\texttt{VIEW}(f, w, t) \Rightarrow \texttt{LOS}(\texttt{POS}(f), w, t)]$$

Bei der Repräsentation von Sichtaussagen muss beachtet werden, dass sich der imaginäre Wanderer während einer Sichtaussage bewegen kann. Somit muss sich in der Sichtaussage für jede mögliche Position und Orientierung des imaginären Wanderers das Zielobjekt in seinem Sichtfeld befinden. Damit kann eine Sichtaussage, in der der imaginäre Wanderer a während der Situation s das Zielobjekt t sieht, durch die folgende Formel repräsentiert werden:

$$\forall f \in \texttt{for}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{FOR}(a, f)) \Rightarrow \exists w \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(f, w, t)]$$

Wenn in der Sichtaussage direktionale Präpositionen vorhanden sind, dann müssen diese an jede Sichtlinie im Skopus des Existenzquantors der Sichtlinien w gebunden sein.

Kapitel 4

Beobachtungen

Dieses Kapitel beschreibt die Zusammenhänge, die bei der Auswertung der gegebenen Routenbeschreibungen gefunden wurden. Da sich diese Arbeit auf deutlich weniger Beispiele stützt als eine empirische Studie, sind die Aussagen in diesem Kapitel Thesen, die erst noch genauer untersucht werden müssen. Viele der Thesen werden in diesem Kapitel als Theoreme formuliert. Sie werden dann in Kapitel 5 dazu verwendet, die Elemente der Repräsentationssprache so zu definieren, dass die Theoreme ableitbar sind.

Zunächst konnte die Sorte der *stark begrenzten Container* (`sbc`) identifiziert werden. Dabei handelt es sich um Landmarken, bei denen jede Überschreitung ihrer Grenze durch den Bewegungsverlauf einer Bewegungsaussage oder durch eine Sichtlinie einer Sichtaussage explizit erwähnt wird. Außerdem wurde beobachtet, dass in Positionierungs- und Bewegungsaussagen auch die Sicht des imaginären Wanderers beschrieben wird. In Sichtaussagen konnten noch weitere Sichtlinien identifiziert werden, außer den Sichtlinien, die zu den Zielobjekten führen. Schließlich wurde untersucht, was durch Positionierungs-, Bewegungs- und Sichtaussagen über die Enthaltensein-Position von geometrischen und wahrnehmbaren Entitäten ausgesagt werden kann.

Für die Beobachtungen bezüglich der Enthaltensein-Position werden, außer den stark begrenzten Containern, die folgenden Untersorten von `landmark` eingeführt: *Löcher* (`hole`), *Nicht grenzüberschreitende Entitäten* (`not-b-crossing`), *innere Entitäten* (`inner-entity`), *nicht enthaltene Entitäten* (`not-cntd`), *Grenzöffnungen* (`boundary-opening`), *Eingänge* (`entrance`) und *Ausgänge* (`exit`). Für Aussagen über die Sicht wird außerdem die Sorte der Entitäten, die die Konfiguration von Wegen beschreiben (`track-configuration`), benötigt.

In der Abbildung 4.1 werden alle Untersorten der Sorte der Landmarken beschrieben. Darin ist auch die Sorte der *Boden-Entitäten* (`ground-entity`), auf die schon in vorherigen Abschnitten Bezug genommen wurde, enthalten. Die Sorte der *transparenten* Entitäten (`transparent`) wird für die Axiomatisierung von Sichtlinien benötigt. Sowohl Boden-Entitäten als auch transparente Entitäten werden erst in Kapitel 5 in Formeln verwendet.

4.1 Stark begrenzte Container

Container sind dadurch gekennzeichnet, dass sich andere Entitäten in ihrem Inneren befinden können. Auf Container können die lokale Präposition „in“ und direktionale

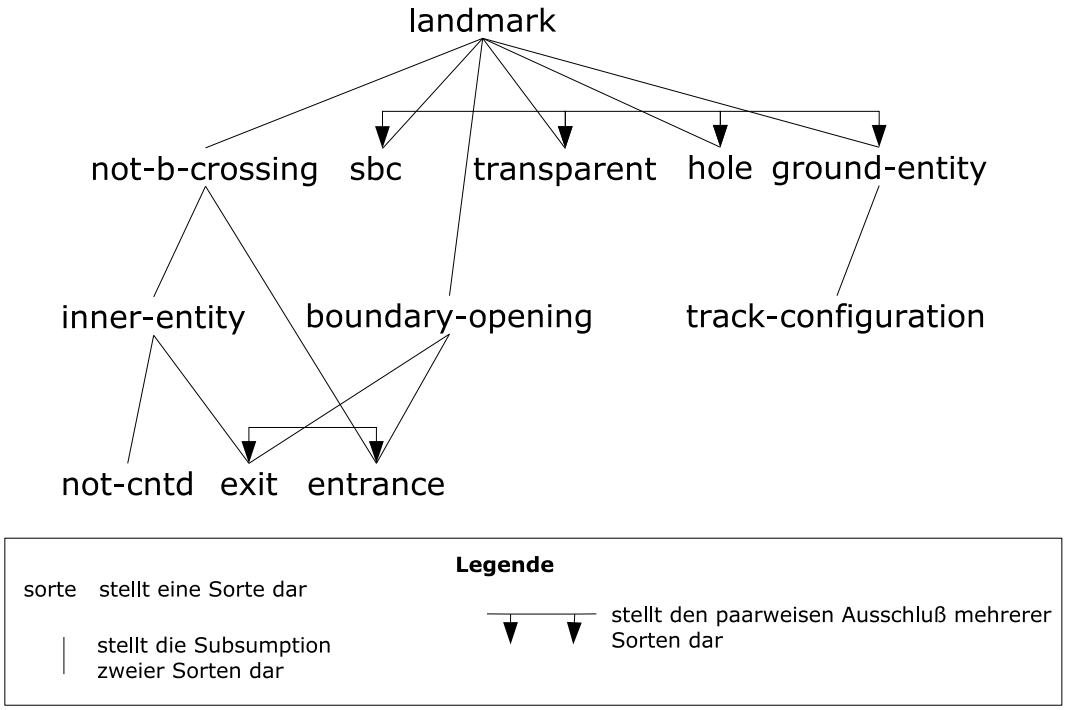

Abbildung 4.1: Sortierung der Landmarken

Präpositionen, deren Ortsfunktion durch „in“ gegeben ist, angewendet werden. Somit können Container keine Boden-Entitäten (Sorte `ground-entity`, siehe Abschnitt 1.4) sein. *Begrenzte Container* sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre Grenze ein Hindernis für die Bewegung und Sicht darstellt (vgl. Evans und Tyler to appear). *Stark begrenzte Container* (Sorte `sbc`; von: „strongly bounded container“) besitzen zusätzlich die spezielle Eigenschaft, dass in jeder Bewegungs- oder Sichtaussage, die ihre Grenze überschreitet, spezielle direktionale Präpositionen explizit verwendet werden. Diese Eigenschaft wird als *starke Begrenztheit* bezeichnet.

Um stark begrenzten Containern formalisieren zu können, muss zunächst beschrieben werden, was es bedeutet, wenn eine wahrnehmbare Entität eine andere enthält. Außerdem muss definiert werden, wann ein Pfad die Grenze einer Landmarke überschreitet. Für die Formalisierung der starken Begrenztheit muss beschrieben werden, was es bedeutet, wenn eine direktionale Präposition in einem Satz explizit erwähnt wird. Dazu wird der Formalismus der Prädikatenlogik zu einer Modallogik erweitert. Die *Enthaltensein-Position* einer Entität ist durch die Menge der stark begrenzten Container definiert, in denen sie enthalten ist. Für sie werden schließlich Prädikate und Zustandstypen eingeführt, durch die die Enthaltensein-Positionen zweier wahrnehmbarer Entitäten miteinander verglichen werden können.

4.1.1 Löcher und Enthalten-Relation

Ein *Loch* in einer Landmarke ist dadurch charakterisiert, dass sich in einer bestimmten Region nichts von dieser Landmarke befindet. Man könnte deshalb anstatt von Löchern auch von dem Nicht-Vorhandensein von Material reden. Allerdings werden Löcher in der natürlichen Sprache wie andere Entitäten verwendet und können wahrgenommen werden. Man kann von den Löchern in einem Schweizer Käse reden, oder

von einem Tunnel in einem Berg. Bestimmte Entitäten besitzen notwendigerweise ein Loch, z.B. ein Donut. Deshalb sollen im Folgenden Löcher als eigenständige Sorte (`hole`) repräsentiert werden. Löcher können auch teilweise oder ganz gefüllt sein, ohne dass sie aufhören zu existieren (vgl. Casati und Varzi 1994).

Im Folgenden sollen nur Löcher in immobilen wahrnehmbaren Entitäten betrachtet werden, da die Position, die eine mobile wahrnehmbare Entität einnimmt, ein Punkt ist und sie dadurch keine anderen wahrnehmbaren Entitäten enthalten kann. Auch von Löchern soll, wie von Landmarken, angenommen werden, dass sie immobil sind. Da sie wahrnehmbar sind, werden sie als Untersorte von Landmarken behandelt. Durch den Ausdruck $\texttt{H}(h, l)$ wird beschrieben, dass h ein Loch ist, das in der Landmarke l enthalten ist. Löcher können nicht alleine existieren, sondern benötigen eine andere Entität, in der sie sich befinden (A4.1.1). Dabei darf es sich jedoch um kein Loch handeln (A4.1.2) (vgl. Casati und Varzi 1994). Wenn eine Region in einer Landmarke, die kein Loch ist, enthalten ist und diese Region auch in einer anderen Landmarke enthalten ist, dann muss die erste Landmarke ein ein Loch besitzen, sodass diese Region in dem Loch enthalten ist (A4.1.3). Außerdem muss die Region, die ein Loch einer Landmarke einnimmt, auch ein Teil der Region der Landmarke sein (A4.1.4). Dabei ist der Fall zugelassen, dass ein Loch die gesamte Region der Landmarke einnimmt. Dies trifft beispielsweise bei einer Entität zu, die nur aus der Summe ihrer Einzelteile besteht und somit ein Loch besitzt, das ihre ganze Region umfasst, in dem sich dann die Einzelteile befinden.

(A4.1.1) $\forall h \in \texttt{hole}\, \exists l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{H}(h, l)]$

(A4.1.2) $\forall h_1, h_2 \in \texttt{hole}\ [\neg\, \texttt{H}(h_1, h_2)]$

(A4.1.3) $\forall l_1, l_2 \in \texttt{landmark}\, \forall r \in \texttt{region}\ [$
$\texttt{P}(r, \texttt{PLACE}(l_1)) \wedge \neg(l_1 \in \texttt{hole}) \wedge \texttt{P}(r, \texttt{PLACE}(l_2)) \wedge \neg(l_1 = l_2) \Rightarrow$
$\exists h \in \texttt{hole}\ [\texttt{H}(h, l_1) \wedge \texttt{P}(r, h)]]$

(A4.1.4) $\forall h \in \texttt{hole}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{H}(h, l) \Rightarrow \texttt{P}(\texttt{PLACE}(h), \texttt{PLACE}(l))]$

Eine Position ist genau dann in einer Landmarke enthalten, wenn die Position ein Teil der Region der Landmarke ist (D4.1.5). Da Entitäten der Sorte `perceptible-entity` mobil sein können, muss im allgemeinen Fall eine Aussage darüber, ob sie in einer Landmarke enthalten sind, an eine Situation gebunden werden. Der Ausdruck $\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{CNTD}(e, l))$ sagt aus, dass die wahrnehmbare Entität e während der Situation s in der Landmarke l enthalten ist (A4.1.6). Für Landmarken können diese Relationen unabhängig von Situationen formuliert werden, da sie sich nicht bewegen (D4.1.7).

(D4.1.5) $\forall p \in \texttt{position}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{CNTD}(p, l) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{P}(p, \texttt{PLACE}(l))]$

(A4.1.6) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall l \in \texttt{landmark}\, \forall e \in \texttt{perceptible-entity}\ [$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{CNTD}(p, l)) \Leftrightarrow$
$\forall p \in \texttt{position}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{BE-AT}(e, p)) \Rightarrow \texttt{CNTD}(p, l)]]$

(D4.1.7) $\forall l_1, l_2 \in \texttt{landmark}\ [\texttt{CNTD}(l_1, l_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{CNTD}(\texttt{PLACE}(l_1), l_2)]$

Grenzüberschreitungen einer Landmarke durch eine Richtung d können folgendermaßen klassifiziert werden: Eine Richtung d überschreitet die Grenze einer Landmarke l *von innen nach außen*, wenn sie einen Punkt besitzt, der sich außerhalb

der Landmarke befindet, und einen dazu präzedenten Punkt, der in der Landmarke enthalten ist. Diese Eigenschaft wird durch das Prädikat $\texttt{INOUT}(d, l)$ beschrieben (D4.1.8). Analog ist das Prädikat $\texttt{OUTIN}(d, l)$ definiert; jedoch überschreitet hier die Richtung d die Grenze der Landmarke l von *außen nach innen* (D4.1.9). Ein Pfad überquert also die Grenze einer Landmarke, wenn er ihre Grenze entweder von innen nach außen oder von außen nach innen überschreitet (D4.1.10).

(D4.1.8) $$\forall d \in \texttt{direction}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{INOUT}(d, l) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [\texttt{CNTD}(q_1, l) \wedge \neg\, \texttt{CNTD}(q_2, l) \wedge \prec(d, q_1, q_2)]]$$

(D4.1.9) $$\forall d \in \texttt{direction}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{OUTIN}(d, l) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [\neg\, \texttt{CNTD}(q_1, l) \wedge \texttt{CNTD}(q_2, l) \wedge \prec(d, q_1, q_2)]]$$

(D4.1.10) $$\forall d \in \texttt{direction}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{BOUNDARY-CROSSING}(d, l) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{INOUT}(d, l) \vee \texttt{OUTIN}(d, l)]$$

4.1.2 Explizites Erwähnen

In Routenbeschreibungen wird nur über einen Teil der Route und ihre Umgebung Informationen geliefert. In dieser Arbeit soll bei bestimmten Informationen davon ausgegangen werden, dass sie immer in der Routenbeschreibung mitgeteilt werden. Dadurch können dann daraus, dass eine bestimmte Information nicht in der Routenbeschreibung erwähnt wurde, bestimmte Schlussfolgerungen gezogen werden. Dazu ist es nötig, einen dreistufigen Verarbeitungsprozess einzuführen. Es sollen speziell Bewegungs- und Sichtaussagen auf die explizite Erwähnung der direktionalen Präpositionen „in“, „aus“ und „durch“ (deren Ortsfunktion durch die Präposition „in“ gegeben ist) hin untersucht werden.

Verarbeitungsschritte der Routenbeschreibungen Durch den Operator !, angewendet auf eine Formel ϕ, wird ausgesagt, dass die Information der Formel ϕ in der Routenbeschreibung erwähnt wurde (*explizites Erwähnen der Formel* ϕ). Es gilt die Eigenschaft, dass die Formel ϕ dann gültig ist, wenn die Formel ϕ explizit erwähnt wurde (A4.1.11). Dabei stellt ϕ eine Schema-Variable für eine beliebige Formel dar.

(A4.1.11) $$!\phi \Rightarrow \phi$$

Der Operator ! verhält sich also wie der Modaloperator $\Box$ in der Modallogik T. Der duale Operator bezüglich der Modallogik wäre dann $\neg!\phi$, wodurch das Nicht-Erwähnen der Formel ϕ beschrieben wird. Durch diese Operatoren wird der Formalismus, der in dieser Arbeit verwendet wird, zu einer modalen Prädikatenlogik mit den Eigenschaften der Modallogik T erweitert. Es wird angenommen, dass die Interpretationen der Konstanten und die Domänen der Sorten unabhängig von der betrachteten modalen Welt sind.

Zur Bestimmung des Wahrheitswertes der Formel $!\phi$ wird ein dreistufiger Verarbeitungsprozess der Routenbeschreibungen benötigt. In der ersten Stufe werden die einzelnen (Teil-)Sätze geparst und, gemäß der Repräsentationssprache aus Abschnitt 3, in Formeln umgewandelt. Anschließend wird jede dieser Formeln im zweiten Verarbeitungsschritt durch Teilformeln vervollständigt, die Aussagen über den Operator ! machen. In der dritten Stufe der Verarbeitung werden dann die Definitionen und Axiome der Repräsentationssprache verwendet und Inferenzen durchgeführt.

Durch diesen Verarbeitungsprozess ist es nicht nötig, für den Operator ! einen Default-Mechanismus einzuführen, wodurch die Probleme, die im Zusammenhang mit Default-Logiken bestehen, vermieden werden.

Vervollständigung von Bewegungs- und Sichtaussagen Explizites Erwähnen wird zunächst im Zusammenhang mit Bewegungsaussagen benötigt. Jede Bewegungsaussage wird in der ersten Verarbeitungsphase in eine Formel umgewandelt, die die Teilformel $\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w))$ enthält. Dabei bezeichnet s die Situation der Bewegungsaussage, a den imaginären Wanderer und w den Bewegungsverlauf der Bewegung. In einer Situation kann nur eine Bewegung explizit erwähnt werden. Deshalb wird diese Teilformel zu folgender Teilformel vervollständigt:

$$!\,\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w)) \wedge \\ \forall w' \in \texttt{path}\ [!\,\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w')) \Rightarrow w = w']$$

Die Repräsentation jeder Sichtaussage enthält die folgende Teilformel:

$$\forall f \in \texttt{for}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{FOR}(a, f)) \Rightarrow \exists w \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(f, w, t)]]$$

Dabei steht s für die Situation der Sichtaussage, a für den imaginären Wanderer und t für das Zielobjekt der Sichtaussage. Auch für Sichtaussagen gilt, dass in jeder Situation nur eine Sichtaussage explizit erwähnt werden kann. Deshalb wird die erwähnte Teilformel der Sichtaussage zu folgender vervollständigt:

$$\forall f \in \texttt{for}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{FOR}(a, f)) \Rightarrow \exists w \in \texttt{path}\ [\\ !\,\texttt{VIEW}(f, w, t) \wedge \forall w' \in \texttt{path}\ [!\,\texttt{VIEW}(f, w', t) \Rightarrow w = w']]]$$

Der Bewegungsverlauf einer Bewegungsaussage und die Sichtlinien einer Sichtaussage werden durch die direktionalen Präpositionen, die in den Aussagen angegeben werden, näher beschrieben. Für jede der direktionalen Präpositionen „in“, „aus“ und „durch“ ist in der Repräsentation der Aussage dann die Teilformel $\texttt{DIR-PRÄP}(w, ro)$ enthalten. Die Variable w bezeichnet den Bewegungsverlauf bei Bewegungsaussagen bzw. eine Sichtlinie bei Sichtaussagen. ro bezieht sich auf das Referenzobjekt der direktionalen Präposition und DIR-PRÄP ist eine Schema-Variable für die verwendete direktionale Präposition.

Falls eine solche direktionale Präposition genau einmal in der Bewegungs- oder Sichtaussage vorhanden ist, soll die erwähnte Teilformel zu folgender Teilformel vervollständigt werden:

$$!\texttt{DIR-PRÄP}(w, ro) \wedge \\ \forall ro' \in \texttt{landmark}\ [!\texttt{DIR-PRÄP}(w, ro) \Rightarrow ro' = ro]$$

Falls die direktionale Präposition zweimal in der Aussage enthalten ist, dann gibt es auch zwei Referenzobjekte ro_1 und ro_2. Die entsprechend vervollständigte Teilformel ist dann folgende:

$$!\texttt{DIR-PRÄP}(w, ro_1) \wedge !\texttt{DIR-PRÄP}(w, ro_2) \wedge \\ \forall ro' \in \texttt{landmark}\ [!\texttt{DIR-PRÄP}(w, ro) \Rightarrow (ro' = ro_1 \vee ro' = ro_2)]$$

Die Fälle, in denen eine direktionale Präposition genau dreimal, viermal, usw. in einer Bewegungs- oder Sichtaussage vorkommt, sind analog zu vervollständigen und werden hier nicht weiter aufgeführt.

Falls eine der direktionalen Präpositionen „in“, „aus“ oder „durch“ in einer Bewegungs- oder Sichtaussage nicht vorkommt, wird bei der Vervollständigung die folgende Teilformel durch den Und-Operator $\wedge$ zu der Repräsentation der Aussage hinzugefügt:

$$\forall ro' \in \texttt{landmark}\ [\neg!\texttt{DIR-PRÄP}(w, ro')]$$

In einer Bewegungsaussage muss dies im selben Skopus von Quantoren wie die Teilformel $\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w))$, in Sichtaussagen innerhalb des Existenzquantors, in dem auch die Teilformel $\texttt{VIEW}(f, w, t)$ steht, geschehen.

4.1.3 Starke Begrenztheit

Stark begrenzte Container sind Landmarken, die dadurch charakterisiert sind, dass für jede Sichtlinie einer Sichtaussage und für den Bewegungsverlauf jeder Bewegungsaussage folgendes gilt: Wenn der Pfad die Grenze eines stark begrenzten Container von außen nach innen überschreitet, dann wird entweder die direktionale Präposition „in“ oder die Präposition „durch“ explizit erwähnt. Wenn „durch“ nicht explizit erwähnt wurde, dann muss sich „in“ auf eine Landmarke beziehen, die sich in dem stark begrenzten Container befindet (z.B. „Gehe in Haus F hinein“). Dabei ist der Fall, dass es sich bei der Landmarke selber um einen stark begrenzten Container handelt, nicht ausgeschlossen. Falls die direktionale Präposition „in“ in der Sicht- oder Bewegungsaussage nicht erwähnt wird, dann wird die Präposition „durch“ auf eine Landmarke bezogen, die sich mit dem stark begrenzten Container überlappt (A4.1.12) (z.B. „Gehe durch den Zugang“ oder „Gehe durch Haus F“). Analoges gilt für eine Überschreitung der Grenze von innen nach außen und für die direktionale Präposition „aus“ (A4.1.13).

(A4.1.12)
$$\begin{aligned}
&\forall w \in \texttt{path}\, \forall c \in \texttt{sbc}\ [\\
&\quad (\exists s \in \texttt{situation}\, \exists a \in \texttt{agent}\ [!\,\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w))] \vee\\
&\quad \exists f \in \texttt{for}\, \exists t \in \texttt{landmark}\ [!\,\texttt{VIEW}(f, w, t)]) \wedge\\
&\quad \texttt{OUTIN}(w, c) \Rightarrow\\
&\qquad \exists l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{CNTD}(l, c) \wedge !\,\texttt{IN}(w, l)] \vee\\
&\qquad \exists l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{O}(\texttt{PLACE}(l), \texttt{PLACE}(c)) \wedge !\,\texttt{DURCH}(w, l)]]
\end{aligned}$$

(A4.1.13)
$$\begin{aligned}
&\forall w \in \texttt{path}\, \forall c \in \texttt{sbc}\ [\\
&\quad (\exists s \in \texttt{situation}\, \exists a \in \texttt{agent}\ [!\,\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w))] \vee\\
&\quad \exists f \in \texttt{for}\, \exists t \in \texttt{landmark}\ [!\,\texttt{VIEW}(f, w, t)]) \wedge\\
&\quad \texttt{INOUT}(w, c) \Rightarrow\\
&\qquad \exists l\, \texttt{landmark}\ [\texttt{CNTD}(l, c) \wedge !\,\texttt{AUS}(w, l)] \vee\\
&\qquad \exists l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{O}(\texttt{PLACE}(l), \texttt{PLACE}(c)) \wedge !\,\texttt{DURCH}(w, l)]]
\end{aligned}$$

Aus dem Axiom (A4.1.13) folgt, dass die Sichtlinien einer Sichtaussage oder der Pfad einer Bewegungsaussage keinen stark begrenzten Container verlassen, wenn keine der direktionalen Präpositionen „aus“ oder „durch“ explizit erwähnt werden.

Analoges folgt aus (A4.1.12) für das Verlassen eines stark begrenzten Containers und die direktionalen Präpositionen „durch“ und „aus“.

In den vorliegenden Routenbeschreibungen werden Flure, Zimmerkomplexe, Teilhäuser, Gebäude und das Informatikum als Container verwendet. Diese Entitäten sollen nun daraufhin untersucht werden, ob sie stark begrenzte Container sind.

Die Routenbeschreibung eg5 beginnt mit den Satz: „Wenn sie die Bibliothek verlassen, gehen sie bitte zum Ausgang“. Mit „Bibliothek“ wird also offensichtlich eine Entität bezeichnet, die sich innerhalb eines Gebäudes befindet. Nach ihrem Verlassen befindet man sich deshalb immernoch in dem Gebäude und kann zum Ausgang des Gebäudes gehen. Der Teilsatz „Wenn sie die Bibliothek verlassen“ (eg5:1) kann in die Bewegungsaussage „Wenn sie aus der Bibliothek herauskommen“ umgewandelt werden. Darin wird jedoch nur die direktionale Präposition „aus“ verwendet. Aus dem Axiom (A4.1.12) folgt damit, dass der Pfad dieser Bewegungsaussage keinen stark begrenzten Container betreten kann. Also kann der Flur, der sich an die Bibliothek anschließt, kein stark begrenzter Container sein. Es wird angenommen, dass diese Aussage für alle Flure gilt.

Teilhäuser sind Unterteilungen von Gebäuden, die künstlich erzeugt wurden, und besitzen einen Namen. Es ist möglich, dass die Grenze eines Teilhauses im Inneren des Gebäudes nicht oder nur anhand von Schildern erkennbar ist. In Routenbeschreibung eg5 wird ein Übergang von einem Teilhaus in ein anderes beschrieben: „Am Ende des Ganges in Haus F befindet sich im Halb-Souterrain das Haus R“ (eg5:12). Es handelt sich dabei um keine Bewegungsaussage, aber es wird die Wahrnehmung eines anderen Teilhauses beschrieben, ohne dass erkennbar ist, ob sich Haus R in Haus F befindet. Es liegt deshalb nahe, davon auszugehen, dass Teilhäuser ebenfalls keine stark begrenzten Container sind.

Der zweite und dritte Teilsatz der Routenbeschreibung eg1 lautet folgendermaßen: “Du gehst an Haus F entlang Richtung Pförtner, so als ob du das Gelände verlassen würdest.“ Als „Gelände“ wird hierbei das Informatikum bezeichnet. Bei dem Informatikum handelt es sich um eine Boden-Entität. Dies ist daran erkennbar, dass ein Satz wie „Du befindest Dich im Informatikum“ widersprüchlich erscheint, der Satz „Du befindest Dich auf dem Informatikum“ jedoch nicht. Deshalb kann das Informatikum kein stark begrenzter Container sein.

Aus dieser Diskussion folgt, dass es sinnvoll ist, nur Gebäude und Zimmerkomplexe als stark begrenzte Container anzunehmen. Wenn ein Zimmerkomplex aus einem einzelnen Zimmer besteht, dann soll es sich dabei immernoch um einen Zimmerkomplex handeln. Es kann vermutet werden, dass in Routenbeschreibungen, in denen auch Zimmer innerhalb von Zimmerkomplexen vorkommen, Zimmerkomplexe selbst keine stark begrenzten Container mehr sind, sondern nur noch die einzelnen Zimmer (analog zu der Beziehung zwischen Gebäuden und Teilhäusern). Die vorliegenden Routenbeschreibungen sind zur Überprüfung dieser These jedoch nicht detailliert genug.

In der Routenbeschreibung eg4 wird die Bezeichnung „Mensa“ sowohl für einen Zimmerkomplex als auch für ein Teilhaus verwendet: „und sie stehen ... am Eingang der Mensa. Die Mensa befindet sich im ersten OG des Gebäudes B“. Dies kann auch für andere Landmarken wie „Bibliothek“ der Fall sein. Es ist interessant zu untersuchen, wie ein menschlicher Leser von Routenbeschreibungen entscheidet, ob bei dem Verweis auf eine Entität ein Zimmerkomplex, Gebäude oder Teilhaus gemeint

ist (siehe dazu auch Abschnitt 6.1).

4.1.4 Enthaltensein-Position

Die *Enthaltensein-Position* einer Entität ist durch die Menge der stark begrenzten Container definiert, in denen sie enthalten ist. Anstatt der Bestimmung der Menge der stark begrenzten Container, in denen eine Entität enthalten ist, ist es jedoch oft viel einfacher, zu bestimmen, ob eine Entität sich mindestens, höchstens oder genau in den stark begrenzten Containern befindet, in denen auch eine andere Entität enthalten ist. Das Prädikat $\texttt{MIN-CP}(i_1, i_2)$ bzw. $\texttt{EQUAL-CP}(i_1, i_2)$ drückt aus, dass sich die immobile Entität i_1 in mindestens bzw. genau in den stark begrenzten Containern befindet, in denen sich auch i_2 befindet (D4.1.14 bzw. (D4.1.15). Diese Prädikate sind für alle Kombinationen von Sorten definiert, für die auch das Prädikat `CNTD` definiert ist.

(D4.1.14) $\forall i_1, i_2 \in \texttt{immobile}\ [\texttt{MIN-CP}(t_1, t_2) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\forall c \in \texttt{sbc}\ [\texttt{CNTD}(i_2, c) \Rightarrow \texttt{CNTD}(i_1, c)]]$

(D4.1.15) $\forall i_1, i_2 \in \texttt{immobile}\ [\texttt{EQUAL-CP}(i_1, i_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{MIN-CP}(i_1, i_2) \wedge \texttt{MIN-CP}(i_2, i_1)]$

Wenn eine der Entitäten, deren Enthaltensein-Position verglichen werden soll, mobil ist, muss eine Aussage über deren Enthaltensein-Position an eine Situation gebunden werden und auf Zeitpunkte bezogen werden (A4.1.16 bzw. D4.1.17). Diese Definitionen beschränken sich auf die Sorte `perceptible-entity`, da nur für sie der Lokalisierungsoperator `BE-AT` definiert ist. Für Pfade wird schließlich eine Abkürzung eingeführt, um auszusagen, dass alle Punkte des Pfades dieselbe Enthaltensein-Position besitzen (D4.1.18).

(A4.1.16) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall e_1, e_2 \in \texttt{perceptible-entity}\ [$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{MIN-CP}(e_1, e_2)) \Leftrightarrow \forall p_1, p_2 \in \texttt{position}\ [$
$\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{BE-AT}(e_1, p_1) \& \texttt{BE-AT}(e_2, p_2)) \Rightarrow \texttt{MIN-CP}(p_1, p_2)]]$

(D4.1.17) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall e_1, e_2 \in \texttt{perceptible-entity}\ [$
$z = \texttt{EQUAL-CP}(e_1, e_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{MIN-CP}(e_1, e_2) \& \texttt{MIN-CP}(e_2, e_1)]$

(D4.1.18) $\forall w \in \texttt{path}\ [\texttt{EQUAL-CP}(w) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\forall q_1, q_2 \in \texttt{point}\ [q_1\, \iota\, w \wedge q_2\, \iota\, w \Rightarrow \texttt{EQUAL-CP}(q_1, q_2)]]$

4.2 Thesen für die Sicht

In diesem Abschnitt werden Thesen über die Sicht des imaginären Wanderers aufgestellt. Dabei wird oft die Aussage verwendet, dass der imaginäre Wanderer zu jedem Zeitpunkt bzw. zum Startzeitpunkt einer Situation ein Referenzobjekt sehen kann, wobei die die Sichtlinien keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreiten. Deshalb wird hierfür eine Abkürzung eingeführt (A4.2.1 bzw. A4.2.2). Aus diesen Axiomen folgt, dass der Zustandstyp `VIEW` in einer solchen Situation einer Sichtaussage gilt, in der keine direktionalen Präpositionen verwendet werden (siehe

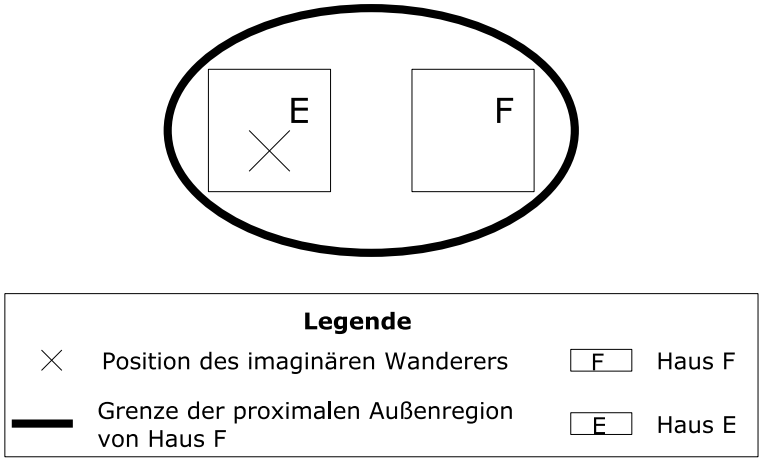

Abbildung 4.2: Unmögliche Konstellation für „Du bist bei Haus F“

Abschnitt 4.1).

(A4.2.1) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{VIEW}(a, l)) \Leftrightarrow$
$\forall f \in \texttt{for}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{FOR}(f, a)) \Rightarrow$
$\exists w \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(f, w, l) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w)]]]$

(A4.2.2) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{INIT}(s, \texttt{VIEW}(a, l)) \Leftrightarrow$
$\forall f \in \texttt{for}\ [\texttt{INIT}(s, \texttt{FOR}(f, a)) \Rightarrow$
$\exists w \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(f, w, l) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w)]]]$

Analoges wird für die schwächere Forderung eingeführt, dass von dem imaginären Wanderer zu dem Referenzobjekt eine Sichtlinie existiert, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet (A4.2.3 bzw. A4.2.4).

(A4.2.3) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{LOS}(a, l)) \Leftrightarrow$
$\forall q \in \texttt{point}[\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{BE-AT}(a, q)) \Rightarrow$
$\exists w \in \texttt{path}\ [\texttt{LOS}(q, w, l) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w)]]]$

(A4.2.4) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{INIT}(s, \texttt{LOS}(a, l)) \Leftrightarrow$
$\forall q \in \texttt{point}\ [\texttt{INIT}(s, \texttt{BE-AT}(a, q)) \Rightarrow$
$\exists w \in \texttt{path}\ [\texttt{LOS}(q, w, l) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w)]]]$

4.2.1 Die Sicht in Positionierungsaussagen

Wenn ein zu lokalisierendes Objekt durch eine Positionierungsaussage außerhalb eines Referenzobjektes lokalisiert wird, dann wird angenommen, dass zwischen dem zu lokalisierenden Objekt und dem Referenzobjekt mindestens eine Sichtlinie existiert, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers (z.B. ein Gebäude) überschreitet. Beispielsweise wird durch die Positionierungsaussage „Du bist bei Haus F“ ausgeschlossen, dass sich der imaginäre Wanderer in einem anderen Haus befindet, das sich ebenfalls in der proximalen Außenregion von Haus F befindet (siehe Abbildung 4.2).

Wenn also der imaginäre Wanderer das Referenzobjekt oder das zu lokalisierende Objekt einer Positionierungsaussage ist und eine topologische Präposition mit Ausnahme von „in“ verwendet wird, dann existiert gemäß der obigen Annahme auch zu jedem Zeitpunkt der Situation eine Sichtlinie von dem imaginären Wanderer zu dem jeweils anderen Objekt, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet. Das Theorem (T4.2.5) beschreibt den Fall, dass der imaginäre Wanderer durch die Positionierungsaussage lokalisiert wird („Du bist bei dem Haus“). In (T4.2.6) ist der imaginäre Wanderer das Referenzobjekt der lokalen Präposition („Das Haus ist bei Dir“). Durch `TOP-NOT-IN-PRÄP` wird eine Schema-Variable für eine topologische Präposition bezeichnet, die nicht der direktionalen Präposition „in“ entspricht. Wenn die lokale Präposition „auf“ in einer Positionierungsaussage verwendet wird, in der das zu lokalisierende Objekt der imaginäre Wanderer ist (z.B. „Sie stehen auf dem Vorplatz zu Haus D“), wird angenommen, dass das Referenzobjekt so weit ausgedehnt ist, dass sich ein Teil davon im Sichtfeld des imaginären Wanderers befindet (T4.2.7).

(T4.2.5) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall lo \in \texttt{agent}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\, [$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{TOP-NOT-IN-PRÄP}(lo, ro)) \Rightarrow \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{LOS}(lo, ro))]$

(T4.2.6) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall ro \in \texttt{agent}\, \forall lo \in \texttt{landmark}\, [$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{TOP-NOT-IN-PRÄP}(lo, ro)) \Rightarrow \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{LOS}(ro, lo))]$

(T4.2.7) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall lo \in \texttt{agent}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\, [$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{AUF}(lo, ro)) \Rightarrow \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{VIEW}(ro, lo))]$

Auch die dimensionalen Präpositionen lokalisieren eine Entität außerhalb des Referenzobjektes. Deshalb gilt für sie dieselbe Folgerung wie für topologische Präpositionen. In den entsprechenden Theoremen (T4.2.8) (der imaginäre Wanderer wird lokalisiert) und (T4.2.9) (der imaginäre Wanderer ist das Referenzobjekt) stellt `DIM-PRÄP` eine Schema-Variable für eine dimensionale Präposition dar.

(T4.2.8) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall lo \in \texttt{agent}\, \forall ro \in \texttt{landmark}$
$\forall rs \in \texttt{perceptible-entity}\, [$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{DIM-PRÄP}(lo, ro, rs)) \Rightarrow \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{LOS}(lo, ro))]$

(T4.2.9) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall ro \in \texttt{agent}\, \forall lo \in \texttt{landmark}$
$\forall rs \in \texttt{perceptible-entity}\, [$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{DIM-PRÄP}(lo, ro, rs)) \Rightarrow \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{LOS}(ro, lo))]$

Falls der imaginäre Wanderer in einer Positionierungsaussage das Referenzobjekt ist und eine dimensionale Präposition verwendet wird, dann wird dabei der imaginäre Wanderer als Referenzsystem verwendet (z.B. „Rechts von Dir befindet sich das Haus“). Die Lokalisierung hängt also von seiner Orientierung ab. Es wird deshalb angenommen, dass sich das zu lokalisierende Objekt dann im Sichtfeld des imaginären Wanderers befindet, wenn es sich bei der dimensionalen Präposition nicht um „hinter“ handelt. Das Theorem (T4.2.10) beschreibt diese Aussage formal, wobei `DIM-NOT-HINTER-PRÄP` eine Schema-Variable für eine beliebige dimensionale

Präposition mit Ausnahme von „hinter“ beschreibt.

(T4.2.10) $$\forall s \in \texttt{situation}\, \forall ro \in \texttt{agent}\, lo \in \texttt{landmark}\ [\\ \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{DIM-NOT-HINTER-PRÄP}(lo, ro, ro)) \Rightarrow \\ \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{VIEW}(ro, lo))]$$

Durch die lokale Präposition „zwischen“ wird das zu lokalisierende Objekt ebenfalls außerhalb der beiden Referenzobjekte lokalisiert. Wenn es sich bei dem zu lokalisierenden Objekt um den imaginären Wanderer handelt, folgt aus der Annahme oben, dass zu beiden Referenzobjekten eine Sichtlinie existiert, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet (T4.2.11).

(T4.2.11) $$\forall s \in \texttt{situation}\, \forall lo \in \texttt{agent}\, ro_1, ro_2 \in \texttt{landmark}\ [\\ \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{ZWISCHEN}(lo, ro_1, ro_2)) \Rightarrow \\ \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{LOS}(lo, ro_1)) \wedge \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{LOS}(lo, ro_2))]$$

4.2.2 Die Sicht in Bewegungsaussagen

Winter (2003) beobachtete, dass sich Landmarken, die in einer Routenbeschreibung erwähnt werden, dadurch auszeichnen, dass sie, schon bevor man sich bei ihnen befindet, während der Bewegung entlang der Route gesehen werden können. Auf dieser Erkenntnis basiert die folgende Annahme: Wenn zur Beschreibung des Verlaufs der Bewegung einer Bewegungsaussage eine direktionale Präposition verwendet wird, dann kann der imaginäre Wanderer das Referenzobjekt am Anfang der Bewegung sehen (siehe Abbildung 4.3). Außerdem wird angenommen, dass die entsprechenden Sichtlinien keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreiten, da stark begrenzte Container ein Hindernis für die Sicht darstellen. Davon ausgenommen sind zunächst Entitäten, die die Konfiguration von Wegen beschreiben (Sorte `track-configuration`). Dazu gehören unter anderem Abbiegungen oder das Ende von Entitäten. Abbildung 4.3 veranschaulicht diese Ausnahme: Dort existiert keine Sichtlinie zu „dem Ende“, das zur Sorte `track-configuration` gehört. Eine weitere Ausnahme zu der genannten Regel bilden diejenigen direktionalen Präpositionen, die den Ursprung der Bewegung beschreiben (z.B. „von Haus E“ oder „aus der Bibliothek“). Bei ihnen kann es vorkommen, dass zwar eine Sichtlinie vom Startpunkt der Bewegung zu ihren Referenzobjekten existiert, dass diese sich aber nicht in dem Sichtfeld des imaginären Wanderers befinden (z.B. in „Gehe vom Pförtner zu Haus F“). Es kann auch sein, dass von dem Startpunkt der Bewegung überhaupt keine Sichtlinie zu dem Referenzobjekt existiert (z.B. in „Gehe aus der Bibliothek hinaus“). Diese Annahme für die Sicht kann nicht auf alle Zeitpunkte der Bewegung übertragen werden. Es ist leicht möglich, dass die Sicht zu den Referenzobjekten, durch die die Bewegung spezifiziert wurde, für kurze Zeiten unterbrochen wird (z.B. durch Bäume, siehe Abbildung 4.3).

Die Theoreme (T4.2.12) und (T4.2.13) formalisieren diese Annahme. Darin wird `DIR-TOP-DIM-PRÄP` als Schema-Variable für eine direktionale Präposition verwendet, deren Pfad-Relation nicht `FROM`, `AWAY-FROM` oder `ALONG` entspricht und deren Ortsfunktion durch diejenige einer topologischen oder dimensionalen Präposition gegeben ist. Die Pfad-Relation `ALONG` wird hier ebenfalls ausgeschlossen, da diese weiter unten besonders behandelt wird. `DIR-ZWISCHEN-PRÄP` ist eine Schema Variable für eine direktionale Präposition, deren Pfad-Relation ebenfalls nicht `FROM`,

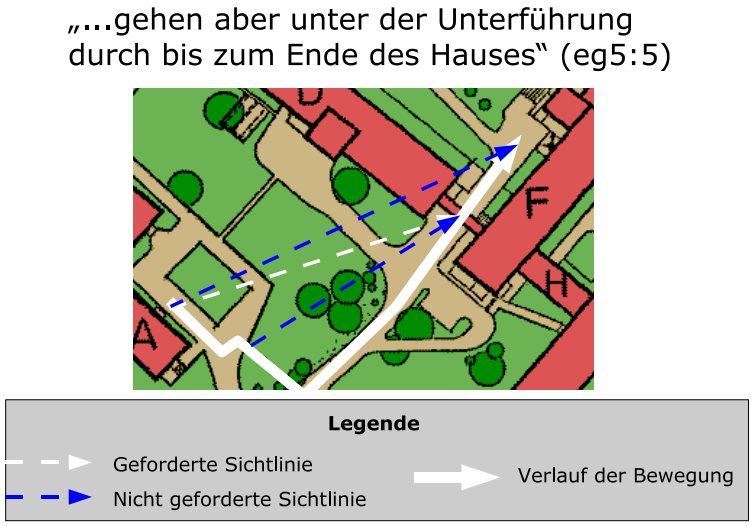

Abbildung 4.3: Sicht in Bewegungsaussagen

AWAY-FROM oder ALONG ist und deren Ortsfunktion derjenigen der lokalen Präposition „zwischen“ entspricht.

(T4.2.12) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [$
$\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w)) \wedge \neg(ro \in \texttt{track-configuration}) \wedge$
$\texttt{DIR-TOP-DIM-PRÄP}(w, ro) \Rightarrow$
$\texttt{INIT}(s, \texttt{VIEW}(a, ro))]$

(T4.2.13) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall w \in \texttt{path}\, \forall ro_1, ro_2 \in \texttt{landmark}\ [$
$\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w)) \wedge\ \neg(ro_1 \in \texttt{track-configuration}) \wedge$
$\neg(ro_2 \in \texttt{track-configuration}) \wedge$
$\texttt{DIR-ZWISCHEN-PRÄP}(w, ro_1, ro_2) \Rightarrow$
$\texttt{INIT}(s, \texttt{VIEW}(a, ro_1)) \wedge \texttt{INIT}(s, \texttt{VIEW}(a, ro_2))]$

Die direktionale Präposition „entlang“ lokalisiert den gesamten Bewegungsverlauf der Bewegung in dem Ergebnis ihrer Ortsfunktion. Wenn diese eine Region beschreibt, die sich außerhalb des Referenzobjektes befindet, dann wird der imaginäre Wanderer durch die Bewegungsaussage während der gesamten Situation außerhalb des Referenzobjektes lokalisiert. Aus der Annahme, die im vorherigen Abschnitt gemacht wurde, folgt damit, dass sich dann kein Hindernis zwischen dem imaginären Wanderer und dem Referenzobjekt befinden kann. Es wird außerdem angenommen, dass das Referenzobjekt auf eine solche Weise ausgedehnt ist, dass sich ein Teil des Referenzobjektes zu jedem Zeitpunkt der Situation im Sichtfeld des imaginären Wanderers befindet. Diese Annahme wird durch die Theoreme (T4.2.14) und (T4.2.15) beschrieben. Darin bezeichnet die Schema-Variable ALONG-PRÄP eine direktionale Präposition, deren Pfad-Relation durch ALONG und deren Ortsfunktion durch die Ortsfunktion einer dimensionalen Präposition oder einer topologischen Präposition

mit Ausnahme von „in“ gegeben ist.

(T4.2.14) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\, [$
$\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w)) \wedge$
$\texttt{ALONG-PRÄP}(w, ro) \Rightarrow$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{VIEW}(a, ro))]$

(T4.2.15) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall w \in \texttt{path}\, \forall ro_1, ro_2 \in \texttt{landmark}\, [$
$\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w)) \wedge$
$\texttt{ZWISCHEN-ENTLANG}(w, ro_1, ro_2) \Rightarrow$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{VIEW}(a, ro_1)) \wedge \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{VIEW}(a, ro_2))]$

Für die direktionalen Präpositionen, die den Ursprung eines Pfades beschreiben („von“, „aus“, „aus der Richtung“), wird analog zu der Beobachtung bei Positionierungsaussagen angenommen, dass es eine Sichtlinie vom Ursprung des Pfades zu deren Referenzobjekt gibt, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet. Dies gilt nur, wenn das Ergebnis der Ortsfunktion eine Region ist, die sich außerhalb des Referenzobjektes befindet (T4.2.16). Da diese Präpositionen den Ursprung des Pfades beschreiben, kann es sehr gut sein, dass sich das Referenzobjekt zum Startzeitpunkt nicht im Sichtfeld des imaginären Wanderers befindet.

(T4.2.16) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\, \forall f \in \texttt{for}\, [$
$\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w)) \wedge$
$(\texttt{VON}(w, ro) \vee \texttt{AUS-DER-RICHTUNG}(w, ro)) \Rightarrow$
$\exists w' \in \texttt{path}\, [\texttt{LOS}(\texttt{STPT}(w), w', ro) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

4.2.3 Die Sicht in Sichtaussagen

In Sichtaussagen können, wie in Bewegungsaussagen, direktionale Präpositionen verwendet werden. Dabei sind aber nur „von“, „aus“ und „durch“ zugelassen (siehe Abschnitt 1.5). Dabei beschreiben alle bis auf „durch“ den Ursprung der Sichtlinien. Ähnlich zu den Schlüssen für Bewegungsaussage wird nun angenommen, dass alle Referenzobjekte, die mittels der direktionalen Präposition „durch“ in einer Sichtaussage verwendet werden, auch vom imaginären Wanderer gesehen werden können. Auch hier gilt, dass die entsprechende Sichtlinie keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet (T4.2.17). Zum Beispiel gilt dann für die Situation der Aussage „Durch das Fenster siehst Du Haus E“ dass der imaginäre Wanderer auch das Fenster sehen kann. Auf die Entitäten, die die Konfiguration von Wegen beschreiben, kann die Präposition „durch“ nicht angewendet werden, da sie Boden-Entitäten sind. Daher müssen diese Entitäten an dieser Stelle nicht als Ausnahme gesondert betrachtet werden.

Wenn die direktionale Präposition „von“ in einer Sichtaussage verwendet wird, dann beschreibt diese den Ursprung der Sichtlinien durch die proximale Außenregion des Referenzobjektes. Ebenfalls ähnlich zu Bewegungsaussagen wird angenommen, dass dann zu dem entsprechenden Referenzobjekt während der gesamten Sichtaussage eine Sichtlinie existiert, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers

überschreitet (T4.2.18).

(T4.2.17) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall t, ro \in \texttt{landmark}\, \forall f \in \texttt{for}\ [$
$\texttt{VIEW}(f, w, t) \wedge \texttt{DURCH}(w, ro) \Rightarrow$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(f, w', ro) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

(T4.2.18) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall t, ro \in \texttt{landmark}\, \forall f \in \texttt{for}\ [$
$\texttt{VIEW}(f, w, t) \wedge \texttt{VON}(w, ro) \Rightarrow$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{LOS}(\texttt{POS}(f), w', ro) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

4.3 Thesen für die Enthaltensein-Position

In diesem Abschnitt werden Thesen für die Enthaltensein-Position vorgestellt. Diese Thesen sind jedoch nicht notwendig, um stark begrenzte Container zu identifizieren. Abhängig von ihrer Lage zu stark begrenzten Containern können *nicht grenzüberschreitende Entitäten*, *innere Entitäten* und *nicht enthaltene Entitäten* unterschieden werden. *Grenzöffnungen*, *Eingänge* und *Ausgänge* weisen außerdem bestimmte Eigenschaften auf, wenn sie als Referenzobjekte der direktionalen Präposition „durch“ verwendet werden. Auch die direktionalen Präpositionen „aus“ und „in“ haben Auswirkungen auf die Enthaltensein-Position ihrer Referenzobjekte.

4.3.1 Nicht grenzüberschreitende Entitäten

Eine *nicht grenzüberschreitende Entität* (Sorte `not-b-crossing`, von „not boundary crossing entity“) ist dadurch charakterisiert, dass sie sich bei jeden stark begrenzten Container, mit dem sie sich überlappt, entweder ganz in ihm oder er sich ganz in ihr befindet (A4.3.1).

(A4.3.1) $\forall c \in \texttt{sbc}\, \forall n \in \texttt{not-b-crossing}\ [$
$\texttt{O}(\texttt{PLACE}(n), \texttt{PLACE}(c)) \Rightarrow \texttt{CNTD}(n, c) \vee \texttt{CNTD}(c, n)]$

In den aufgestellten Thesen für die Sicht (Abschnitt 4.2) haben die Sichtlinien die Eigenschaft, dass sie keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreiten. Wenn eine solche Sichtlinie zu einer nicht grenzüberschreitenden Entität e geht und der Startpunkt der Sichtlinie in einem stark begrenzten Container c enthalten ist, dann ist auch der Endpunkt der Sichtlinie in diesem Container enthalten (siehe Definition von `EQUAL-CP`). Aus der Definition von `CNTD` folgt, dass dann der Endpunkt der Sichtlinie ein innerer Punkt von c sein muss. Da der Endpunkt der Sichtlinie inzident zu e ist, folgt aus dem Axiom (A2.2.21), dass sich die Region von c und e überlappen. Aus dem Axiom (A4.3.1) zu nicht grenzüberschreitenden Entitäten folgt dann, dass auch e in c enthalten sein muss. Damit gilt das Theorem (T4.3.2).

(T4.3.2) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall q \in \texttt{point}\, \forall e \in \texttt{not-b-crossing}\ [$
$\texttt{LOS}(q, w, e) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w) \Rightarrow \texttt{MIN-CP}(e, p)]$

Bis auf Grenzöffnungen soll von allen in den vorliegenden Routenbeschreibungen vorkommenden Landmarken davon ausgegangen werden, dass sie zur Sorte `not-b-crossing` gehören, da nur Gebäude und Zimmerkomplexe als stark begrenzte Container identifiziert werden konnten.

4.3.2 Innere Entitäten

Innere Entitäten (Sorte `inner-entity`) sind nicht grenzüberschreitende Entitäten, für die folgendes gilt: Wenn in einer Positionierungs-, Bewegungs- oder Sichtaussage der imaginäre Wanderer eine innere Entität gemäß den Thesen für die Sicht wahrnehmen kann, dann befindet er sich in denselben stark begrenzten Containern wie die innere Entität auch.

Der Unterschied zwischen nicht grenzüberschreitenden und inneren Entitäten wird am Vergleich von Zimmern und Teilhäusern deutlich: Die Bezeichnung „Haus E“ verweist auf ein Teilhaus, das in einem stark begrenzten Container, einem Gebäude, enthalten ist. Trotzdem kann sich der imaginäre Wanderer in einer Bewegungsaussage wie „Gehe zu Haus E“, in der der imaginäre Wanderer gemäß Abschnitt 4.2 Haus E sehen kann, außerhalb des Gebäudes befinden, zu dem Haus E gehört. Bei einem Zimmer ist das nicht möglich: In einer Aussage wie „Gehe zum Lehrerzimmer“ kann sich der imaginäre Wanderer nicht außerhalb des Gebäudes befinden, in dem sich das Zimmer befindet.

Diese Charakteristik von inneren Entitäten wird durch das Theorem (T4.3.3) formuliert: Wenn eine Sichtlinie, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet, zu einer inneren Entität geht, dann ist der Startpunkt der Sichtlinie in denselben stark begrenzten Container enthalten wie das Zielobjekt. Wann eine solche Sichtlinie zu einer Landmarke existiert, wird durch die Thesen für die Sicht beschrieben.

(T4.3.3) $$\forall q \in \texttt{point}\, \forall w \in \texttt{path}\, \forall e \in \texttt{inner-entity}\ [\ \texttt{LOS}(q, w, e) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w) \Rightarrow \texttt{EQUAL-CP}(e, q)]$$

In den vorliegenden Routenbeschreibungen haben sich die folgenden Entitäten als innere Entitäten bezüglich Gebäuden und Zimmerkomplexen als stark begrenzten Container herausgestellt: Flure, Zimmer, Zimmerkomplexe, Treppen, Treppenhäuser, Stockwerke, der Fahrstuhl, Stufen, Rampen, Aschenbecher, „graue Steine“, Buchstaben (als Beschriftung von Häusern) und Schilder. Außerdem gehören alle Entitäten, die in keinem stark begrenzten Container enthalten sind, zu den inneren Entitäten.

Von allen Grenzöffnungen und Teilhäusern, wozu auch „Arbeitsbereiche“ gehören, kann nicht allgemein angenommen werden, dass sie innere Entitäten sind.

4.3.3 Nicht enthaltene Entitäten

Nicht enthaltene Entitäten (Sorte `not-cntd`, von „not contained“) haben die Besonderheit, dass sie in keinem stark begrenzten Container, mit Ausnahme von sich selbst, enthalten sind (A4.3.4). Daraus folgt, dass es sich bei ihnen um innere Entitäten handelt.

(A4.3.4) $$\forall n \in \texttt{not-cntd}\, \forall c \in \texttt{sbc}\ [\ \texttt{CNTD}(n, c) \Rightarrow n = c]$$

Da in den vorliegenden Routenbeschreibungen nur Gebäude und Zimmerkomplexe stark begrenzte Container sind, handelt es sich bei allen Entitäten, die sich außerhalb von Gebäuden befinden und bei Gebäuden selber um nicht enthaltene Entitäten. Dazu gehören (zur Vereinfachung wurden Oberklassen gebildet): Gebäude,

Wege, Abzweigungen, Plätze, das Informatikum, der Campus, das Gelände, natürliche Entitäten (z.B. Wiesen, Bäume, ...), Mülltonnen, Brücken, Überführungen, Unterführungen, Zäune, Pforten, Schranken und der Pförtner.

4.3.4 Grenzöffnungen

Jede Entität, die in den Routenbeschreibungen als „Tür“, „Fenster“, „Zugang“, „Eingang“ oder „Ausgang“ bezeichnet wird, soll zur Sorte der *Grenzöffnungen* (`boundary-opening`) gehören.

Für eine Grenzöffnung haben diejenigen Landmarken, in deren Grenze sie sich befindet, besondere Bedeutung. Diese Landmarken werden durch das Prädikat $\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(bo, l)$ beschrieben, das ausdrückt, dass *bo* eine Grenzöffnung ist, die sich in der Grenze der Landmarke l befindet. Die Definition dieses Prädikates wird für die Formulierung der Thesen jedoch nicht benötigt und deshalb erst im Kapitel 5 definiert.

Hierbei muss es sich bei l nicht unbedingt um einen stark begrenzten Container handeln: Eine Türe kann zum Beispiel auch in der Grenze eines Teilhauses liegen, obwohl Teilhäuser keine stark begrenzten Container sind. Es ist auch nicht immer bekannt, in der Grenze von welchen Landmarken sich eine Grenzöffnung befindet. Beispielsweise ist bei einer Entität, die als „Türe“ bezeichnet wird, nicht klar, ob sie nur eine Zwischentür in einem Gang oder ein Ausgang aus einem Gebäude ist (siehe z.B. „...eine Tür, die dich wieder aus dem Haus bringt“, lt14:5+6).

Wenn die direktionale Präposition „durch“ auf eine Grenzöffnung angewendet wird, dann überschreitet der Pfad, den die Präposition beschreibt, die Grenze jeder Landmarke, in deren Grenze sich die Grenzöffnung befindet (T4.3.5). Dieses Theorem kann sowohl in Bewegungs- als auch in Sichtaussagen angewendet werden.

(T4.3.5)
$$\forall bo \in \texttt{boundary-opening}\, \forall w \in \texttt{path}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\ \texttt{DURCH}(w, bo) \wedge \texttt{IN-BOUNDARY-OF}(bo, l) \Rightarrow \texttt{BOUNDARY-CROSSING}(w, l)]$$

Eine Türe kann prinzipiell sowohl als „Eingang“ als auch als „Ausgang“ bezeichnet werden. Abhängig von der gewählten Bezeichnung in der Routenbeschreibung lassen sich für eine solche Tür unterschiedliche Aussagen treffen. Deshalb wird für jede dieser Bezeichnungen eine eigene Sorte eingeführt, deren Unterschied später geometrisch modelliert wird (siehe Abschnitt 5.6).

Eingänge (Sorte `entrance`) bzw. *Ausgänge* (Sorte `exit`) sind spezielle Grenzöffnungen. In den gegebenen Routenbeschreibungen wird jedes Mal, wenn die direktionale Präposition „durch“ in einer Bewegungsaussage auf einen Eingang angewendet wird, ein stark begrenzter Container betreten (T4.3.6). Analog soll dies auch für Ausgänge und das Verlassen eines stark begrenzten Containers gelten (T4.3.7).

(T4.3.6)
$$\forall w \in \texttt{path}\, \forall e \in \texttt{entrance}\ [\ \texttt{DURCH}(w, e) \Rightarrow \exists c \in \texttt{sbc}\ [\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(e, c) \wedge \texttt{OUTIN}(w, c)]]$$

(T4.3.7)
$$\forall w \in \texttt{path}\, \forall e \in \texttt{exit}\ [\ \texttt{DURCH}(w, e) \Rightarrow \exists c \in \texttt{sbc}\ [\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(e, c) \wedge \texttt{INOUT}(w, c)]]$$

Die vorliegenden Routenbeschreibungen zeigen für Eingänge folgendes: Wenn der imaginäre Wanderer einen Eingang in einer Positionierungs-, Bewegungs- oder

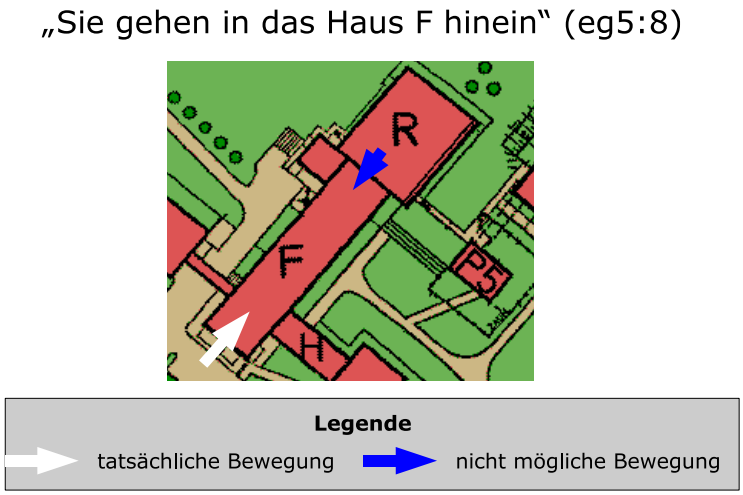

Abbildung 4.4: Auswirkung der direktionalen Präposition „in“

Sichtaussage gemäß den Thesen für die Sicht wahrnehmen kann, dann befindet er sich in keinem stark begrenzten Container, in dessen Grenze sich der Eingang befindet. Diese Eigenschaft formuliert Theorem (T4.3.8): Wenn eine Sichtlinie, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet, zu einem Eingang geht und sich dieser in der Grenze eines stark begrenzten Containers befindet, dann liegt der Startpunkt der Sichtlinie nicht in diesem Container.

Ausgänge verhalten sich dagegen folgendermaßen: Wenn der imaginäre Wanderer in einer Positionierungs-, Bewegungs- oder Sichtaussage einen Ausgang gemäß den Thesen für die Sicht wahrnehmen kann, dann befindet sich der imaginäre Wanderer in den stark begrenzten Containern, in deren Grenze sich der Ausgang befindet (T4.3.9).

Basierend auf den gegebenen Routenbeschreibungen kann außerdem angenommen werden, dass jeder Eingang und jeder Ausgang sich in der Grenze von mindestens einem stark begrenzten Container befindet (A4.3.10 und A4.3.11).

(T4.3.8) $\forall e \in \texttt{entrance}\, \forall w \in \texttt{path}\, \forall c \in \texttt{sbc}\, \forall q \in \texttt{point}\ [$
$\texttt{LOS}(q, w, e) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w) \wedge \texttt{IN-BOUNDARY-OF}(e, c) \Rightarrow \neg\, \texttt{CNTD}(q, c)]$

(T4.3.9) $\forall e \in \texttt{exit}\, \forall w \in \texttt{path}\, \forall c \in \texttt{sbc}\, \forall q \in \texttt{point}\ [$
$\texttt{LOS}(q, w, e) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w) \wedge \texttt{IN-BOUNDARY-OF}(e, c) \Rightarrow \texttt{CNTD}(q, c)]$

(A4.3.10) $\forall e \in \texttt{entrance}\, \exists c \in \texttt{sbc}\ [\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(e, c)]$

(A4.3.11) $\forall e \in \texttt{exit}\, \exists c \in \texttt{sbc}\ [\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(e, c)]$

4.3.5 Direktionale Präpositionen „in“ und „aus“

Die vorliegenden Routenbeschreibungen legen nahe, dass die direktionalen Präpositionen „in“ und „aus“, wenn sie auf eine Landmarke angewendet werden, in Bewegungsaussagen auch immer die Überschreitung der Grenze eines stark begrenzten Containers, in dem die Entität enthalten ist, von außen nach innen bzw. von innen nach außen zur Folge haben (T4.3.12 bzw. T4.3.13). Der triviale Fall ist der, dass es sich bei dem Referenzobjekt, auf das die direktionale Präposition angewendet wurde,

um einen stark begrenzten Container handelt. Diese Axiome gelten aber auch, wenn die Landmarke selbst kein stark begrenzter Container ist. Beispielsweise werden in den vorliegenden Routenbeschreibungen die direktionalen Präpositionen „in“ und „aus“ nur dann auf ein Teilhaus angewendet, wenn auch das Gebäude, in dem sich das Teilhaus befindet, betreten bzw. verlassen wird und nicht ein Wechsel von einem Teilhaus ins andere Teilhaus stattfindet (siehe Abbildung 4.4). In Sichtaussagen ist die direktionale Präposition „in“ nicht zugelassen (siehe Abschnitt 1.5). Die direktionale Präposition „aus“ wird in dem Teilsatz „Aus dem Fenster ist dann schon Haus E zu sehen“ (lt14:4) verwendet und beschreibt auch dort, dass die Sichtlinien das Gebäude, zu dem das Teilhaus E gehört, verlassen.

(T4.3.12) $$\forall w \in \texttt{path}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\ \texttt{IN}(w,l) \Rightarrow \exists c \in \texttt{sbc}\ [\,\texttt{CNTD}(l,c) \wedge \texttt{OUTIN}(w,c)]]$$

(T4.3.13) $$\forall w \in \texttt{path}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\ \texttt{AUS}(w,l) \Rightarrow \exists c \in \texttt{sbc}\ [\,\texttt{CNTD}(l,c) \wedge \texttt{INOUT}(w,c)]]$$

Kapitel 5

Axiomatisierung der Repräsentationssprache

In diesem Abschnitt wird die Repräsentationssprache, basierend auf den Vorschlägen einiger anderer Autoren und den Thesen aus dem vorherigen Kapitel, axiomatisiert. Das bedeutet, dass Axiome und Definitionen eingeführt werden, sodass die Theoreme des Kapitels 4 abgeleitet werden können. Zunächst werden Sicht- und Bewegungsverben näher beschrieben. Anschließend wird die Bedeutung von lokalen und direktionalen Präpositionen formalisiert. Schließlich werden die Eigenschaften von inneren Entitäten, Eingängen und Ausgängen geometrisch modelliert.

5.1 Bewegungsverben

Bewegungsverben werden durch den Ausdruck $\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(a, w))$ repräsentiert. Er gibt an, dass s die Situation ist, in der der Agent a den gesamten Pfad w durchläuft. Für diesen Ausdruck gilt folgendes Axiom (A5.1.1): Zum Startzeitpunkt von s befindet sich a im Startpunkt, zum Endzeitpunkt von s im Endpunkt von w. Außerdem ist ein Punkt q genau dann präzedent zu einem Punkt q' bezüglich w, wenn a seinen Ort innerhalb von s von q nach q' ändert. Schließlich muss die Orientierung des imaginären Wanderers zum Startzeitpunkt und während der gesamten Situation s durch w gegeben sein (vgl. Eschenbach u. a. 2000; dort allerdings ohne ORIENT).

(A5.1.1)
$$\begin{aligned}
&\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall w \in \texttt{path}\ [\\
&\quad \texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{GO}(x, w)) \Leftrightarrow \\
&\qquad \texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{CHANGE-PLACE}(a, \texttt{STPT}(w), \texttt{FPT}(w))) \wedge \\
&\qquad \forall q, q' \in \texttt{point}\ [\prec(w, q, q') \Leftrightarrow \\
&\qquad\quad \texttt{OCCURS-IN}(s, \texttt{CHANGE-PLACE}(a, q, q'))] \wedge \\
&\qquad \texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{ORIENT}(a, w)) \wedge \texttt{INIT}(s, \texttt{ORIENT}(a, w))]
\end{aligned}$$

Das Ereignis, dass sich a von einem Ort q zu einem Ort q' bewegt, ist dadurch bestimmt, dass sich a zum Anfangszeitpunkt des Ereignisses in q und zum Endzeit-

punkt des Ereignisses in q' befindet (A5.1.2) (vgl. Eschenbach u. a. 2000).

(A5.1.2) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall q, q' \in \texttt{point}\ [$
$\texttt{OCCURS-ON}(s, \texttt{CHANGE-PLACE}(a, q, q')) \Leftrightarrow$
$\neg(q = q') \wedge \texttt{INIT}(s, \texttt{BE-AT}(a, q)) \wedge \texttt{FIN}(s, \texttt{BE-AT}(a, q'))]$

Um auszusagen, dass während der gesamten Situation s die Orientierung des imaginären Wanderers a durch eine Tangente an den Pfad w an der aktuellen Position des imaginären Wanderers gegeben ist, wird der Ausdruck $\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{ORIENT}(a, w))$ verwendet (A5.1.3). Durch $\texttt{INIT}(s, \texttt{ORIENT}(a, w))$ wird beschrieben, dass zum Startzeitpunkt von s die Orientierung des imaginären Wanderers a durch w bestimmt ist (A5.1.4). Diese letzte Definition ist notwendig, da durch HOLDS-ON weder der Start- noch der Endzeitpunkt der Situation berücksichtigt wird.

(A5.1.3) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall w \in \texttt{path}\ [$
$\texttt{HOLDS-ON}(s, \texttt{ORIENT}(a, w)) \Leftrightarrow \forall f \in \texttt{for}\ [\texttt{HOLDS-IN}(s, \texttt{FOR}(f, a)) \Rightarrow$
$f = \texttt{FOR}(w, \texttt{POS}(f))]]$

(A5.1.4) $\forall s \in \texttt{situation}\, \forall a \in \texttt{agent}\, \forall w \in \texttt{path}\ [$
$\texttt{INIT}(s, \texttt{ORIENT}(a, w)) \Leftrightarrow \forall f \in \texttt{for}\ [\texttt{INIT}(s, \texttt{FOR}(f, a)) \Rightarrow$
$f = \texttt{FOR}(w, \texttt{POS}(f))]]$

5.2 Verben des Sehens

Zur Definition der Bedeutung von Sichtverben ist es zunächst nötig, Sichtlinien zu beschreiben. Darauf basierend kann dann definiert werden, was es bedeutet, dass sich ein Objekt im Sichtfeld bezüglich eines Referenzrahmens befindet.

5.2.1 Sichtlinien und transparente Entitäten

Eine Sichtlinie ist ein gerader Pfad, der beschreibt, dass man von einem Punkt, an dem der Pfad beginnt, zu einem Zielobjekt sehen kann.

Wenn ein Punkt einer Sichtlinie ein innerer Punkt einer Landmarke ist, dann muss er ein innerer Punkt eines Lochs dieser Landmarke sein oder ein innerer Punkt einer *transparenten Entität* (Sorte `transparent`). Dadurch wird ausgeschlossen, dass die Sicht vom Startpunkt zum Zielobjekt durch andere Landmarken verdeckt wird. Die Randpunkte von Landmarken werden bezüglich des Verdeckens der Sicht ignoriert. Da die Position von mobilen wahrnehmbaren Entitäten durch einen Punkt repräsentiert wird, können diese durch ihre Bewegung keine Sichtlinie zerstören. Die Bedeutung einer *transparenten* Entität (Sorte `transparent`) ist durch diese Beziehung zu Sichtlinien gegeben, dass es sich hierbei um kein Loch handelt, sie aber dennoch von Sichtlinien passiert werden kann.

Es kann angenommen werden, dass ein Objekt nur dann als Zielobjekt in einer Sichtaussage verwendet wird, wenn der imaginäre Wanderer auch einen Teil der Region wahrnehmen kann, von der man sagen würde, dass sie bei dem Zielobjekt ist. Dadurch ist es beispielsweise unmöglich, dass in einer Sichtaussage ein Zimmer als Zielobjekt verwendet wird, wenn der Beobachter außerhalb des Gebäudes ist, in dem

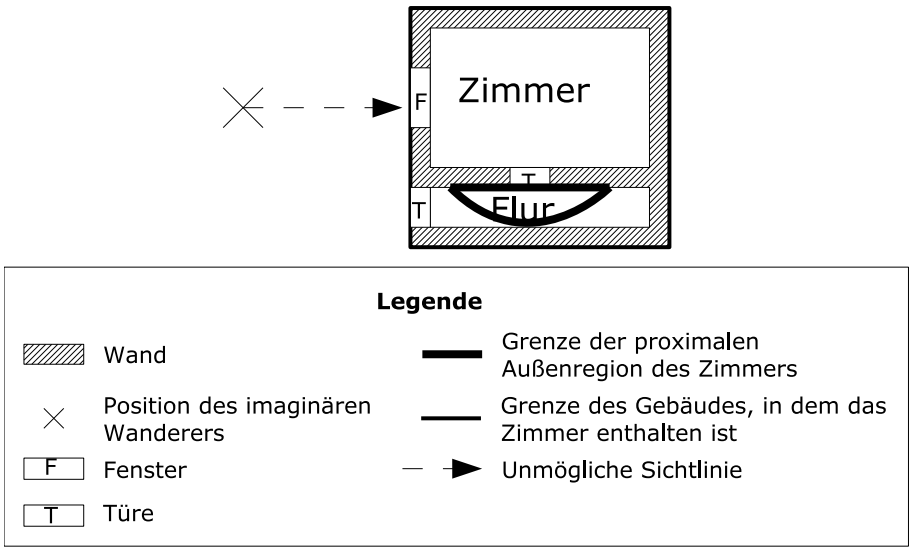

Abbildung 5.1: Unmögliche Sichtlinien

sich das Zimmer befindet. Es kann in der Situation, die die Sichtaussage beschreibt, sehr wohl eine Verbindung zwischen dem Beobachter und dem Zimmer geben (z.B. zu dem Außenfenster des Zimmers). Da sich jedoch die proximale Außenregion eines Zimmers nicht über das Gebäude, in dem es enthalten ist, erstreckt, kann der imaginäre Wanderer keinen Teil dieser Region wahrnehmen (siehe Abbildung 5.1). Diese Annahme kann dadurch formalisiert werden, dass von jeder Sichtlinie zu einem Zielobjekt gefordert wird, dass sie auch einen inneren Punkt in dessen proximaler Außenregion besitzt.

Definition (D5.2.1) fasst die beschriebenen Aussagen über Sichtlinien zusammen:

(D5.2.1)
$$\begin{aligned}
&\forall q \in \texttt{point}\,\forall w \in \texttt{path}\,\forall t \in \texttt{landmark}\ [\texttt{LOS}(q,w,t) \Leftrightarrow_{\text{def}}\\
&\quad \exists l \in \texttt{line}\,\forall q' \in \texttt{point}\ [q'\,\iota\,w \Rightarrow q'\,\iota\,l] \wedge\\
&\quad \forall l \in \texttt{landmark}\,\forall q' \in \texttt{point}\ [q'\,\iota\,w \wedge \texttt{CNTD}(q',l) \Rightarrow\\
&\qquad \exists h \in \texttt{hole}\ [\texttt{H}(h,l) \wedge \texttt{CNTD}(q',h)] \vee\\
&\qquad \exists t' \in \texttt{transparent}\ [\texttt{CNTD}(q',t')]] \wedge\\
&\quad \exists q' \in \texttt{point}[q'\,\iota\,w \wedge \texttt{CNTD}(q',\texttt{EXT}(t))] \wedge\\
&\quad \texttt{BDPT}(\texttt{FPT}(w),\texttt{PLACE}(ro)) \wedge \texttt{STPT}(w) = q]
\end{aligned}$$

5.2.2 Sichtfeld

Wenn sich ein Zielobjekt t im Sichtfeld des Referenzrahmens f befindet, dann muss zunächst eine Sichtlinie w von der Position des Referenzrahmens f zu t existieren. Da das Prädikat `VIEW` nur auf solche Referenzrahmen angewendet wird, die durch den imaginären Wanderer gegeben sind, ist die Position des Referenzrahmens durch einen Punkt bestimmt. Für einen menschlichen Beobachter entspricht die Region, die nicht hinter ihm ist, ungefähr seinem Sichtfeld. Deshalb darf sich der Endpunkt der Sichtlinie nicht hinten bezüglich des Referenzrahmens, der die Orientierung des

imaginären Wanderers beschreibt, befinden (D5.2.2).

(D5.2.2) $$\forall f \in \texttt{for}\,\forall w \in \texttt{path}\,\forall t \in \texttt{landmark}\ [\texttt{VIEW}(f,w,t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{POS}(f) \in \texttt{point} \wedge \texttt{LOS}(\texttt{POS}(f),w,t) \wedge \forall q \in \texttt{point}[q\,\iota\,w \Rightarrow \neg q\,\iota\,\texttt{HINTER}(f,\texttt{POS}(f))]]$$

Es sei eine Sichtlinie w gegeben, die innerhalb von VIEW verwendet wird. Wenn nun eine andere Sichtlinie w' existiert, die denselben Startpunkt wie w besitzt und deren Endpunkt auf w liegt, dann liegen alle Punkte von w und w' auf derselben Gerade. Die gilt, da unterschiedliche Geraden höchstens einen Punkt gemeinsam haben können (siehe A2.2.25). Damit folgt aus Axiom (A2.2.54), dass alle Punkte von w' auch auf w liegen. Da in VIEW gefordert wird, dass alle Punkte von w nicht hinten bezüglich f liegen, gilt das auch für alle Punkte von w'. Damit gilt auch für das Zielobjekt von w' ebenfalls das Prädikat VIEW. Dieser Zusammenhang wird in Theorem (T5.2.3) zusammengefasst.

(T5.2.3) $$\forall f \in \texttt{for}\,\forall w, w' \in \texttt{path}\,\forall t, t' \in \texttt{landmark}\ [\texttt{VIEW}(f,w,t) \wedge \texttt{LOS}(\texttt{POS}(f),w',t') \wedge \texttt{FPT}(w')\,\iota\,w \Rightarrow \texttt{VIEW}(f,w',t')]$$

5.3 Lokale Präpositionen

Lokale Präpositionen beschreiben durch eine Ortsrelation eine Region, in der LO positioniert wird, und können durch eine einschränkende Relation noch weitere Zusammenhänge zwischen LO und RO festlegen (siehe Abschnitt 3.1). In diesem Abschnitt sollen diese Ortsrelationen und einschränkenden Relationen definiert werden.

5.3.1 Ortsrelationen

Die charakteristische Region der Präposition „in“ ist durch die Region gegeben, die von RO umfasst wird (D5.3.1). Diese Präposition kann damit nicht auf den imaginären Wanderer angewendet werden, da dessen Position als Punkt charakterisiert ist.

(D5.3.1) $$\forall z \in \texttt{state-type}\,\forall r \in \texttt{region}\,\forall ro \in \texttt{perceptible-entity}\ [z = \texttt{IN}^*(r,ro)) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{BE-AT}(ro,r)]$$

Bei den übrigen topologischen Präpositionen „bei“, „an“ und „auf“ wird LO in der proximalen Außenregion von RO lokalisiert. Dabei werden die zusätzlichen Einschränkungen, die von Herweg (1988) gefordert werden, aus Einfachheitsgründen nicht formalisiert (D5.3.2). In der entsprechenden Definition wird AN-BEI-AUF-PRÄP als Schema-Variable für eine der Präpositionen „bei“, „an“ oder „auf“ verwendet.

(D5.3.2) $$\forall z \in \texttt{state-type}\,\forall r \in \texttt{region}\,\forall ro \in \texttt{perceptible-entity}\ [z = \texttt{AN-BEI-AUF}^*(r,ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{EXT}(r,ro)]$$

Dimensionale Präpositionen benötigen außer RO als weiteres Argument ein Referenzsystem. Die Region, die die Ortsrelation einer direktionalen Präposition be-

schreibt, ist durch den Referenzrahmen des Referenzsystems bestimmt (D5.3.3).

(D5.3.3) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall r \in \texttt{region}\, \forall ro, rs \in \texttt{perceptible-entity}\ [$
$z = \texttt{DIM-PRÄP}^*(r, ro, rs) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\exists f \in \texttt{for}\ [z = \texttt{FOR}(f, rs) \wedge r = \texttt{DIM-PRÄP}(\texttt{PLACE}(ro), f)]]$

Dabei bezeichnet $\texttt{DIM-PRÄP}^*$ eine Schema-Variable für die zu definierende Ortsrelation der dimensionalen Präposition. DIM-PRÄP ist eine Schema-Variable für das in gleicher Weise benannte Prädikat für Referenzrahmen.

Für die Ortsrelation der Präposition „zwischen“ soll nur angenommen werden, dass sie die Summe aller Regionen ist, die sich bezüglich der Relation β zwischen den beiden Referenzobjekten befinden, und dass sie sich außerhalb der beiden Referenzobjekte befindet (D5.3.4). Die Summierung ist hier notwendig, da die Ortsrelation dazu benutzt wird, die Ortsfunktion zu definieren, und deren Ergebnis eindeutig sein muss.

(D5.3.4) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall r \in \texttt{region}\, \forall ro_1, ro_2 \in \texttt{perceptible-entity}\ [$
$z = \texttt{ZWISCHEN}^*(r, ro_1, ro_2) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\exists p_1, p_2 \in \texttt{position}\ [z = (\texttt{BE-AT}(ro_1, p_1) \& \texttt{BE-AT}(ro_2, p_2)) \wedge$
$r = \Sigma r_2 \in \texttt{region}\ [\beta(p_1, r_2, p_2)] \wedge \neg(\texttt{O}(p_1, r) \vee \texttt{O}(p_2, r))]]$

5.3.2 Einschränkende Relationen

Lokale Präpositionen können, außer durch die Bestimmung der charakteristischen Region, noch zusätzliche Einschränkungen zwischen dem zu lokalisierenden Objekt und den Referenzobjekten beinhalten. Diese Einschränkungen werden nun so definiert, dass die Aussagen über die Sicht, die in Abschnitt 4.2 in Verbindung mit lokalen Präpositionen beschrieben wurden, ableitbar sind. Dabei muss jeweils unterschieden werden, ob der imaginäre Wanderer das zu lokalisierende Objekt, das Referenzobjekt oder nicht an der lokalen Präposition beteiligt ist.

Wenn eine der lokalen Präpositionen „an“, „bei“ oder „auf“ verwendet wird und der imaginäre Wanderer das Referenzobjekt ist, dann muss eine Sichtlinie von ihm zu LO existieren, damit das Theorem (T4.2.6) ableitbar ist. Die Definition der entsprechenden einschränkenden Relation ist in (D5.3.5) beschrieben. Wenn der imaginäre Wanderer das zu lokalisierende Objekt ist, dann wird durch das Theorem (T4.2.5) für die Präpositionen „an“ und „bei“ eine Sichtlinie von ihm zu RO gefordert. Die entsprechende einschränkende Relation wird in (D5.3.6) definiert. Bei der lokalen Präposition „auf“ befindet sich gemäß Theorem (T4.2.7) das Zielobjekt sogar im Sichtfeld des imaginären Wanderers. (D5.3.7) gibt die Definition der entsprechenden einschränkenden Relation an. In diesen Definitionen bezeichnet $\texttt{AN-BEI-PRÄP}_c$ eine Schema-Variable für die einschränkende Relation der Präpositionen „an“ und „bei“. $\texttt{AN-BEI-AUF-PRÄP}_c$ steht für die einschränkende Relation der Präpositionen „an“,

„bei“ und „auf“.

(D5.3.5) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall ro \in \texttt{agent}\, \forall lo \in \texttt{landmark}\ [$
$z = \texttt{AN-BEI-AUF-PRÄP}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{LOS}(ro, lo)]$

(D5.3.6) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall lo \in \texttt{agent}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [$
$z = \texttt{AN-BEI-PRÄP}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{LOS}(lo, ro)]$

(D5.3.7) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall lo \in \texttt{agent}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [$
$z = \texttt{AUF}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{VIEW}(lo, ro)]$

Wenn die lokale Präposition „in“ verwendet wird, werden keine weiteren Einschränkungen benötigt (D5.3.8). Dasselbe gilt, wenn alle beteiligten Objekte einer topologischen Präposition immobil bzw. mobil sind (D5.3.9 bzw. D5.3.10). Dabei wird $\texttt{TOP-PRÄP}_c$ als Schema-Variable für die einschränkende Relation einer beliebigen topologischen Präposition verwendet.

(D5.3.8) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall lo, ro \in \texttt{perceptible-entity}\ [$
$z = \texttt{IN}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{nothing}]$

(D5.3.9) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall lo, ro \in \texttt{landmark}\ [$
$z = \texttt{TOP-PRÄP}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{nothing}]$

(D5.3.10) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall lo, ro \in \texttt{agent}\ [$
$z = \texttt{TOP-PRÄP}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{nothing}]$

Für alle dimensionalen Präpositionen außer „hinter“ wird durch das Theorem (T4.2.10) gefordert, dass der imaginäre Wanderer während der gesamten Situation LO sehen kann, wenn er als Referenzobjekt verwendet wird. Diese Forderung wird auf die entsprechenden einschränkenden Relationen übertragen (D5.3.11). In der Definition stellt $\texttt{DIM-NOT-HINTER-PRÄP}_c$ eine Schema-Variable für die einschränkende Relation einer dimensionalen Präposition dar, die nicht der Präposition „hinter“ entspricht. Für „hinter“ gilt gemäß Theorem (T4.2.9) in dem Fall, dass der imaginäre Wanderer das Referenzobjekt ist, dass eine Sichtlinie zu LO existiert. Diese Aussage ist aus der Definition (D5.3.12) der einschränkenden Relation ableitbar. Wenn der imaginäre Wanderer das zu lokalisierende Objekt ist, gilt gemäß Theorem (T4.2.8) für alle dimensionalen Präpositionen, dass eine Sichtlinie von ihm zu dem Referenzobjekt verläuft (D5.3.13).

(D5.3.11) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall ro \in \texttt{agent}\, \forall lo \in \texttt{landmark}\ [$
$z = \texttt{DIM-NOT-HINTER-PRÄP}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{VIEW}(ro, lo)]$

(D5.3.12) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall ro \in \texttt{agent}\, \forall lo \in \texttt{landmark}\ [$
$z = \texttt{HINTER}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{LOS}(ro, lo)]$

(D5.3.13) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall lo \in \texttt{agent}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [$
$z = \texttt{DIM-PRÄP}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{LOS}(lo, ro)]$

Falls sowohl LO als auch RO immobil bzw. mobil sind, werden keine weiteren Einschränkungen benötigt (D5.3.14 bzw. D5.3.15). $\texttt{DIM-PRÄP}_c$ wird in diesen Definitionen als Schema-Variable für die einschränkende Relation einer beliebigen dimensio-

nalen Präposition verwendet.

(D5.3.14) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall lo, ro \in \texttt{landmark}\ [$
$z = \texttt{DIM-PRÄP}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{nothing}]$

(D5.3.15) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall lo, ro \in \texttt{agent}\ [$
$z = \texttt{DIM-PRÄP}_c(lo, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{nothing}]$

Für die lokale Präposition „zwischen“ gilt gemäß Theorem (T4.2.11), dass von dem imaginären Wanderer zu beiden Referenzobjekten eine Sichtlinie existiert, wenn er das zu lokalisierende Objekt der Präposition ist. Diese Theorem ist aus der Definition (D5.3.16) ableitbar. In allen anderen Fällen wird keine weitere Einschränkung eingeführt (D5.3.17).

(D5.3.16) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall lo \in \texttt{agent}\, ro_1, ro_2 \in \texttt{landmark}\ [$
$z = \texttt{ZWISCHEN}_c(lo, ro_1, ro_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = (\texttt{LOS}(lo, ro_1) \& \texttt{LOS}(lo, ro_2))]$

(D5.3.17) $\forall z \in \texttt{state-type}\, \forall lo \in \texttt{landmark}\, \forall ro_1, ro_2 \in \texttt{perceptible-entity}\ [$
$z = \texttt{ZWISCHEN}_c(lo, ro_1, ro_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} z = \texttt{nothing}]$

5.4 Direktionale Präpositionen

Direktionale Präpositionen beschreiben zunächst durch ihre Ortsfunktion eine Region. Durch diese Region wird mit Hilfe einer Pfad-Relation der Verlauf eines Pfades näher beschrieben. Dabei kann es sich sowohl um den Bewegungsverlauf einer Bewegung als auch um eine Sichtlinie handeln. Außerdem wurde für jede direktionale Präposition ein einschränkendes Prädikat eingeführt, durch das zusätzliche Einschränkungen zwischen dem Pfad und den Referenzobjekten beschrieben werden können (siehe Abschnitt 3.2). In diesem Abschnitt werden nun die Pfad-Relationen und einschränkenden Prädikate definiert.

5.4.1 Pfad-Relationen

Pfad-Relationen setzen einen Pfad in Relation zu einer Region, die durch die Ortsfunktion einer lokalen Präposition gegeben ist (vgl. Eschenbach u. a. 2000).

Die Pfad-Relation $\texttt{TO}(w, r)$ drückt aus, dass der Pfad w in der Region r endet. Dazu wird definiert, dass der Endpunkt von w ein innerer Punkt und der Startpunkt von w kein innerer Punkt von r ist (D5.4.1). Wenn der Startpunkt von w ein innerer Punkt und der Endpunkt von w kein innerer Punkt von r ist, gilt die Pfad-Relation $\texttt{FROM}(w, r)$ (D5.4.2). Mit Hilfe der Pfad-Relation VIA wird beschrieben, dass ein Pfad w einen Punkt besitzt, der ein innerer Punkt der Region ist, und sich weder der Start- noch der Endpunkt in der Region befinden (D5.4.3). Diese Definitionen beruhen auf denjenigen von Eschenbach u. a. (2000), dort wird jedoch statt einem inneren bzw. nicht inneren Punkt ein inzidenter bzw. nicht inzidenter Punkt gefordert. Hier werden die inneren Punkte benötigt, damit Pfad-Relationen, die auf die Ortsfunktion $\texttt{IN}^*(ro)$ eines Referenzobjektes ro angewendet werden, dessen Grenze im Sinne der

Definition eines Grenzübergangs auch tatsächlich überschreiten.

$$\text{(D5.4.1)} \quad \forall w \in \texttt{path}\, \forall r \in \texttt{region}\ [\texttt{TO}(w,r) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{IPT}(\texttt{FPT}(w),r) \wedge \neg\, \texttt{IPT}(\texttt{STPT}(w),r)]$$

$$\text{(D5.4.2)} \quad \forall w \in \texttt{path}\, \forall r \in \texttt{region}\ [\texttt{FROM}(w,r) \Leftrightarrow_{\text{def}} \texttt{IPT}(\texttt{STPT}(w),r) \wedge \neg\, \texttt{IPT}(\texttt{FPT}(w),r)]$$

$$\text{(D5.4.3)} \quad \forall w \in \texttt{path}\, \forall r \in \texttt{region}\ [\texttt{VIA}(w,r) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists q \in \texttt{point}\ [\texttt{IPT}(q,r) \wedge \neg\, \texttt{IPT}(\texttt{STPT}(w),r) \wedge \neg\, \texttt{IPT}(\texttt{FPT}(w),r)]]$$

Des weiteren gibt es die Pfad-Relation $\texttt{TOWARDS}(w,r)$, die ausdrückt, dass der Pfad w in Richtung der Region r geht, jedoch schon vor r enden kann. Diese Relation gilt dann, wenn es einen Pfad w' gibt, in dem w enthalten ist, der tatsächlich zu r geht und der an demselben Startpunkt wie w beginnt (D5.4.4). Analoges wird für den Fall definiert, dass w aus der Richtung von r kommt. Dazu wird dann die Pfad-Relation `AWAY-FROM` verwendet (D5.4.5) (vgl. Eschenbach u. a. 2000). Die Pfad-Relation $\texttt{ALONG}(w,r)$ beschreibt, dass jeder Punkt des Pfades w in r enthalten ist (D5.4.6).

$$\text{(D5.4.4)} \quad \forall w \in \texttt{path}\, \forall r \in \texttt{region}\ [\texttt{TOWARDS}(w,r) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{TO}(w',r) \wedge w \sqsubseteq w' \wedge \texttt{STPT}(w) = \texttt{STPT}(w')]]$$

$$\text{(D5.4.5)} \quad \forall w \in \texttt{path}\, \forall r \in \texttt{region}\ [\texttt{AWAY-FROM}(w,r) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{FROM}(w',r) \wedge w \sqsubseteq w' \wedge \texttt{FPT}(w) = \texttt{FPT}(w')]]$$

$$\text{(D5.4.6)} \quad \forall r \in \texttt{region}\, \forall w \in \texttt{path}\ [\texttt{ALONG}(w,r) \Leftrightarrow_{\text{def}} \forall q \in \texttt{point}\ [q\, \iota\, w \Rightarrow \texttt{IPT}(q,r)]]$$

5.4.2 Einschränkende Prädikate

Die einschränkenden Prädikate von direktionalen Präpositionen werden so definiert, dass die Theoreme aus Abschnitt 4.2 und 4.3 inferiert werden können. Für die Ableitung der Theoreme über die Sicht in Bewegungsaussagen wird die Tatsache verwendet, dass die Orientierung des imaginären Wanderers während der gesamten Bewegung durch den Bewegungsverlauf gegeben ist.

Die Theoreme (T4.2.12) und (T4.2.13) besagen, dass der imaginäre Wanderer in einer Bewegungsaussage zum Startzeitpunkt die Referenzobjekte derjenigen direktionalen Präpositionen sehen kann, deren Pfad-Relation nicht `FROM`, `AWAY-FROM` oder `ALONG` entspricht. Diese Forderung ist aus den einschränkenden Prädikaten dieser direktionalen Präpositionen ableitbar. Sie legen fest, dass im Startpunkt des Pfades mit der Orientierung, die durch den Pfad gegeben ist, die entsprechenden Referenzobjekte gesehen werden können (D5.4.7 und D5.4.8). Die Sichtlinien überschreiten dabei keine Grenze eines stark begrenzten Containers. Es wird auch hier, wie in den Theoremen, die Ausnahme gemacht, dass die Referenzobjekte nicht zur Sorte `track-configuration` gehören dürfen. Die Schema-Variablen `DIR-TOP-DIM-PRÄP` bzw. `DIR-ZWISCHEN-PRÄP` werden für eine direktionale Präposition verwendet, deren Pfad-Relation nicht `FROM`, `AWAY-FROM` oder `ALONG` entspricht. Ihre Ortsfunktion ist durch diejenige einer topologischen oder dimensionalen Präposition bzw. durch diejenige von „zwischen“ gegeben. Diese Definition ist für die direktionalen Präpositionen „durch“ und „in“ nicht ausreichend, da für sie noch weitere Theoreme gelten

sollen. Die einschränkenden Prädikate dieser Präpositionen werden weiter unten betrachtet.

(D5.4.7) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [\texttt{DIR-TOP-DIM-PRÄP}_c(w, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\neg(ro \in \texttt{track-configuration}) \Rightarrow$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(\texttt{FOR}(w, \texttt{STPT}(w)), w', ro) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

(D5.4.8) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro_1, ro_2 \in \texttt{landmark}\ [\texttt{DIR-ZWISCHEN-PRÄP}_c(w, ro_1, ro_2) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\neg(ro_1 \in \texttt{track-configuration} \vee ro_2 \in \texttt{track-configuration}) \Rightarrow$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(\texttt{FOR}(w, \texttt{STPT}(w)), w', ro_1) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')] \wedge$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(\texttt{FOR}(w, \texttt{STPT}(w)), w', ro_2) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

Wenn eine direktionale Präposition, die die Pfad-Relation ALONG enthält und deren Ortsfunktion nicht $\texttt{IN}^*$ entspricht, in einer Bewegungsaussage verwendet wird, dann wird durch die Theoreme (T4.2.14) und (T4.2.15) gefordert, dass der imaginäre Wanderer die Referenzobjekte während der gesamten Situation sehen kann. Die entsprechenden einschränkenden Prädikate (D5.4.9) und (D5.4.10) legen fest, dass mit der Orientierung, die durch den Pfad gegeben ist, in jedem Punkt des Pfades das entsprechende Referenzobjekt gesehen werden kann. Die Sichtlinien überschreiten dabei keine Grenze eines stark begrenzten Containers. Damit sind auch diese Theoreme ableitbar. In den Definitionen wird die Schema-Variable ALONG-PRÄP für eine direktionale Präposition verwendet, deren Pfad-Relation durch ALONG und deren Ortsfunktion durch diejenige einer dimensionalen Präposition oder einer topologischen Präposition mit Ausnahme von „in“ gegeben ist.

(D5.4.9) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro, rs \in \texttt{landmark}\ [$
$\texttt{ALONG-PRÄP}_c(w, ro, rs) \Leftrightarrow_{\text{def}} \forall q \in \texttt{point}\ [q\, \iota\, w \Rightarrow$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(\texttt{FOR}(w, q), w', ro) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

(D5.4.10) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro_1, ro_2 \in \texttt{landmark}\ [$
$\texttt{ZWISCHEN-ENTLANG}_c(w, ro_1, ro_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \forall q \in \texttt{point}\ [q\, \iota\, w \Rightarrow$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(\texttt{FOR}(w, q), w', ro_1) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')] \wedge$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(\texttt{FOR}(w, q), w', ro_2) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

Die letzte direktionale Präposition, die die Pfad-Relation ALONG beinhaltet, ist diejenige, deren Ortsfunktion $\texttt{IN}^*$ ist. In diesem Fall werden keine Einschränkungen benötigt (D5.4.11).

(D5.4.11) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [\texttt{IN-ENTLANG}_c(w, ro)]$

Die direktionalen Präpositionen „von“ und „aus der Richtung“ beschreiben den Ursprung eines Pfades. Wenn sie in einer Bewegungsaussage verwendet werden, folgt aus Theorem (T4.2.16), dass zum Startzeitpunkt eine Sichtlinie vom imaginären Wanderer zu dem Referenzobjekt existiert, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet. Die Definitionen (D5.4.13) und (D5.4.12) besagen daher, dass für diese Präpositionen vom Startpunkt des Pfades eine entsprechende Sichtlinie zu den Referenzobjekten existiert. Da in einer Sichtaussage die direktionalen Präpositionen an die jeweiligen Sichtlinien gebunden werden und sich der imaginäre

Wanderer zu jedem Zeitpunkt der Situation an dem Startpunkt einer Sichtlinie befindet, ist damit auch das Theorem (T4.2.18) ableitbar.

(D5.4.12) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [\texttt{AUS-DER-RICHTUNG}_c(w, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{LOS}(\texttt{STPT}(w), w', ro) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

(D5.4.13) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [\texttt{VON}_c(w, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{LOS}(\texttt{STPT}(w), w', ro) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

Das einschränkende Prädikat der direktionalen Präposition „durch“ besagt zum einen für den Fall, dass das Referenzobjekt eine Grenzöffnung ist, dass ihr Pfad die Grenze jeder Landmarke überschreitet, in deren Grenze sich das Referenzobjekt befindet. Zum anderen legt das einschränkende Prädikat fest, dass das Referenzobjekt mit der Orientierung, die durch den Pfad gegeben ist, im Startpunkt des Pfades gesehen werden kann. Dabei überschreiten die entsprechenden Sichtlinien keine Grenze eines stark begrenzten Containers. Der Endpunkt der Sichtlinie soll hierbei auch auf dem Pfad der direktionalen Präposition liegen. Dies ist möglich, da der Pfad durch das Referenzobjekt hindurch geht (D5.4.14). Da Entitäten der Sorte `track-configuration` Boden-Entitäten sind, kann auf sie die direktionale Präposition „durch“ nicht angewendet werden. Deshalb müssen diese Entitäten nicht formal ausgeschlossen werden. Aus dieser Definition sind zunächst die Theoreme (T4.2.12) und (T4.3.5) direkt ableitbar. Die Spezialfälle, dass es sich bei dem Referenzobjekt um einen Eingang oder Ausgang handelt, können daraus ebenfalls abgeleitet werden, wie später in Abschnitt 5.6 gezeigt wird. Es ist schließlich offensichtlich, dass aus Theorem (T5.2.3) und dieser Definition Theorem (T4.2.17) folgt.

(D5.4.14) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [\texttt{DURCH}_c(w, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$(ro \in \texttt{boundary-opening} \Rightarrow \forall l \in \texttt{landmark}\ [$
$\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(bo, l) \Rightarrow \texttt{BOUNDARY-CROSSING}(w, l)]) \wedge$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(\texttt{FOR}(w, \texttt{STPT}(w)), w', ro) \wedge$
$\texttt{FPT}(w')\, \iota\, w \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

Wird die direktionale Präposition „in“ in einer Bewegungsaussage verwendet, so muss der imaginäre Wanderer, gemäß Theorem (T4.2.12), im Startzeitpunkt das Referenzobjekt sehen können und die Sichtlinie darf dabei keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreiten. Auch diese Präposition kann nicht auf Entitäten der Sorte `track-configuration` angewendet werden, wodurch diese bei der Definition nicht separat behandelt werden müssen. Theorem (T4.3.12) besagt, dass der Pfad der Präposition „in“ außerdem einen stark begrenzten Container betreten muss. Zusammenfassend ergibt sich aus diesen Aussagen die Definition des einschränkenden Prädikates (D5.4.15).

(D5.4.15) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [\texttt{IN}_c(w, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\exists c \in \texttt{sbc}\ [\texttt{OUTIN}(w, c)] \wedge$
$\exists w' \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(\texttt{FOR}(w, \texttt{STPT}(w)), w', ro) \wedge \texttt{EQUAL-CP}(w')]]$

Die Definition des einschränkenden Prädikates der direktionalen Präposition „aus“ besagt, dass der Pfad der Präposition einen stark begrenzten Container

verlässt. Dadurch ist das Theorem (T4.3.13) gültig.

(D5.4.16) $\forall w \in \texttt{path}\, \forall ro \in \texttt{landmark}\ [$
$\texttt{AUS}_c(w, ro) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists c \in \texttt{sbc}\ [\texttt{INOUT}(w, c)]]$

5.5 Innere Entitäten

Damit das Theorem (T4.3.3) von inneren Entitäten gilt, wird folgenden Annahme getroffen: Innere Entitäten besitzen die Eigenschaft, dass sich ihre proximale Außenregion in den stark begrenzten Containern befindet, in denen sie sich selbst befinden, es sein denn, sie sind selbst stark begrenzte Container (A5.5.1).

(A5.5.1) $\forall c \in \texttt{sbc}\, \forall n \in \texttt{inner-entity}\ [$
$\texttt{CNTD}(n, c) \wedge \neg(c = n) \Rightarrow \texttt{CNTD}(\texttt{EXT}(n), c)]$

Wenn eine Sichtlinie, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet, zu einer inneren Entität e führt und e sich in einem stark begrenzten Container c befindet, dann muss sich auch die proximale Außenregion von e in c befinden (siehe Axiom (A5.5.1) von inneren Entitäten). Aus der Die Definition des Prädikates `LOS` folgt, dass die Sichtlinie einen inneren Punkt in der proximalen Außenregion von e besitzt, der damit auch in c enthalten ist. Da alle Punkte der Sichtlinie keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreiten, ist auch der Startpunkt der Sichtlinie in c enthalten. Da innere Entitäten zu den nicht grenzüberschreitenden Entitäten gehören, ist e auch in jedem stark begrenzten Container enthalten, in dem der Startpunkt der Sichtlinie enthalten ist. Damit haben der Startpunkt der Sichtlinie und e dieselbe Enthaltensein-Position. Genau das wird durch Theorem (T4.3.3) ausgesagt.

5.6 Eingänge und Ausgänge

Um die Eigenschaften von Eingängen und Ausgängen beschreiben zu können, ist es notwendig zu definieren, was es bedeutet, wenn sich eine Grenzöffnung in der Grenze einer Landmarke befindet: Eine Grenzöffnung *bo* befindet sich genau dann in der Grenze einer Landmarke l, wenn sich *bo* mit l überlappt, die Region von *bo* kein innerer Teil der Region von l ist und l nicht in *bo* enthalten ist. Außerdem darf l kein Loch sein (D5.6.1). Die mit dieser Definition möglichen Konstellationen von *bo* und l werden in Abbildung 5.2 dargestellt.

(D5.6.1) $\forall bo \in \texttt{boundary-opening}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(bo, l) \Leftrightarrow_{\text{def}}$
$\neg(l \in \texttt{hole}) \wedge \texttt{O}(\texttt{PLACE}(bo), \texttt{PLACE}(l)) \wedge$
$\neg\, \texttt{NTPP}(\texttt{PLACE}(bo), \texttt{PLACE}(l)) \wedge \neg\, \texttt{CNTD}(l, bo)]$

Eine Türe kann prinzipiell sowohl als „Eingang“ als auch als „Ausgang“ bezeichnet werden. Im Folgenden soll dafür jedoch jeweils eine eigene Sorte eingeführt und die Unterschiede geometrisch modelliert werden.

Eingänge (Sorte `entrance`) und *Ausgänge* (Sorte `exit`) sind besondere Grenzöffnungen. Wie in Abschnitt 4.3.4 beschrieben sind sie zunächst dadurch charakterisiert, dass sie sich in der Grenze eines stark begrenzten Containers befinden. Außerdem sollen sie in jeder Landmarke, in deren Grenze sie sich befinden, ganz enthalten

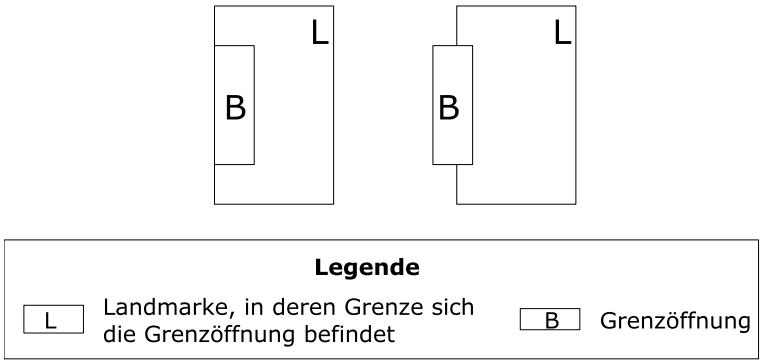

Abbildung 5.2: Einzig mögliche Konstellation für IN-BOUNDARY-OF

sein (A5.6.2 bzw. A5.6.3). Dadurch sind sie nicht grenzüberschreitende Entitäten. Das bedeutet, dass sie in jedem stark begrenzten Container entweder ganz enthalten oder disjunkt zu ihm sind. Dadurch ist jeder Eingang und jeder Ausgang in mindestens einem stark begrenzten Container enthalten. Eingänge besitzen die Eigenschaft, dass sich ihre proximale Außenregion mit keiner Landmarke überlappt, in deren Grenze sie enthalten sind (A5.6.4). Dagegen ist die proximale Außenregion eines Ausgangs ganz in jeder Landmarke enthalten, in deren Grenze er sich befindet (A5.6.5). Dadurch sind Ausgänge innere Entitäten (siehe Abbildung 5.3).

(A5.6.2) $\forall e \in \texttt{entrance}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(e, l) \Rightarrow \texttt{CNTD}(e, l)]$

(A5.6.3) $\forall e \in \texttt{exit}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(e, l) \Rightarrow \texttt{CNTD}(e, l)]$

(A5.6.4) $\forall e \in \texttt{entrance}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [$
$\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(e, l) \Rightarrow \neg\, \texttt{O}(\texttt{EXT}(e), \texttt{PLACE}(l))]$

(A5.6.5) $\forall e \in \texttt{exit}\, \forall l \in \texttt{landmark}\ [$
$\texttt{IN-BOUNDARY-OF}(e, l) \Rightarrow \texttt{CNTD}(\texttt{EXT}(e), l)]$

Wenn eine Sichtlinie w, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet, zu einem Eingang e geht, dann muss sie, nach der Definition von LOS, auch einen inneren Punkt in der proximalen Außenregion des Eingangs besitzen. Da sich die proximale Außenregion mit keiner Landmarke, in deren Grenze sich der Eingang befindet, überlappt, kann dieser Punkt kein innerer Punkt eines stark begrenzten Containers sein, in dem der Eingang enthalten ist. Aus der Definition von EQUAL-CP folgt damit aber, dass sich kein Punkt der Sichtlinie in diesem stark begrenzten Container befinden kann, einschließlich des Startpunktes der Sichtlinie. Damit gilt das Theorem (T4.3.8) aus Abschnitt 4.3.

Da Ausgänge innere Entitäten sind, gilt, dass der Startpunkt jeder Sichtlinie, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet und zu einem Ausgang führt, in denselben stark begrenzten Containern enthalten ist wie der Ausgang. Da jeder Ausgang in den stark begrenzten Containern enthalten ist, in deren Grenze er sich befindet, gilt damit Theorem (T4.3.9).

Falls die direktionale Präposition „durch“ auf einen Eingang e und einen Pfad w angewendet wird, dann folgt aus dem einschränkenden Prädikat von „durch“, dass es eine Sichtlinie vom Startpunkt des Pfades zu e gibt, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet. Aus dem oben bewiesenen Theorem (T4.3.8)

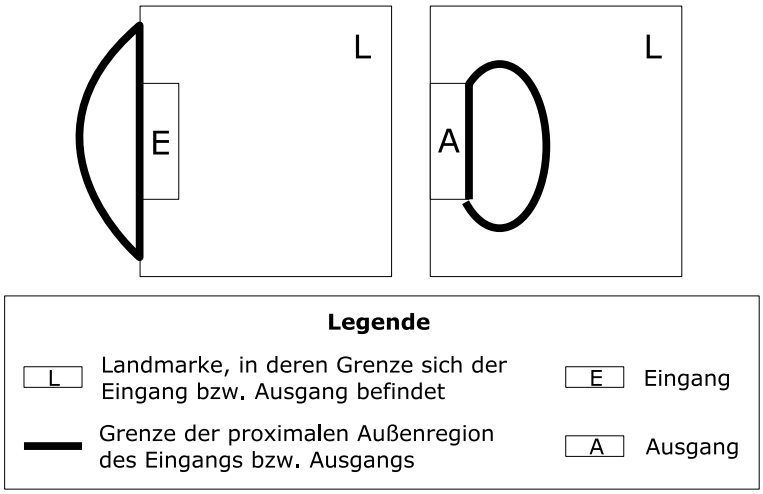

Abbildung 5.3: Modellierung von Eingängen und Ausgängen

folgt, dass der Startpunkt der Sichtlinie, der auch gleichzeitig der Startpunkt von w ist, nicht in dem stark begrenzten Container enthalten ist, in dem sich der Eingang befindet. Da ein Eingang eine Grenzöffnung ist und sich in der Grenze eines stark begrenzten Containers befindet (siehe A4.3.10), folgt aus Theorem (T4.3.5) von Grenzöffnungen, dass der Pfad der direktionalen Präposition die Grenze des stark begrenzten Containers überschreitet und somit auch einen inneren (und äußeren) Punkt in diesem besitzt. Da der Startpunkt des Pfades vor allen anderen Punkten des Pfades liegt und nicht in dem stark begrenzten Container enthalten ist, folgt, dass der Pfad die Grenze des stark begrenzten Containers von außen nach innen überschreitet. Damit ist das Theorem (T4.3.6) bewiesen.

Für Ausgänge, wenn sie als Referenzobjekt der direktionalen Präposition „durch“ auf einen Pfad angewendet werden, kann analog folgender Schluss gezogen werden: Der Pfad überschreitet dann die Grenze des stark begrenzten Containers, in dem der Ausgang enthalten ist, von innen nach außen (siehe Theorem T4.3.7).

Kapitel 6

Auswertung

Dieses Kapitel wendet die Thesen aus dem vorherigen Kapitel auf konkrete Routenbeschreibungen an. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden dazu verwendet, um die diese Arbeit zu diskutieren. Am Ende werden die zentralen Aussagen zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Fragestellungen gegeben.

6.1 Analyse von Routenbeschreibungen

In diesem Abschnitt werden die Routenbeschreibungen eg4 und eg5 näher untersucht. Dazu müssen sie zunächst von der natürlichen Sprache in die formale Sprache umgewandelt werden. An ihnen sollen exemplarisch die Axiome dieser Arbeit verwendet und bewertet werden. Für die Analyse werden Gebäude, Teilhäuser, Flure und Zimmerkomplexe bezüglich ihres Verhältnisses zu stark begrenzten Containern axiomatisiert, um entsprechende Schlüsse für die Enthaltensein-Position durchführen zu können.

Um die einzelnen (Teil-)Sätze miteinander in Verbindung bringen zu können, werden bei der Repräsentation die folgenden Konstanten verwendet: `s1`, `s2`, ... sind Konstanten für Situationen; `w1`, `w2`, ... bezeichnen Pfade; `pe1`, `pe2`,... werden für zu lokalisierende Objekte, Referenzobjekte und Zielobjekte verwendet; `rs1`, `rs2`, ... verweisen auf Referenzsysteme. Die Konstante `iw` repräsentiert den imaginären Wanderer, wobei angenommen werden soll, dass in den Routenbeschreibungen alle erwähnten mobilen wahrnehmbaren Entitäten auf ihn verweisen.

In den als Beispiel verwendeten Routenbeschreibungen wird für jede Positionierungs-, Bewegungs- und Sichtaussage deren Repräsentation angegeben. Die entsprechende Vervollständigung für den Operator ! wird dabei jedoch nicht beschrieben. Außerdem wird für jede Routenbeschreibung eine Karte abgebildet, die ihre Umgebung beschreibt. Diese zeigen eine Teil des Geländes des Fachbereichs Informatik in Hamburg aus der Vogelperspektive. Die jeweilige Route ist darin durch eine dicke, weiße Kurve gekennzeichnet.

6.1.1 Verarbeitung von natürlicher Sprache

Um die natürlich-sprachlichen Sätze der Routenbeschreibungen in die formale Sprache umzuwandeln, wird der Parser des Projektes „Geometrischer Agent“ verwendet (siehe Abschnitt 1.2). Dadurch wird sichergestellt, dass die Umwandlung systematisch und berechenbar erfolgt. In dem Projekt wird jedoch eine etwas andere formale

Sprache verwendet, als die hier vorgestellte:

Positionierungsaussagen werden durch den Parser erkannt. Zu deren Repräsentation wird im Projekt die Ortsfunktion der lokalen Präposition verwendet und gesagt, dass sich das zu lokalisierende Objekt darin befindet. Dabei werden allerdings auch mobile Entitäten unabhängig von der Zeit auf immobile geometrische Entitäten abgebildet, wodurch sich ein Widerspruch ergibt. Das trifft beispielsweise auf die Region, die sich bei dem imaginären Wanderer befindet, zu. Der Parser des Projektes bestimmt nicht das Referenzsystem für dimensionale Präpositionen, was für die in dieser Arbeit vorgestellten Beobachtungen auch nicht notwendig ist. Es sind also sowohl der Name der lokalen Präposition als auch das Referenzobjekt und das zu lokalisierende Objekt bekannt. Damit kann die Positionierungsaussage in das hier verwendete Format umgewandelt werden.

Verschachtelte Positionierungsaussagen sind solche, die in einer anderen Positionierungsaussage oder in einer Bewegungsaussage enthalten sind. Sie werden ebenfalls von dem Parser erkannt. Zum Beispiel wird durch den Satz „Am Ende des Ganges in Haus F befindet sich ... das Haus R“ (eg5:12) sowohl für Haus R ausgesagt, dass es sich am Ende des Ganges befindet, als auch für den Gang, dass er sich in Haus F befindet.

Bei Bewegungsaussagen werden das Bewegungsverb, die Pfad-Relationen und die Ortsfunktion der direktionalen Präposition im Projekt auf dieselbe Weise repräsentiert wie auch in dieser Arbeit. Es ist also nur noch nötig, das einschränkende Prädikat hinzuzufügen.

Sichtverben werden von dem Parser des Projektes erkannt. Es wird jedoch nur das Zielobjekt an das Verb gebunden. Direktionale Präpositionen werden ebenfalls erkannt, die Repräsentation des Sichtverbs im Projekt enthält jedoch keine Sichtlinien, an die diese gebunden werden könnten. Wenn lokale Präpositionen in einem Teilsatz vorkommen, dann werden diese von dem Parser erkannt, jedoch nur in bestimmten Fällen auf das Zielobjekt bezogen. Vor allem, wenn es sich bei dem Referenzobjekt der lokalen Präposition um den imaginären Wanderer handelt, ist dies der Fall.

6.1.2 Sorten in der Analyse

Im folgenden Abschnitt werden Gebäude, Teilhäuser, Flure und Zimmerkomplexe bezüglich ihres Zusammenhangs mit stark begrenzten Containern axiomatisiert. Von allen wird angenommen, dass sie zur Sorte der nicht grenzüberschreitenden Entitäten gehören.

Gebäude (Sorte `building`) sind stark begrenzte Container, die sich in keinem anderen stark begrenzten Container befinden. Deshalb gehören sie zur Sorte der nicht enthaltenen Entitäten. Weitere Axiome werden für Gebäude nicht benötigt. *Teilhäuser* (Sorte `housepart`) befinden sich in einem Gebäude und sind selber keine stark begrenzten Container. Außerdem befinden sich in ihnen keine weiteren Teilhäuser (A6.1.1). Es wird angenommen, dass jede Landmarke, die als „Haus X“ bezeichnet wird, wobei „X“ für einen beliebigen Buchstaben steht, ein Teilhaus ist.

(A6.1.1)
$$\begin{aligned}&\forall h \in \texttt{housepart}\ [\\ &\quad \exists b \in \texttt{building}\ [\texttt{CNTD}(h, b)] \wedge\\ &\quad \forall h_2 \in \texttt{housepart}\ [\texttt{CNTD}(h, h_2) \Rightarrow h = h_2)]\end{aligned}$$

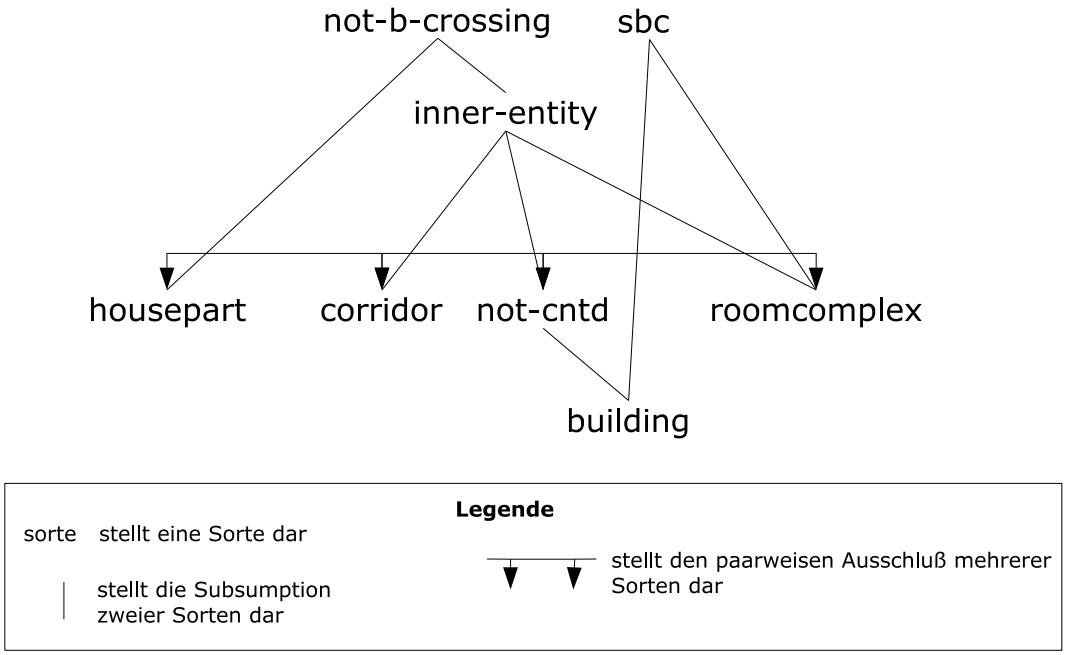

Abbildung 6.1: Sorten der Analyse

Zimmerkomplexe (Sorte `roomcomplex`) sind stark begrenzte Container, die in Gebäuden enthalten sind, selbst aber keine anderen Zimmerkomplexe, Flure oder Teilhäuser enthalten (A6.1.2). Die Bezeichnung „Flur“ verweist auf Entitäten der Sorte `corridor`. Diese sind keine stark begrenzten Container und befinden sich in einem Gebäude. In ihnen befinden sich keine anderen Zimmerkomplexe, Flure oder Teilhäuser (A6.1.3). Abbildung 6.1 zeigt die Zugehörigkeiten zu den Sorten aus dem Abschnitt 4 auf.

(A6.1.2)
$$\begin{aligned}&\forall r \in \texttt{roomcomplex}\ [\\ &\quad \exists b \in \texttt{building}\ [\texttt{CNTD}(r,b)] \wedge\\ &\quad \forall r_2 \in \texttt{roomcomplex}\ [\texttt{CNTD}(r,r_2) \Rightarrow r = r_2] \wedge\\ &\quad \forall h \in \texttt{housepart}\ [\neg\, \texttt{CNTD}(h,r)] \wedge\\ &\quad \forall c \in \texttt{corridor}\ [\neg\, \texttt{CNTD}(c,r)]]\end{aligned}$$

(A6.1.3)
$$\begin{aligned}&\forall c \in \texttt{corridor}\ [\\ &\quad \exists b \in \texttt{building}\ [\texttt{CNTD}(c,b)] \wedge\\ &\quad \forall c_2 \in \texttt{corridor}\ [\texttt{CNTD}(c,c_2) \Rightarrow c = c_2] \wedge\\ &\quad \forall h \in \texttt{housepart}\ [\neg\, \texttt{CNTD}(h,c)] \wedge\\ &\quad \forall r \in \texttt{roomcomplex}\ [\neg\, \texttt{CNTD}(r,c)]]\end{aligned}$$

6.1.3 Routenbeschreibung eg4

In dieser Routenbeschreibung soll untersucht werden, was durch die vorgestellten Theoreme über die Sicht des imaginären Wanderers ausgesagt werden kann.

Die Routenbeschreibung gibt den Weg von Haus R zur Mensa an. Diese befindet sich in Haus B, im ersten Obergeschoß:

1. Wenn sie das Haus verlassen,
2. wenden sie sich bitte nach links
3. und gehen unter der Unterführung durch
4. nach rechts den großen Baum links liegenlassen.
5. Sie stehen auf dem Vorplatz zu Haus D
6. und sie gehen auf dem gepflasterten Weg über die Wiese.
7. Am Ende des Weges über die Wiese wieder nach rechts gehen

8+10 und sie stehen . . . am Eingang der Mensa.

9 sobald sie einen Aschenbecher vor der Tür sehen,

11 Die Mensa befindet sich im ersten OG des Gebäudes B.

Ergänzend zu bemerken ist, dass im Original der Teilsatz (9) an der Stelle, die an den Punkten zu erkennen ist, zwischen den Teilsätzen (8) und (10) eingefügt war. Die Aneinanderfügung der Teilsätze (8) und (10) beruht auf dem verwendeten Parser.

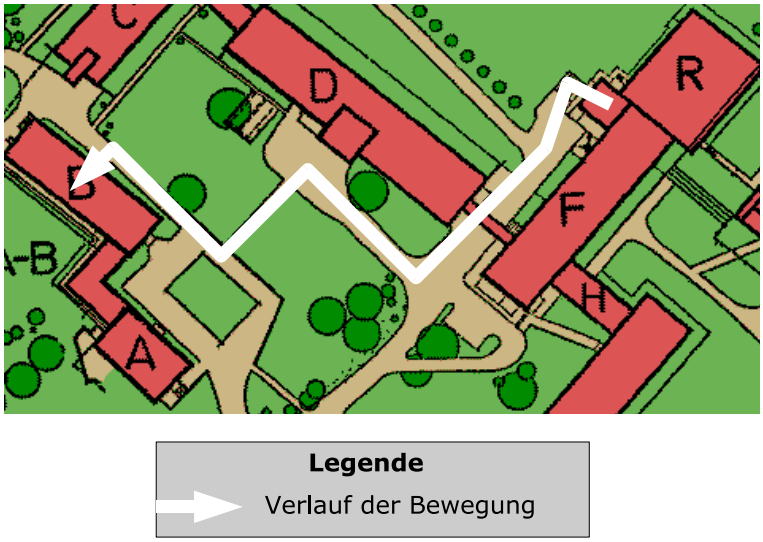

Abbildung 6.2: Routenbeschreibung eg4

(1) Wenn sie das Haus verlassen

$$\texttt{OCCURS-ON}(\texttt{s1}, \texttt{GO}(\texttt{iw}, \texttt{w1})) \wedge \texttt{AUS}(\texttt{w1}, \texttt{pe1})$$

Die Konstante pe1 repräsentiert in dieser Formel das Haus.

Aus dieser Bewegungsaussage können keine Aussagen über die Sicht des imaginären Wanderers abgeleitet werden, da nur die direktionale Präposition „aus“ verwendet wird.

(3) und gehen unter der Unterführung durch

$$\texttt{OCCURS-ON}(\texttt{s3}, \texttt{GO}(\texttt{iw}, \texttt{w3})) \wedge \texttt{UNTER-DURCH}(\texttt{w3}, \texttt{pe3}, \texttt{rs3})$$

Dabei bezeichnet pe3 die Unterführung.

Aus dem Theorem (T4.2.12) folgt, dass der imaginäre Wanderer zum Startzeitpunkt die Unterführung sehen kann:

$$\texttt{INIT}(\texttt{s3}, \texttt{VIEW}(\texttt{iw}, \texttt{pe3}))$$

(4) nach rechts den großen Baum links liegenlassen

$$\texttt{OCCURS-ON}(\texttt{s4}, \texttt{GO}(\texttt{iw}, \texttt{w4})) \wedge \texttt{LINKS-ENTLANG}(\texttt{w4}, \texttt{pe4}, \texttt{rs4})$$

In dieser Formel repräsentiert die Konstante pe4 den großen Baum. Der Ausdruck „nach rechts“ kann nicht durch die in dieser Arbeit verwendete Repräsentation von direktionalen Präpositionen abgebildet werden (siehe Abschnitt 1.4). Deshalb wird er nicht in die Repräsentation aufgenommen.

Gemäß Theorem (T4.2.14) gilt, dass der imaginäre Wanderer den Baum während der gesamten Situation sehen kann:

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s4}, \texttt{VIEW}(\texttt{iw}, \texttt{pe4}))$$

(5) sie stehen auf dem Vorplatz zu Haus D

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s5}, \texttt{AUF}(\texttt{iw}, \texttt{pe5}))$$

Die Konstante pe5 verweist auf den Vorplatz.

Hier gilt auch für den Vorplatz, dass ihn der imaginäre Wanderer während der gesamten Situation sehen kann. Diese Aussage folgt aus Theorem (T4.2.7).

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s5}, \texttt{VIEW}(\texttt{iw}, \texttt{pe5}))$$

(6) und sie gehen auf dem gepflasterten Weg über die Wiese

$$\texttt{OCCURS-ON}(\texttt{s6}, \texttt{GO}(\texttt{iw}, \texttt{w6})) \wedge \texttt{ÜBER}(\texttt{w6}, \texttt{pe6}, \texttt{rs6})$$

Die Konstante pe6 bezeichnet die Wiese. Die Aussage „Auf dem gepflasterten Weg“ wurde von dem Parser nicht an das Bewegungsverb gebunden.

Aus Theorem (T4.2.12) folgt, dass der imaginäre Wanderer die Wiese zum Startzeitpunkt sehen kann:

$$\texttt{INIT}(\texttt{s6}, \texttt{VIEW}(\texttt{iw}, \texttt{pe6}))$$

(7) am Ende des Weges über die Wiese wieder nach rechts gehen

$$\texttt{OCCURS-ON}(\texttt{s7}, \texttt{GO}(\texttt{iw}, \texttt{w7}))$$

Der Ausdruck „nach rechts“ wird in der Repräsentation der Bewegungsaussage wieder ignoriert (siehe (4)). Damit können aus dieser Aussage keine weiteren Schlüsse für die Sicht gezogen werden.

(8+10) und sie stehen ... am Eingang der Mensa

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s8}, \texttt{AN}(\texttt{iw}, \texttt{pe8}))$$

Der Eingang wird hier durch die Konstante `pe8` repräsentiert.

Es kann inferiert werden, dass während der gesamten Situation eine Sichtlinie vom imaginären Wanderer zu dem Eingang existiert (siehe Theorem T4.2.5).

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s8}, \texttt{LOS}(\texttt{iw}, \texttt{pe8}))$$

(9) sobald sie einen Aschenbecher vor der Tür sehen

$$\begin{aligned} \forall f \in \texttt{for}\ [\texttt{HOLDS-IN}(\texttt{s9}, \texttt{FOR}(f, \texttt{iw})) \Rightarrow \\ \exists w \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(f, w, \texttt{pe41})]] \wedge \\ \texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s9}, \texttt{VOR}(\texttt{pe41}, \texttt{pe42}, \texttt{rs4})) \end{aligned}$$

In dieser Formel bezeichnen die Konstanten `pe41` den Aschenbecher und `pe42` die Türe.

Aus den Theoremen für die Sicht kann keine weitere Aussage über die Sicht gefolgert werden, obwohl man erwarten würde, dass der imaginäre Wanderer auch die Türe sehen kann.

(11) die Mensa befindet sich im ersten OG des Gebäudes B

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s10}, \texttt{IN}(\texttt{pe111}, \texttt{pe112}))$$

Dabei verweist `pe111` auf die Mensa und `pe112` auf das Obergeschoss. Da beide Objekte dieser Positionierungsaussage immobil sind, können auch hier keine weiteren Schlüsse für die Sicht gemacht werden.

6.1.4 Routenbeschreibung eg5

In dieser Routenbeschreibung wird untersucht, was die einzelnen Teilsätze über die Enthaltensein-Position des imaginären Wanderers und anderer Entitäten aussagen.

Die Routenbeschreibung beschreibt den Weg von der Bibliothek, die sich in Haus A befindet, zu Haus R. Die einzelnen Teilsätze lauten folgendermaßen:

1. Wenn sie die Bibliothek verlassen
2. gehen sie bitte zum Ausgang.
3. von dort aus können sie rechts schon das Haus F erkennen.
4. Sie wenden sich in Richtung Haus F

5. und gehen unter der Unterführung durch bis zum Ende des Hauses F.
6. Dort befindet sich eine Rampe
7. und daneben ist ein Eingang.
8. Sie gehen in das Haus F hinein
9. und wenden sich gleich hinter der Feuertür nach links.
10. Das Treppenhaus lassen sie rechts liegen
11. und den Fahrstuhl ignorieren sie.
12. Am Ende des Ganges in Haus F befindet sich im Halb-souterrain das Haus R.
13. Ausgeschildert sind der AB KOGS und LKI.
14. Wenn es regnet
15. können sie auch durch das EG im Haus F hindurchgehen.

Es wurden, um den Parser des Projektes verwenden zu können, folgende Änderungen an der Original-Routenbeschreibung (siehe Anhang) vorgenommen: In Teilsatz (5) lautet es im Original statt „und gehen“ „gehen aber“. Außerdem wurde in Teilsatz (15) vor „hindurchgehen“ das Wort „ganz“ gestrichen. Ergänzend zu bemerken ist, dass in Teilsatz (5) mit der Unterführung wohl eine Überführung gemeint ist, da erwähnt wird, dass man darunter durchgehen solle.

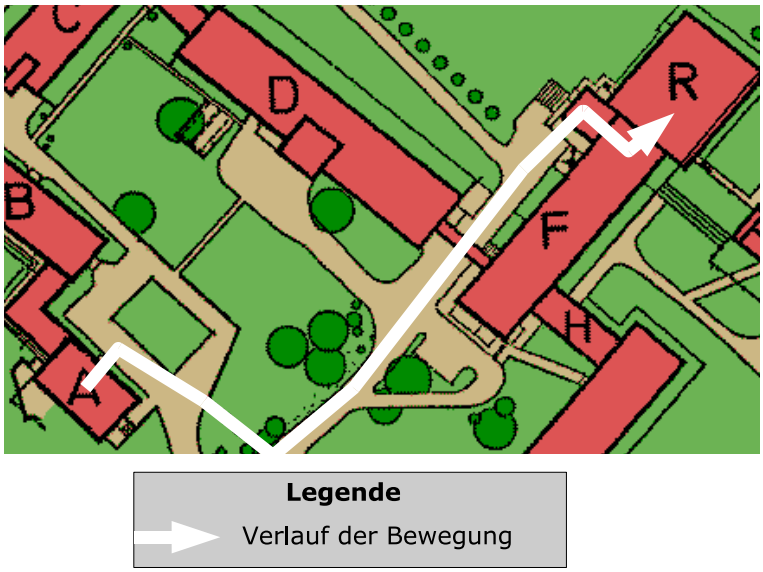

Abbildung 6.3: Routenbeschreibung eg5

(1) Wenn sie die Bibliothek verlassen

$$\texttt{OCCURS-ON}(\texttt{s1}, \texttt{GO}(\texttt{iw}, \texttt{w1})) \wedge \texttt{AUS}(\texttt{w1}, \texttt{pe1})$$

In dieser Formel steht `pe1` für die Bibliothek. Die Sorte von `pe1` ist aus diesem Satz nicht eindeutig bestimmbar (siehe Abschnitt 4.1.3). Es soll angenommen werden, dass es sich hierbei um ein Gebäude (Sorte `building`), ein Teilhaus (`housepart`) oder einen Zimmerkomplex (Sorte `roomcomplex`) handelt.

Aus Theorem (T4.3.13) folgt, dass es einen stark begrenzten Container `c1` gibt, in dem die Bibliothek enthalten ist, der Endpunkt der Bewegung jedoch nicht.

$$\exists c \in \texttt{sbc}\ [c = \texttt{c1}] \wedge \texttt{CNTD}(\texttt{pe1}, \texttt{c1}) \wedge \neg\, \texttt{CNTD}(\texttt{FPT}(\texttt{w1}), \texttt{c1})$$

Da in der Bewegungsaussage keine der direktionalen Präpositionen „in“ und „durch“ erwähnt wird, folgt aus Axiom (A4.1.12), dass durch den Bewegungsverlauf kein anderer stark begrenzter Container betreten wird. Dadurch ist die Bibliothek in jedem stark begrenzten Container enthalten, in dem auch der Endpunkt der Bewegung enthalten ist.

$$\texttt{MIN-CP}(\texttt{pe1}, \texttt{FPT}(\texttt{w1}))$$

(2) Gehen Sie bitte zum Ausgang

$$\texttt{OCCURS-ON}(s2, \texttt{GO}(iw, w2)) \wedge \texttt{ZU}(w2, \texttt{pe2})$$

Die Konstante `pe2` repräsentiert den Ausgang (Sorte `exit`).

Aus Theorem (T4.2.12) lässt sich ableiten, dass vom Startpunkt des Pfades `w2` eine Sichtlinie zum Ausgang `pe2` verläuft, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet. Aus dem Theorem (T4.3.9) folgt, dass der Startpunkt der Sichtlinie in mindestens den stark begrenzten Containern enthalten ist, in deren Grenze sich der Ausgang befindet. Da Ausgänge immer in einem stark begrenzten Container enthalten sind (siehe Axiom (A4.3.11)), befindet sich damit auch der Startpunkt der Bewegung in einem stark begrenzten Container. Dieser Container soll mit `c2` bezeichnet werden:

$$\exists c \in \texttt{sbc}\ [c = \texttt{c2}] \wedge \texttt{CNTD}(\texttt{pe2}, \texttt{c2}) \wedge \texttt{CNTD}(\texttt{STPT}(\texttt{w2}), \texttt{c2})$$

Wenn man dann annimmt, dass der Endpunkt des Pfades `w1` derselbe Punkt wie der Startpunkt von `w2` ist, so folgt, dass die Bibliothek sowohl in `c1` als auch in `c2` enthalten ist, wobei diese verschieden sind. Damit kann `pe1` kein Gebäude sein, da ein Gebäude nur in sich selbst als stark begrenztem Container enthalten ist. Es kann sich bei `pe1` auch um kein Teilhaus handeln, da Teilhäuser auch nur in einem stark begrenzten Container enthalten sind. `pe1` muss also ein Zimmerkomplex sein, da ein solcher in einem Gebäude und in sich selbst als stark begrenzte Container enthalten ist.

$$\texttt{FPT}(\texttt{w1}) = \texttt{STPT}(\texttt{w2}) \Rightarrow \neg(\texttt{c1} = \texttt{c2}) \wedge \texttt{CNTD}(\texttt{c1}, \texttt{c2}) \wedge \texttt{pe1} \in \texttt{roomcomplex}$$

Da in der Bewegungsaussage keine direktionale Präposition verwendet wird, folgt aus den Axiomen von stark begrenzten Containern, dass sich der imaginäre Wanderer während der gesamten Situation in denselben stark begrenzten Containern befindet wie der Ausgang.

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s2}, \texttt{EQUAL-CP}(\texttt{iw}, \texttt{pe2}))$$

(3) von dort aus können sie rechts schon das Haus F erkennen

$$\forall f \in \texttt{for}\ [\texttt{HOLDS-IN}(\texttt{s3}, \texttt{FOR}(f, \texttt{iw})) \Rightarrow \\ \exists w \in \texttt{path}\ [\texttt{VIEW}(f, w, \texttt{pe3}) \wedge \texttt{VON}(w, \texttt{pe31})]] \wedge \\ \texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s3}, \texttt{RECHTS}(\texttt{pe32}, \texttt{iw}, \texttt{rs3}))$$

Durch `p31` wird auf diejenige Entität verwiesen, bei der sich die Region befindet, auf die mit „dort“ verwiesen wird, vermutlich der in (2) erwähnte Ausgang. Die Konstante `pe32` bezeichnet das Haus F (Sorte `housepart`).

Da in der Sichtaussage keine direktionalen Präpositionen gebraucht werden, überschreitet keine der Sichtlinien die Grenze eines stark begrenzten Containers. Da es sich bei `pe3` um eine nicht grenzüberschreitende Entität handelt, folgt aus Theorem (T4.3.2), dass sich Haus F zu jedem Zeitpunkt der Situation in mindestens den stark begrenzten Containern befinden muss, in denen sich auch der imaginäre Wanderer befindet.

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s3}, \texttt{MIN-CP}(\texttt{pe31}, \texttt{iw}))$$

In der Realität ist es so, dass sich Haus F nicht in dem Gebäude befindet, in dem sich auch die Bibliothek befindet. Der imaginäre Wanderer muss sich also implizit zwischen den Situationen `s2` und `s3` durch den Ausgang bewegt haben. Dies ist aber durch die in dieser Arbeit vorgestellten Axiome nicht ableitbar.

(4) und gehen unter der Unterführung durch bis zum Ende des Hauses F

$$\texttt{OCCURS-ON}(\texttt{s4}, \texttt{GO}(\texttt{iw}, \texttt{w4})) \wedge \\ \texttt{UNTER-DURCH}(\texttt{w4}, \texttt{pe41}, \texttt{rs4}) \wedge \texttt{ZU}(\texttt{w4}, \texttt{pe42})$$

Die Konstante `pe41` repräsentiert die Unterführung (Sorte `not-cntd`) und `pe42` das „Ende“ von Haus F (Sorte `track-configuration`).

Aus Theorem (T4.2.12) folgt, dass vom Startpunkt der Bewegung aus eine Sichtlinie zu der Unterführung existiert, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet. Da eine Unterführung zur Sorte `not-cntd` und damit auch zur Sorte `inner-entity` gehört, ist der Startpunkt der Bewegung in denselben stark begrenzten Containern wie die Unterführung selbst enthalten. Da die Unterführung aber in keinem stark begrenzten Container enthalten ist, ist es damit auch der Startpunkt nicht. Da in der Bewegungsaussage keine direktionalen Präpositionen erwähnt werden, überschreitet der Pfad `w4` keine Grenze eines stark begrenzten Containers. Somit ist der imaginäre Wanderer während der gesamten Situation in keinem stark begrenzten Container enthalten. Für `pe42` können aus den gegebenen Theoremen keine Aussagen über die Enthaltensein-Position gemacht werden.

$$\forall p \in \texttt{position}\ [\texttt{HOLDS-IN}(\texttt{s4}, \texttt{BE-AT}(\texttt{iw}, p)) \Rightarrow \forall c \in \texttt{sbc}\ [\neg\, \texttt{CNTD}(p, c)]]$$

(6) dort befindet sich eine Rampe

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s5}, \texttt{BEI}(\texttt{pe61}, \texttt{pe62}))$$

In dieser Formel stehen die Konstanten `p61` für die Rampe (Sorte `inner-entity`) und `pe62` für diejenige Entität, auf deren proximale Außenregion mit „dort“ Bezug genommen wird. Vermutlich ist damit das Ende des Hauses F gemeint.

Da in dieser Aussage der imaginäre Wanderer nicht beteiligt ist, können keine Schlüsse für die Enthaltensein-Position durchgeführt werden.

(7) und daneben ist ein Eingang

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s6}, \texttt{BEI}(\texttt{pe71}, \texttt{pe72}))$$

Die Konstante `pe72` bezeichnet die Entität, auf die mit „daneben“ verwiesen wird (vermutlich die Rampe aus (6)). Durch `pe71` wird der Eingang (Sorte `entrance`) repräsentiert.

In dieser Aussage wird der imaginäre Wanderer ebenfalls nicht erwähnt. Deshalb können auch hier keine Theoreme herangezogen werden, um Folgerungen für die Enthaltensein-Position abzuleiten.

(8) sie gehen in das Haus F hinein

$$\texttt{OCCURS-ON}(\texttt{s8}, \texttt{GO}(\texttt{iw}, \texttt{w8})) \wedge \texttt{IN}(\texttt{w8}, \texttt{pe8})$$

Haus F wird durch die Konstante `pe8` bezeichnet (Sorte `housepart`).

Aus Theorem (T4.3.12) folgt, dass der Endpunkt der Bewegung und `pe8` beide in einem stark begrenzten Container enthalten sein müssen, in dem der Startpunkt nicht enthalten ist. Da in der Bewegungsaussage weder die Präposition „durch“ noch die Präposition „aus“ verwendet wird, folgt aus Theorem (A4.1.13), dass der Bewegungsverlauf keinen stark begrenzten Container verlässt.

$$\exists c \in \texttt{sbc}\ [\texttt{CNTD}(\texttt{pe8}, c) \wedge \texttt{CNTD}(\texttt{FPT}(\texttt{w8}), c) \wedge \neg\, \texttt{CNTD}(\texttt{STPT}(\texttt{w8}), c)] \wedge$$
$$\texttt{MIN-CP}(\texttt{FPT}(\texttt{w8}), \texttt{STPT}(\texttt{w8}))$$

(10) das Treppenhaus lassen sie rechts liegen

$$\texttt{OCCURS-ON}(\texttt{s10}, \texttt{GO}(\texttt{iw}, \texttt{w10})) \wedge \texttt{RECHTS-ENTLANG}(\texttt{w10}, \texttt{pe10}, \texttt{rf10})$$

In dieser Formel steht die Konstante `pe10` für das Treppenhaus (Sorte `inner-entity`). Die Tatsache, dass in der Formel die Repräsentation der direktionalen Präposition „entlang“ verwendet wird, beruht auf dem Ergebnis des Parsers.

Aus Theorem (T4.2.14) folgt, dass während der gesamten Situation eine Sichtlinie vom imaginären Wanderer zu dem Treppenhaus existiert, die keine Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet. Da von dem Treppenhaus angenommen wurde, dass es sich dabei um eine innere Entität handelt, ist der imaginäre Wanderer während der gesamten Situation in denselben stark begrenzten Containern enthalten wie das Treppenhaus:

$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s10}, \texttt{EQUAL-CP}(\texttt{iw}, \texttt{pe10})$$

(15) können sie auch durch das EG im Haus F hindurchgehen

$$\texttt{OCCURS-ON}(\texttt{s15}, \texttt{GO}(\texttt{iw}, \texttt{w15})) \wedge \texttt{DURCH}(\texttt{w15}, \texttt{pe151}) \wedge$$
$$\texttt{HOLDS-ON}(\texttt{s15}, \texttt{IN}(\texttt{pe151}, \texttt{pe152}))$$

Dabei bezeichnen die Konstanten `pe151` das EG (Sorte `housepart`) und `pe152` das Haus F (Sorte `housepart`).

Mit diesem Satz ist gemeint, dass man nicht erst an der Seite von Haus F entlang geht, sondern an der schmalen Seite von Haus F den Eingang benutzt und dann durch

Haus F hindurchgeht (siehe Abbildung 6.3). Die Bewegung führt damit in einen stark begrenzten Container hinein und verlässt ihn nicht wieder. Diese Aussage kann nicht aus den Theoremen dieser Arbeit abgeleitet werden, diese stehen jedoch auch nicht im Widerspruch dazu.

Die Lokalisierung in dieser Aussage setzt zwei immobile Entitäten (das EG und Haus F) zueinander in Beziehung. Daraus lassen sich mit den vorgestellten Theoremen keine weiteren Schlüsse ziehen.

6.2 Diskussion

Die Untersuchungen in dieser Arbeit zur Bestimmung der Position und Sicht des imaginären Wanderers beschreiben nur einen Teil der Schlüsse, die ein menschlicher Leser aus Routenbeschreibungen zieht. Sie besitzen jedoch die Eigenschaft, dass sie lokal bezüglich einzelner Teilsätze Aussagen machen können, ohne dass es nötig ist, die Teilsätze im Kontext zu betrachten. Außerdem basieren die Theoreme dieser Arbeit hauptsächlich auf der Verwendung von lokalen und direktionalen Präpositionen. Es ist also kein detailliertes Weltwissen über die einzelnen, in den Routenbeschreibungen erwähnten, Entitäten notwendig.

Mit den Axiomatisierungen von lokalen und direktionalen Präpositionen wird kein Anspruch auf Allgemeingültigkeit erhoben, sondern sie beziehen sich auf die spezielle Domäne von Routenbeschreibungen. Wenn diese Axiomatisierung beispielsweise auf einen allgemeinen räumlichen Diskurs, der die Karte eines Geländes beschreibt, angewendet würde, könnte es leicht sein, dass die hier vorgestellten Schlüsse nicht mit der Realität übereinstimmten. In diesem Fall liegt das daran, dass nicht mehr die Routenperspektive, sondern die Überblicksperspektive zur Beschreibung verwendet würde.

Bei der Auswertung von Routenbeschreibungen ist aufgefallen, dass die vorgestellten Schlüsse für Position und Sicht von einem bestimmten Mindest-Detailgrad in den Beschreibungen ausgehen: In den Teilsätzen eg5:14+15 („Wenn es regnet, können sie auch durch das EG im Haus F hindurchgehen“) wird eine alternative Route beschrieben. Diese basiert auf den Informationen, die vorher schon gegeben wurden. Deshalb besitzt die Beschreibung einen relativ niedrigen Detailgrad. Ein anderes Beispiel ist der Teilsatz lt12:1 („Um von der Pförtnerloge zu Haus E zu gelangen“). An der Konstruktion „um ... zu“ ist erkennbar, dass dieser die gesamte Routenbeschreibung in einer Bewegungsaussage zusammenfasst. Auch daraus ergibt sich ein niedriger Detailgrad. In diesem Fall folgt aus den Theoremen, dass vom Startpunkt aus Haus E sichtbar sein müsste, was aber in der Realität nicht stimmt.

Schließlich sollte beachtet werden, dass die Beobachtungen dieser Arbeit nur auf einer kleinen Menge von Routenbeschreibungen basieren und alle dieselbe Umgebung verwenden. Es bleibt zu überprüfen, ob die Ergebnisse dieser Arbeit auch für andere Routenbeschreibungen und andere Umgebungen gelten.

Im Folgenden wird betrachtet, welchen Beitrag die Ergebnisse dieser Arbeit zur Bestimmung von Position und Sicht des imaginären Wanderers leisten können.

6.2.1 Bestimmung der Sicht des imaginären Wanderers

In dieser Arbeit wurde nur ein Teil der möglichen Sätze untersucht, die ein Verb des Sehens enthalten. Allerdings konnten durch die hier vorgestellten Sichtaussagen alle

Teilsätze, die in den vorliegenden Routenbeschreibungen vorkommen und ein Verb des Sehens enthalten, analysiert werden.

Die hier beschriebenen Schlussfolgerungen, die in Bewegungsaussagen für die Sicht des imaginären Wanderers gemacht werden können, beziehen sich meist nur auf den Startzeitpunkt der Bewegung. Diese Einschränkung wurde gemacht, da die Sicht zu Referenzobjekten während einer Bewegung durch kleinere Gegenstände, wie Bäume oder ähnliches, für kurze Zeit unterbrochen werden kann (siehe dazu auch Abbildung 4.3). Für jemanden, der die Bewegung ausführen soll, ist die Sicht im Startpunkt jedoch sehr wichtig, da er dadurch den Bewegungsverlauf überblicken und sich eine mentale Karte davon machen kann. Auf diese Karte kann er dann zurückgreifen, wenn im Laufe der Bewegung keine Sicht mehr existiert.

Intuitiv scheint zu gelten, dass jede Landmarke, die in einer Routenbeschreibung erwähnt wird, auch irgendwann einmal während der Ausführung der Routenbeschreibung zu sehen ist, da sie sonst nicht erwähnt würde. In dem Beispiel eg4 (siehe Abschnitt 6.1.3) konnte für die folgenden Landmarken der Schluss gezogen werden, dass vom imaginären Wanderer mindestens einmal eine Sichtlinie zu ihnen existiert: „Unterführung“, „Baum“, „Vorplatz“, „Wiese“, „Eingang der Mensa“, „Aschenbecher“. Für die Entitäten, die als „Haus“, „Weg“, „Ende des Weges“, „Tür“, „Mensa“, „Gebäude B“ oder „OG“ bezeichnet wurden, konnte keine Sichtlinie gefolgert werden, die vom imaginären Wanderer zu ihnen führt. Bei der Entität, die als „gepflasterter Weg“ beschrieben wird, lag dies an dem verwendeten Parser. Bei den Entitäten „Tür“, „Mensa“, „OG“ und „Gebäude B“ war der Grund, dass sie entweder nur in Verbindung mit einem Possessivpronomen (z.B. „im ersten OG des Gebäudes B“) oder nur innerhalb einer Positionierungsaussage, in der nur immobile Entitäten in Relation zueinander gesetzt werden (z.B. „Die Mensa befindet sich im ersten OG“), verwendet wurden.

6.2.2 Bestimmung der Position des imaginären Wanderers

Die Bestimmung der Position des imaginären Wanderers kann zunächst durch die Analyse von Positionierungs- und Bewegungsaussagen erfolgen. Dies wurde in dieser Arbeit gemacht. In den vorliegenden Routenbeschreibungen wird jedoch auch oft, um eine Bewegung des imaginären Wanderers zu beschreiben, statt einer Bewegungsaussage der Verlauf eines Weges näher beschrieben („Die Straße führt unter einer Überführung zweier Häuser durch“, lt9:4). Diese Art der Bewegung des imaginären Wanderers wurde hier nicht untersucht.

Um Schlüsse für die Enthaltensein-Position und die Sicht des imaginären Wanderers aus einem Teilsatz auf einen anderen übertragen zu können, ist es notwendig, die Positionen und Bewegungsverläufe des imaginären Wanderers in den einzelnen Teilsätzen einer Routenbeschreibung in eine Gesamtroute einzuordnen. Dazu gehört die Identifikation der Positionen und Bewegungsverläufen und die Verbindung des Endpunktes eines Bewegungsverlaufes mit dem Anfangspunkt eines anderen Bewegungsverlaufes. Außerdem wird in manchen Routenbeschreibungen implizit von Bewegungen ausgegangen, die durch keinen Teilsatz repräsentiert werden: In den Teilsätzen „gehen sie bitte zum Ausgang. Von dort aus können sie rechts schon das Haus F erkennen“ (eg5:2+3) geht der Auskunftgebende implizit davon aus, dass der imaginäre Wanderer durch den Ausgang geht, bevor er Haus F erkennen kann. Diese Festlegung der Gesamtroute wurde in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

Außerdem wurde der besondere Aspekt der Enthaltensein-Position bei der Bestimmung der Position des imaginären Wanderers betrachtet, wobei als mögliche Container nur stark begrenzte Container berücksichtigt wurden. Man könnte auch das Enthaltensein des imaginären Wanderers in beliebigen Containern analysieren. Dazu bedarf es jedoch speziellen Wissens über die einzelnen Container und ihre Öffnungen, durch die man sie betreten oder verlassen kann.

Durch die hier vorgestellten Theoreme können zunächst Zusammenhänge zwischen der Enthaltensein-Position des imaginären Wanderers und derjenigen einer Landmarke bestimmt werden. Wenn in einem Teilsatz mehrere Landmarken erwähnt werden, oder die Zusammenhänge der Positionen und Bewegungsverläufe zweier Teilsätze bekannt sind, können auch Beziehungen zwischen der Enthaltensein-Position von Landmarken untereinander hergestellt werden. In Routenbeschreibung eg5 konnte dadurch für die Landmarke „Bibliothek“, die sowohl ein Gebäude als auch ein Zimmerkomplex sein kann, bestimmt werden, um was es sich in der Routenbeschreibung handelt (siehe Abschnitt 6.1.4).

6.3 Resümee und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Positionierungs-, Bewegungs- und Sichtaussagen in Routenbeschreibungen analysiert und eine geeignete Repräsentationssprache beschrieben.

Als ein Ergebnis wurde die Klasse der stark begrenzten Container identifiziert. Bei der weiteren Beschäftigung mit stark begrenzten Containern könnte es ein Ansatz sein, sie in der Weise zu interpretieren, dass stark begrenzte Container die Route in Bereiche aufteilen, von denen in jeder Art von Sätzen erkennbar ist, wenn ihre Grenze überschritten wird. Für Bewegungs- und Sichtaussagen wurde beschrieben, dass es erkennbar ist, wenn ein solcher Bereich von dem imaginären Wanderer betreten oder verlassen wird, weil explizit erwähnt wird, wenn der Bewegungsverlauf einer Bewegungsaussage oder eine Sichtlinie einer Sichtaussage die Grenze eines stark begrenzten Containers überschreitet. Ob eine solche Einteilung auch für andere Arten von Sätzen gilt, müsste noch untersucht werden. Diese Einteilung der Route in Bereiche könnte sich auch in der mentalen Repräsentation des Auskunftgebenden durch für jeden stark begrenzten Container getrennte mentale Karten widerspiegeln.

Die Motivation dieser Arbeit bestand darin, Routenbeschreibungen, schon bevor sie ausgeführt werden, bewerten zu können. Deshalb wurde untersucht, von welcher Position der Route aus der imaginäre Wanderer welche Landmarken sieht. Mit den Beobachtungen, die hier vorgestellt wurden, kann nicht für alle Landmarken in einer Routenbeschreibung bestimmt werden, von welchen Positionen aus sie sichtbar sind. Für einen Reorientierungspunkt kann also nicht sicher ausgesagt werden, wie viele Landmarken von dort aus sichtbar sind. Deshalb kann für eine bestimmten Reorientierungspunkt nicht gefolgert werden, dass dieser durch unzureichend viele Landmarken beschrieben wird, was ein wichtiges Indiz dafür wäre, dass die Routenbeschreibung schlecht ist.

Andererseits kann für bestimmte Routenbeschreibungen jedoch sehr wohl ausgesagt werden, dass ihre Reorientierungspunkte ausreichend durch Landmarken beschrieben sind: Wenn eine Routenbeschreibung nur aus Positionierungs-, Bewegungs- und Sichtaussagen besteht und aus jedem Teilsatz durch die vorgestellten Theoreme folgerbar ist, dass der imaginäre Wanderer mindestens eine Landmarke sehen kann, dann werden auch alle Reorientierungspunkte durch mindestens eine Land-

marke beschrieben. Dies kann als Indiz verwendet werden, um von einer solchen Routenbeschreibung auszusagen, dass sie gut ist.

Um bessere Aussagen über Position und Sicht des imaginären Wanderers machen zu können, ist es notwendig, an den Stellen, an denen in der Diskussion Grenzen dieser Arbeit aufgezeigt wurden, weitere Untersuchungen durchzuführen. Dazu gehört zunächst die Betrachtung von weiteren Details in Bewegungs-, Positionierungs- und Sichtaussagen, wie beispielsweise die Bedeutung der Verwendung von Possessivpronomen für Position und Sicht. Außerdem müssen dazu weitere Satzarten untersucht werden, zum Beispiel die Beschreibungen von Wegen. Schließlich ist es notwendig, die Positionen und Bewegungen des imaginären Wanderers in den einzelnen Teilsätzen in Zusammenhang zueinander zu bringen, indem sie in eine Gesamtroute eingeordnet werden.

Insgesamt konnten in dieser Arbeit neue Erkenntnisse für die Sicht in Positionierungs-, Bewegungs- und Sichtaussagen und zur Enthaltensein-Position geliefert werden, die in die weitere Forschungsarbeit zum Thema Routenbeschreibungen miteinfließen können.

Anhang A

Routenbeschreibungen

Routenbeschreibung lt8

1. Wenn du beim Pförtner stehst
2. dann siehst du das höchste Gebäude auf dem Gelände Haus F.
3. Von Haus F führt im ersten Stock ein Übergang zu Haus D.
4. Gehe zuallererst zwischen Haus D und Haus F unter dem Übergang durch.
5. Auf der Rückseite von Haus D gehst du entlang,
6. bis auf deiner rechten Seite Haus E erscheint.
7. Haus E betrittst du über eine Rampe.

Routenbeschreibung lt9

1. Vom Pförtnerhaus startend
2. die Straße im wesentlichen geradeaus gehen
3. und alle Abzweigungen ignorieren.
4. Die Straße führt unter einer Überführung zweier Häuser durch,
5. die bereits vom Pförtnerhaus sichtbar ist.
6. Hinter der Überführung nach links abbiegen
7. und der Straße folgen,
8. an deren rechtem Ende sich ein Haus befindet,
9. welches Haus E ist

Routenbeschreibung lt10

1. Vom Pförtner gehst du geradeaus.
2. Du kommst zwischen zwei Gebäuden durch,
3. die durch eine Brücke verbunden sind.
4. Dann gehst du bei der nächsten Gelegenheit links
5. und siehst als erstes Gebäude rechts Haus E

Routenbeschreibung lt11

1. Von dem Pförtnerhäuschen aus gehst du weiter geradeaus in Richtung dem 6-stöckigen Haus F.
2. An dem Haus F angekommen
3. folgst du der Straße
4. und gehst entlang von Haus F,
5. bis die Straße eine Linksbiegung macht.
6. Du folgst dieser Linksbiegung
7. und gehst die Straße bis zum Ende,
8. wo dann auf der rechten Seite das Haus E liegt

Routenbeschreibung lt12

1. Um von der Pförtnerloge zu Haus E zu gelangen,
2. folgt man dem gepflasterten Weg,
3. der rechts an den drei großen Bäumen vorbei auf eine Brücke zwischen zwei Häusern zuläuft.
4. Man geht unter der Brücke hindurch
5. (also zwischen Haus D und F)
6. und biegt auf den Weg nach links ein,
7. der vor dem gesuchten Haus E endet.

Routenbeschreibung lt13

1. Wenn du vor dem Eingang der Mensa stehst,
2. ist das nächstgelegene Gebäude Haus C,
3. dessen Eingang sich direkt an der Stirnseite befindet.
4. Gehe links zwischen Haus C und dem Zaun entlang,
5. bis du hinter Haus C auf Haus E triffst.

Routenbeschreibung lt14

1. Am Ausgang der Mensa liegt schräg rechts ein Eingang zum Haus C.
2. Wenn du durch diesen Eingang gehst,
3. folgst du den langen Flur bis zum Ende.
4. Aus dem Fenster ist dann schon Haus E zu sehen.
5. Zu deiner linken befindet sich eine Tür,
6. die dich wieder aus dem Haus bringt.
7. Nun musst du nur noch die Straße,
8. auf deren anderen Seite Haus E liegt,
9. überqueren

Routenbeschreibung lt15

1. Um von der Mensa zum Haus E zu gelangen,
2. hält man sich nach dem Verlassen der Mensa links
3. und geht auf die geschlossene Pforte zu.
4. Auf diesem Weg trifft man auf eine Abzweigung eines kleinen Weges nach rechts,
5. der zwischen Zaun und Haus entlangführt.
6. Dieser Weg mündet hinter dem Haus auf einem gepflasterten Platz,
7. von dem man mit einer Treppe in Haus E gelangt

Routenbeschreibung lt16

1. Wenn du aus der Mensa kommst,
2. geh nach links zwischen Haus B und Haus C durch.
3. Geh hinter Haus C lang,
4. und geh dann,
5. wenn du an Haus C vorbei gegangen bist,
6. wieder nach rechts.
7. Dann stehst du vor Haus E.

Routenbeschreibung lt17

1. Vom Ausgang der Mensa nimmst du einen kleinen etwas nach links versetzten Fußweg,
2. der auf eine Tür zuführt.
3. Dort gehst du hinein
4. und gehst direkt geradeaus aus dem Gebäude wieder hinaus
5. (einmal quer über den Flur).
6. Du stehst nun vor Haus E

Routenbeschreibung lt18

1. Von der Mensa aus gleich nach links wenden
2. und dem Weg bis zu dem ersten sichtbaren Haus folgen.
3. Dann links an dem Haus vorbei gehen.
4. Der Weg biegt dann hinter dem Haus automatisch nach rechts ab.
5. Diesem Weg folgen,
6. bis man auf ein neues Haus stößt.
7. Dies ist Haus E.

Routenbeschreibung lt19

1. Wenn du aus der Mensa kommst,
2. geh nach links in Richtung auf den Eingang von Haus C.
3. Geh daran vorbei
4. und geh dann hinter dem Haus nach rechts.
5. Geh an der Rückseite von Haus C lang
6. und geh am Ende wieder nach rechts.
7. Dann triffst du auf Haus E.

Routenbeschreibung lt20

1. Wenn du aus der Mensa kommst,
2. geh nach links in Richtung auf den Eingang von Haus C.
3. Geh daran vorbei
4. und geh dann hinter dem Haus nach rechts.

5. Geh an der Rückseite von Haus C lang.
6. Geh dann nicht geradeaus,
7. sondern geh nach rechts.
8. Dann triffst du auf Haus E.

Routenbeschreibung eg1

1. Du verlässt Haus R über die Treppe am Hintereingang von Haus F.
2. Du gehst an Haus F entlang Richtung Pförtner,
3. so als ob du das Gelände verlassen würdest.
4. Rechts von dir liegt erst mal Gebäude D,
5. dann kommen drei riesige Schwarzpappeln,
6. und erst dahinter biegst du rechts in einen Weg ein,
7. der dich über einen größeren Platz weiter geradeaus an Haus B entlang führt.
8. Du gehst dann links in das Gebäude hinein
9. und gehst ein Stockwerk hoch.
10. Da ist die Mensa.

Routenbeschreibung eg2

1. Du gehst am Pförtnerhäuschen vorbei geradeaus auf Haus F zu.
2. Geh dann aber links daran vorbei
3. bis der Weg endet
4. bzw. du auf eine Rampe zuläufst.
5. Daneben geht rechts eine Treppe hoch in Haus F.
6. Nimmst dann im Gebäude
7. (rechts ist das Treppenhaus)
8. eine Treppe nach unten.
9. Dann rechts durch die Glastür.
10. Links fängt dann Gebäude R an.

Routenbeschreibung eg3

1. Wenn du aus dem Hauptausgang des Haus E herauskommst,
2. kannst du das Pförtnerhaus in vielleicht hundert Meter Entfernung sehen.
3. Es geht unmittelbar nach dem Ausgang ein paar Stufen hinab
4. und du musst dich danach etwas rechts halten.
5. Wenn du dann einige Meter schräg nach rechts gegangen bist,
6. musst du nur noch geradeaus gehen.
7. Zu deiner rechten Seite sind die ganzen Gebäude des Informatikums,
8. die alle dreistöckig oder vielleicht maximal vierstöckig sind.
9. Links stehen auf dem Gelände des Informatikums keine weiteren Gebäude.
10. Es gibt lediglich eine Rasenfläche.
11. Geradeaus ist dagegen das flache Gebäude des Pförtners zu sehen.
12. Auf der Höhe des Pförtnerhauses ist außerdem eine Schranke,
13. die meist heruntergelassen ist.
14. Der Weg vom Haus E bis zum Pförtnerhaus ist mit grauen Steinen gepflastert.

Routenbeschreibung eg4

1. Wenn sie das Haus verlassen,
2. wenden sie sich bitte nach links
3. und gehen unter der Unterführung durch
4. nach rechts den großen Baum links liegenlassen.
5. Sie stehen auf dem Vorplatz zu Haus D
6. und sie gehen auf dem gepflasterten Weg über die Wiese.
7. Am Ende des Weges über die Wiese wieder nach rechts gehen
8. und sie stehen,
9. sobald sie einen Aschenbecher vor der Tür sehen,
10. am Eingang der Mensa.
11. Die Mensa befindet sich im ersten OG des Gebäudes B.

Routenbeschreibung eg5

1. Wenn sie die Bibliothek verlassen,
2. gehen sie bitte zum Ausgang.
3. Von dort aus können sie rechts schon das Haus F erkennen.
4. Sie wenden sich in Richtung Haus F
5. und gehen aber unter der Unterführung durch bis zum Ende des Hauses F.
6. Dort befindet sich eine Rampe
7. und daneben ist ein Eingang.
8. Sie gehen in das Haus F hinein
9. und wenden sich gleich hinter der Feuertür nach links.
10. Das Treppenhaus lassen sie rechts liegen
11. und den Fahrstuhl ignorieren sie.
12. Am Ende des Ganges in Hauses F befindet sich im Halb-Souterrain das Haus R,
13. ausgeschildert sind der AB KOGS und LKI.
14. Wenn es regnet
15. können sie auch durch das EG im Haus F ganz hindurchgehen.

Routenbeschreibung eg6

1. Wir befinden uns in Haus R.
2. Es gibt zwei mir bekannte Wege aus dem Gebäude heraus zu kommen.
3. Am besten geht man durch Haus F zu dessen Hauptzugang.
4. Von dort aus kann man die Mensa,
5. die sich in Haus B befindet,
6. ungefähr auf zwei Uhr sehen.
7. Man geht jetzt rechts an der Front von Haus D vorbei
8. und kurz vor den Mülltonnen in den kleinen Weg über die Wiese links.
9. Geh an dessen Ende rechts an der langen Seite von Haus B vorbei.
10. Ungefähr in der Mitte ist der Eingang zur mensa.

Routenbeschreibung eg7

1. Wenn man bei der Schranke an der Pförtnerloge steht
2. und auf den Campus blickt,
3. sieht man bei ziemlich genau zwölf Uhr das Haus F.
4. Das ist das höchste Haus auf dem Campus
5. und der Buchstabe steht dran.
6. Gehe in das Haus und gehe durch den Flur im Erdgeschoss,
7. in dem der Arbeitsbereich Technische Informatik Systeme residiert.
8. Der Flur mündet in einen Querflur ein.
9. Da beginnt das Haus R und die Räumlichkeiten des Arbeitsbereichs Kognitive Systeme und des Labors für künstliche Intelligenz.
10. Übrigens sind die Wege außerhalb der Gebäude auf den blauen Schildern verzeichnet.

Literaturverzeichnis

Allen (1984) Allen, J.F.: Towards a General Theory of Action and Time. In: *Artificial Intelligence* 23 (1984), S. 123–154

Casati und Varzi (1994) Casati, Roberto ; Varzi, Achille C.: *Holes and Other Superficialities*. The MIT Press, Cambridge, Massachussets, 1994

Daniel und Denis (1998) Daniel, Marie-Paule ; Denis, Michel: Spatial Descriptions as Navigational Aids: A Cognitive Analysis of Route Directions. In: *Kognitionswissenschaft* 7 (1998), S. 45–52

Denis (1997) Denis, Michel: The description of routes: A cognitive approach to the production of spatial discourse. In: *Cahiers de Psychologie Cognitive* 16 (1997), S. 145–174

Denis u. a. (1999) Denis, Michel ; Pazzaglia, Francesca ; Cornoldi, Cesaro ; Bertolo, Laura: Spatial Discourse and Navigation: An Analysis of Route Directions in the City of Venice. In: *Applied Cognitive Psychology* 13 (1999), S. 145–174

Eschenbach (1999a) Eschenbach, C.: A Predication Calculus for Qualitative Spatial Representations. In: Freksa, C. (Hrsg.) ; Mark, D.M. (Hrsg.): *Spatial information theory- Cognitive and computational foundations of geographic information science (COSIT '99)*. Berlin : Springer, 1999, S. 157–172

Eschenbach (1999b) Eschenbach, Carola: Geometric structures of frames of reference and natural language semantics. In: *Spatial Cognition and Computation* 1 (1999), S. 329–348

Eschenbach u. a. (1998) Eschenbach, C. ; Habel, C. ; Kulik, L. ; Lessmöllmann, A.: Shape Nounds and Shape Concepts: A Geometry for 'Corner'. In: Freksa, C. (Hrsg.) ; Habel, C. (Hrsg.) ; K.F.Wender (Hrsg.): *Spatial Cognition*. Berlin : Springer, 1998, S. 177–201

Eschenbach u. a. (1999) Eschenbach, C. ; Habel, C. ; Kulik, L.: Representing Simple Trajectories as Oriented Curves. In: Kumar, A.N. (Hrsg.) ; Russell, I. (Hrsg.): *Proceedings of the 12th International FLAIRS Conference*. Orlando, Florida : AAAI Press, 1999, S. 431–436

Eschenbach u. a. (2000) Eschenbach, C. ; Tschander ; L., C. ; Kulik, L.: Lexical Specifications of Paths. In: Freksa, C. (Hrsg.) ; Brauer, W. (Hrsg.) ; Habel, C. (Hrsg.) ; (Hrsg.) ; Wender, K.F. (Hrsg.): *Spatial Cognition II -*

Integrating Abstract Theories, Empirical Studies, Formal Methods, and Practical Applications. Berlin : Springer, 2000, S. 127–144

Evans und Tyler (to appear) Evans, Vyv ; Tyler, Andrea: Spatial Experience, Lexical Structure and Motivation: The Case of In. In: Radden, G. (Hrsg.) ; Uwe-Panther, K. (Hrsg.): *Motivation in Grammar*. Berlin : Mouton de Gruyter, to appear

Galton (1990) Galton, A.: A Critical Examination of Allen's Theory of Action and Time. In: *Artificial Intelligence* 42 (1990), S. 159–188

Habel und Eschenbach (1997) Habel, C. ; Eschenbach, C.: Abstract structures in spatial cognition. In: Freksa, C. (Hrsg.) ; Jantzen, M. (Hrsg.) ; Valk, R. (Hrsg.): *Foundations of computer Science. Potential – Theory – Cognition*. Berlin : Springer, 1997, S. 369–378

Habel u. a. (2000) Habel, Christopher ; Schmidtke, Hedda R. ; Tschander, Ladina ; Eschenbach, Carola: Change of orientation. In: Zee, E. van d. (Hrsg.) ; Slack, J. (Hrsg.): *Proceedings of the Workshop on Axes and Vectors in Language and Space*. Lincoln, UK : University of Lincolnshire and Humberside, 2000, S. 57–67

Herweg (1988) Herweg, Michael: Zur Semantik einiger lokaler Präpositionen des Deutschen / Universität Hamburg, Fachbereich Informatik. Vogt-Kölln-Straße 30, 22527 Hamburg, 1988 (LILOG-REPORT 21). – Forschungsbericht

Herweg (1991) Herweg, Michael: Temporale Konjunktionen und Aspekt. In: *Kognitionswissenschaft* 2 (1991), S. 51–90

Klein (1979) Klein, Wolfgang: Wegauskünfte. In: *Zeitschrift für Literaturwissenschaft und Linguistik* 3 (1979), S. 9–57

Michon und Denis (2001) Michon, Pierre-Emmanuel ; Denis, Michel: When and Why Are Visual Landmarks Used in Giving Directions? In: Montello, D.R. (Hrsg.): *Spatial Information Theory. Foundations of Geographic Information Science: International Conference, COSIT 2001*. Heidelberg : Springer, 2001, S. 292–305

Randell u. a. (1992) Randell, David A. ; Cui, Zhan ; Cohn, Anthony: A Spatial Logic Based on Regions and Connection. In: Nebel, Bernhard (Hrsg.) ; Rich, Charles (Hrsg.) ; Swartout, William (Hrsg.): *KR'92. Principles of Knowledge Representation and Reasoning: Proceedings of the Third International Conference*. San Mateo, California : Morgan Kaufmann, 1992, S. 165–176

Raubal und Winter (2002) Raubal, Martin ; Winter, Stephan: Enriching Wayfinding Instructions with Local Landmarks. In: *Geographic Information Science: Second International Conference, GIScience 2003, Boulder, CO, USA*. Heidelberg : Springer, September 2002, S. 243–259

Retz-Schmidt (1988) Retz-Schmidt, G.: Various Views on Spatial Prepositions. In: *AI Magazine* 9 (1988), Nr. 2, S. 95–105

Tschander u. a. (2003) Tschander, Ladina B. ; Schmidtke, Hedda R. ; Eschenbach, Carola ; Habel, Christopher ; Kulik, Lars: A geometric agent following route instructions. In: *Spatial Cognition III*. Berlin : Berlin: Springer, 2003, S. 89–111

Tversky (1993) Tversky, Barbare: Cognitive Maps, cognitive collages, and spatial mental models. In: Frank, A.U. (Hrsg.) ; Campari, I. (Hrsg.): *Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS, Proceedings COSIT'93*. Berlin : Springer, 1993, S. 14–24

Usoniene (2001) Usoniene, Aurelia: On direct/indirect perception with verbs of seeing and seeming in English and Lithuanian / Lund University, Dept. of Linguistics. Helgonabacken 12, 22362 Lund, Sweden, 2001 (Working Papers 48). – Forschungsbericht

Winter (2003) Winter, Stephan: Route Adaptive Selection of Salient Features. In: Kuhn, W. (Hrsg.) ; Worboys, M.F. (Hrsg.) ; Timpf, S. (Hrsg.): *Spatial Information Theory: Foundations of Geographic Information Science; International Conference, COSIT 2003*. Berlin : Springer, 2003, S. 349–361

Wunderlich und Herweg (1991) Wunderlich, D. ; Herweg, M.: Lokale und Direktionale. In: Stechow, A.v. (Hrsg.) ; Wunderlich, D. (Hrsg.): *Semantik*. Berlin : de Gruyter, 1991, S. 758–785

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorstehende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und mich anderer als der im beigefügten Verzeichnis angegebenen Hilfsmittel nicht bedient habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich bin mit einer Einstellung in den Bestand der Bibliothek des Fachbereiches einverstanden

Tobias Bosch