

Geographische Kommunikationsmechanismen auf Basis von feingranularen räumlichen Umgebungsmodellen

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und
Informationstechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der
Würde eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Frank Dieter Dürr

aus Esslingen am Neckar

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Kurt Rothermel
Mitberichter: Prof. Dr. phil. nat. Christian Becker
Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juni 2010

Institut für Parallele und Verteilte Systeme (IPVS)
der Universität Stuttgart
2010

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mich auf dem Weg zur Promotion begleitet und unterstützt und so wesentlich zum Gelingen dieses Vorhabens beigetragen haben.

Mein Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Prof. Dr. Kurt Rothermel für seine hervorragende Betreuung, die zahlreichen wertvollen Ratschläge und Anregungen und das entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit, diese Arbeit durchzuführen. Ferner möchte ich Prof. Dr. Christian Becker für seine Unterstützung und die wertvollen gemeinsamen Diskussionen und Vorschläge danken, die in die Ergebnisse dieser Arbeit eingeflossen sind.

Ich möchte auch allen Kollegen der Abteilung Verteilte System danken, von denen ich hier einige stellvertretend erwähnen will. Mein Dank gilt zunächst Herrn Dr. Ralph Lange, auf dessen Hilfe ich jederzeit zählen konnte, vor allem in den (nicht wenigen) Situationen, in denen die Zeit, die ich dieser Arbeit widmen konnte, knapp wurde. Des Weiteren möchte ich den Kollegen des Nexus-Projekts (Sonderforschungsbereich 627) meinen Dank aussprechen, insbesondere der „alten Nexus-Garde“, Dr. Martin Bauer, Dr. Susanne Bürklen, Dr. Dominique Dudkowski und Tobias Farrell, mit denen ich zusammen manche „Schlacht“ gefochten habe – man findet selten eine Gruppe, mit einem solchen Zusammenhalt und der Bereitschaft zur gegenseitigen Unterstützung. Erwähnen möchte ich außerdem die Mitarbeiter der zweiten Förderperiode des Nexus-Projekts, PD Dr. Wolfgang Blochinger, Lars Geiger, Stamatia Rizou und Harald Weinschrott sowie Faraz Memmon, Steffen Maier und Marius Wernke. Schließlich möchte ich Sabine Thielmann und Annemarie Roesler nennen, die mir bei den diversen formalen Abläufen eine große Hilfe waren.

Vor allem gilt mein herzlicher Dank aber auch meiner Familie: Meinem Vater Siegfried und meiner Mutter Ute, meiner Schwester Petra und meinem Schwager Thomas sowie meinen Neffen Marvin und Maximilian. Ohne deren Unterstützung und deren Verständnis für den chronischen Zeitmangel während dieser Arbeit wäre diese nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

Danksagungen	3
Abbildungsverzeichnis	7
Zusammenfassung	9
Abstract	11
1 Einleitung	25
1.1 Hintergrund und Motivation	26
1.1.1 Technologietrends	26
1.1.2 Geocast: Ein ortsbezogener Kommunikationsmechanismus	28
1.2 Ziele und Fragestellungen	30
1.3 Beiträge und Struktur der Arbeit	32
1.3.1 Hybrides Lokationsmodell	32
1.3.2 Symbolische Geocast-Vermittlungsverfahren	33
2 Lokationsmodelle und Adressierungskonzepte	39
2.1 Übersicht	39
2.2 Grundlagen und Verwandte Arbeiten	40
2.2.1 Klassifizierung von Lokationsmodellen	40
2.2.2 Verwandte Arbeiten	43
2.3 Anforderungen	48
2.3.1 Formalismen und Lokationsmodelldefinition	49
2.3.2 Definition der Empfängermenge	50
2.4 Basislokationsmodell	54
2.4.1 Geometrisches Lokationsmodell	54
2.4.2 Symbolisches Lokationsmodell	63
2.4.3 Hybride Adressierung	77
2.5 Erweitertes Lokationsmodell	80
2.5.1 Lokale Referenzsysteme	80
2.6 Koordinatentransformation	85
2.6.1 Mobile Zielgebiete	91
2.7 Zusammenfassung	95
3 Geocast-Vermittlungsverfahren	97

3.1	Übersicht	97
3.2	Grundlagen und verwandte Arbeiten	97
3.2.1	Einordnung in das OSI-Referenzmodell	98
3.2.2	Verwandte Arbeiten	99
3.3	Systemmodell und Anforderungen	117
3.3.1	Systemmodell	117
3.4	Anforderungen	121
3.5	Verzeichnisbasierte Ansätze	122
3.5.1	Unicast-basierte Vermittlung	122
3.5.2	Multicast-basierte Vermittlung	125
3.6	Vermittlung in vermaschten Overlay-Netzen	130
3.6.1	Basis-Overlay-Netz	132
3.6.2	Optimiertes Overlay-Netz	147
3.7	Vermittlung in verbandsbasierten Overlay-Netzen	170
3.8	Optimierte Vermittlung durch IP-Multicast-Verfahren	187
3.8.1	Optimierte Vermittlung	187
3.8.2	Etablierung der Verteilstruktur	189
3.9	Vermittlung an mobile Zielgebiete	190
3.9.1	Erweitertes Systemmodell	190
3.9.2	Stellvertretervermittlung	194
3.9.3	Vermittlung durch Geocast-in-Geocast-Tunnel	195
3.9.4	Mobile-Geocast-Vermittlung	197
3.10	Evaluierung	199
3.10.1	Vermaschte Geocast-Overlay-Netze	199
3.10.2	Verbandsbasierte Geocast-Overlay-Netze	227
3.10.3	Abschließende Bewertung	232
3.11	Zusammenfassung	233
4	Zusammenfassung und Ausblick	235
4.1	Zusammenfassung	235
4.2	Ausblick	238
Literaturverzeichnis		241

Abbildungsverzeichnis

1.1	Modellierungskonzepte (Übersicht)	34
1.2	Vermittlungsansätze (Übersicht)	36
1.3	Vermittlungsansätze für mobile Zielgebiete (Übersicht)	37
2.1	Lokationsmodellklassifizierung	42
2.2	RCC5, RCC8/4-Intersection-Model	52
2.3	2,5D Figur	60
2.4	Zellenbasiertes Modell aus disjunkten Lokationen	65
2.5	Zonenbasiertes Modell aus überlappenden und disjunkten Lokationen	66
2.6	Baumförmiges Lokationsmodell	67
2.7	Modellierungsbeispiel: Gebäude	69
2.8	RCC5-Modell des Beispielgebäudes	70
2.9	Mehrdeutiges RCC5-Modell	71
2.10	Verbandsbasiertes Lokationsmodell des Beispielgebäudes	74
2.11	Lokationsmodell mit Aufenthaltswahrscheinlichkeiten	76
2.12	Lokationstransformation mit hybrider Lokationsmodell	79
2.13	Geschachtelte lokale Lokationsmodelle	85
2.14	Koordinatentransformation zwischen lokalen Referenzsystemen	88
2.15	Indirekte Transformation zwischen symbolischen Systemen	89
3.1	Systemmodell	118
3.2	Verzeichnisbasierter Ansatz	124
3.3	Unicast- und Multicast-basierte Vermittlung	126
3.4	Vermittlung mit explizitem Multicast	129
3.5	Vermittlung mit eingeschränkter Xcast-Unterstützung	130
3.6	Virtuelle und physische Geocast-Router	134
3.7	Router-Hierarchie	135
3.8	Router-Beitritt	139
3.9	Router-Hierarchie nach Router-Ausfall	142
3.10	Hierarchische Nachrichtenvermittlung	145
3.11	Message-Server-Registrierung	147
3.12	Statische Direktverbindungen	151
3.13	Gewichtung einer Direktverbindung	157
3.14	Verlauf der Nützlichkeit einer Direktverbindung	159
3.15	Erkennung von Router-Fehlern	165

3.16	Invalidierung von Direktverbindungen	167
3.17	Vermittlung mit beschränktem Fan-Out	170
3.18	Router-Verband	172
3.19	Konfliktauflösung	175
3.20	Verbandsbasierte Nachrichtenvermittlung I	178
3.21	Verbandsbasierte Vermittlung II	181
3.22	Weiterleitung an Message-Server	182
3.23	Kompakte Darstellung der Verbandsstruktur	186
3.24	Optimierte Vermittlung mit SSM	191
3.25	Erweitertes Systemmodell	194
3.26	Geocast-in-Geocast-Tunnel	196
3.27	Mobile-Geocast-Vermittlung	198
3.28	IP-Netz der Simulation	201
3.29	Geographische ZielgebieteVerteilung	202
3.30	Dehnungsfaktor – kleine Zielgebiete	205
3.31	Dehnungsfaktor – große Zielgebiete	206
3.32	Zielgebietpopularität	209
3.33	Dehnungsfaktor – variable Puffergröße	211
3.34	Dehnungsfaktor – gleichverteilte Zielgebiete	212
3.35	Dehnungsfaktor – distanzunabhängige Adressierung & Hotspots I	213
3.36	Dehnungsfaktor – distanzunabhängige Adressierung & Hotspots II	213
3.37	Dehnungsfaktor – distanzabhängige Adressierung & Hotspots I	214
3.38	Dehnungsfaktor – distanzabhängige Adressierung & Hotspots II	215
3.39	Nachrichtenrate – Einrichtung Direktverbindung	216
3.40	Netzlast – gleichverteilte Zielgebiete	218
3.41	Netzlast – distanzunabhängige Adressierung & Hotspots I	219
3.42	Netzlast – distanzunabhängige Adressierung & Hotspots II	219
3.43	Netzlast – distanzabhängige Adressierung & Hotspots I	220
3.44	Netzlast – distanzabhängige Adressierung & Hotspots II	220
3.45	Netzlast – Router-Ausfall	222
3.46	Router-Last – Landes-Router; gleichverteilte Zielgebiete	224
3.47	Router-Last – Staaten-Router; gleichverteilte Zielgebiete	225
3.48	Router-Last – Landes-Router; distanzunabhängige Adressierung & Hotspots	225
3.49	Router-Last – Staaten-Router; distanzunabhängige Adressierung & Hotspots	226
3.50	Router-Last – Landes-Router; distanzabhängige Adressierung & Hotspots	226
3.51	Router-Last – Staaten-Router; distanzabhängige Adressierung & Hotspots	227
3.52	Dauer von Weiterleitungsentscheidungen	231

Zusammenfassung

Die immer weiter zunehmende Verbreitung von leistungsfähigen mobilen Kommunikationstechnologien und Positionierungssystemen ermöglicht die Realisierung neuartiger geographischer Kommunikationsmechanismen (kurz Geocast). Mit Hilfe von Geocast können Nachrichten an alle Endgeräte in einem bestimmten geographischen Zielgebiet gesendet werden, d.h. die Gruppe der Empfänger wird durch ihren geographischen Aufenthaltsort definiert. Die Anwendungen von Geocast sind vielfältig. So können mit Hilfe von Geocast zum Beispiel Stauinformationen gezielt an alle Fahrzeuge auf einem bestimmten Straßenabschnitt verteilt werden, Touristen können über Sehenswürdigkeiten in ihrer Umgebung informiert werden, oder es können Warnmeldungen oder ortsbezogene Werbeinformationen in bestimmten räumlichen Gebieten verteilt werden.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen Geocast-Verfahren, welche die feingranulare ortsbezogene Verteilung von Nachrichten erlauben. Die Hauptbeiträge dieser Arbeit sind zum einen ein feingranulares Lokationsmodell und Adressierungskonzept für Geocast, welche sowohl die Bestimmung und Adressierung von Lokationen durch geometrische Figuren als auch durch symbolische Bezeichner wie Raum- oder Stockwerksnummern ermöglichen. Die Hauptaufgaben des Modells sind neben der Definition der Zielgebiete von Nachrichten und der Empfängerpositionen der Vergleich von Zielgebieten und Empfängerpositionen zur Definition der Empfängermenge. Zum anderen werden skalierbare Geocast-Protokolle für die effiziente Verteilung von Nachrichten vorgeschlagen, welche die notwendige Skalierbarkeit sowohl für die Unterstützung einer großen Anzahl an Lokationen als auch großer Empfänger Mengen aufweisen.

Das vorgeschlagene Lokationsmodell verwendet ein hybrides Modellierungskonzept, das es ermöglicht, Lokationen sowohl mit symbolischen Bezeichnern als auch geometrischen Beschreibungen zu versehen. Geometrien können dabei sowohl durch zweidimensionale als 2,5-dimensional Figuren modelliert werden. Der symbolische Teil des Modells basiert auf einer Hierarchie von Lokationen entsprechend der räumlichen Inklusionsbeziehung. Zusätzlich werden strukturelle Regeln für den Aufbau der symbolischen Hierarchie eingeführt, die schließlich zu einem verbandsbasierten Modell führen, das im Gegensatz zu einfachen hierarchischen Modellen auch die Möglichkeit zur Definition überlappender Lokationen bietet. Ferner wird die Integration lokaler Lokationsmodelle unterstützt, welche gleichzeitig zur Definition mobiler Zielgebiete, z.B. eines bestimmten Wagens eines Zuges, verwendet werden. Durch die Unterstützung sowohl geometrischer als auch symbolischer Beschreibungen sind spezielle Konzepte zum Vergleich von Zielgebieten und Empfängerpositionen erforderlich. Das vorgeschlagene Modell ordnet hierzu symbolischen Lokationen geometrische Ausdehnungen zu, wobei auch die Approximationen berücksichtigt werden.

mierung symbolischer Lokationen durch unscharfe Lokationsangaben unterstützt wird. Ferner können durch Einführung von Transformationsvorschriften Koordinaten aus verschiedenen lokalen Modellen in ein gemeinsames Referenzsystem überführt und somit verglichen werden.

Im zweiten Teil widmet sich diese Arbeit Ansätzen zur Vermittlung symbolisch adressierter Geocast-Nachrichten, welche im Gegensatz zu geometrischen Geocast-Protokollen bisher nur wenig erforscht wurden. Hier betrachtet die Arbeit zwei grundsätzliche Ansätze: Einen verzeichnisbasierten Ansatz und die Vermittlung von Nachrichten in einem der Internet-Infrastruktur überlagerten Overlay-Netz.

Der verzeichnisbasierte Ansatz bildet zunächst die symbolische Geocast-Adresse auf eine Menge von IP-Adressen ab, welche in einem zweiten Schritt für die Vermittlung genutzt werden. Hierbei können die Nachrichten sowohl per IP-Unicast als auch IP-Multicast zugestellt werden. Insbesondere bei größeren Empfängergruppen bietet sich IP-Multicast für die effiziente Vermittlung an. Allerdings stellt Geocast aufgrund der großen Anzahl an notwendigen Multicast-Gruppen für ein feingranulares globales Lokationsmodell entsprechende Anforderungen an die verwendeten Multicast-Protokolle. Es wird daher die Verwendung von explizitem Multicast (Xcast) vorgeschlagen, das sich insbesondere für eine große Anzahl von Gruppen kleiner bis mittlerer Größe eignet.

Die vorgeschlagenen Geocast-Overlay-Netze bestehen aus einer Menge spezieller Geocast-Router, welche symbolische Adressen interpretieren und daraus die nächsten Geocast-Router auf dem Weg ins Zielgebiet bestimmen können. Die Grundidee ist dabei die Abbildung des hierarchischen symbolischen Lokationsmodells auf eine entsprechende hierarchische Overlay-Netzstruktur. Entsprechend der vorgeschlagenen hierarchischen Lokationsmodelle wurde ein baumförmiges und eine verbandsbasiertes Geocast-Overlay-Netz entworfen, einschließlich der notwendigen Mechanismen zur Verwaltung (Hinzufügen/Entfernen von Geocast-Routern, Behandlung von Router-Fehlern) der Netze. Als Optimierung der grundsätzlich hierarchischen Netzstrukturen wurden verschiedene Strategien zur Ergänzung der hierarchischen Netze durch zusätzliche Direktverbindungen entworfen. Direktverbindungen entlasten dabei vor allem Geocast-Router an der Spitze der Hierarchie, die im Allgemeinen nur dünn besetzt und somit anfällig für Überlastungen ist.

In der Evaluierung wurde die Effizienz der vorgeschlagenen Ansätze vor allem hinsichtlich der erzielten Nachrichtenpfadlänge nachgewiesen.

Abstract

Introduction

The proliferation of powerful mobile communication technologies and devices as well as positioning technologies allows for the implementation of various kinds of location-based applications and services. Typical examples of such applications include navigation systems, tourist information systems that provide tourists with information about points of interest, or services for the distribution of warning messages or location-based advertisements.

Typically, these applications and services access location-based information. In order to facilitate the distribution of location-based information, this dissertation investigates a location-based communication paradigm called *geocast* that allows for sending location-based information to all devices in a given geographic target area. Rather than addressing messages based on traditional (typically location-transparent) network addresses like IP addresses, the sender specifies the target area of the geocast message in form of a geographic location without necessarily knowing the mobile devices in that location. It is the task of special geocast routing protocols to forward the geocast message to all devices in the addressed target area.

The geocast communication paradigm has various application areas. In particular, it is well-suited for applications where polling location-based information would be inefficient. For instance, the above mentioned services for distributing warning messages in endangered areas or for sending location-based advertisements to devices close to a shop could be realized easily based on geocast. Moreover, geocast could also be used to realize a location-based instant messaging service [SWKD07a, DPG⁺08], or to send traffic information to onboard car navigation systems, etc. In general, geocast could be a basic building block of a middleware or platform for location-based services [LCG⁺09, DHN⁺04, SWKD07a].

The basic goal of this dissertation are concepts for the fine-grained and efficient geographic communication based on suitable geocast protocols. This overall goal can be further refined into two sub-goals, which are the main contributions of this work:

- A fine-grained addressing concept and location model for geocast.
- Scalable geocast routing protocols.

First, a *fine-grained addressing concept* and a suitable *location model* are designed to specify target locations and the locations of recipients, and to determine whether a recipi-

ent is located within the target area. In general, locations can be modelled in two ways. On the one hand, geometric models use geometric figures like points or polygons to define locations. These models are highly flexible since any area can be defined. However, they tend to lead to complex models if a fine-grained model is required or if three-dimensional coordinates are required, for instance indoors. On the other hand, symbolic models use symbolic identifiers like room or floor numbers to identify locations. These models are very intuitive to use since they are based on locations, addresses and geographic relations of the physical world that we use everyday. However, they are not as flexible as geometric models since they are limited to a set of pre-defined locations.

Both types of addresses are relevant for geocast. Indoors, in particular symbolic locations like floors and rooms are often more intuitive to use than geometric addresses. Moreover, many positioning systems that are used especially indoors like RFID-based systems and bluetooth or infrared beacons are based on symbolic outputs. These outputs can be mapped easily to symbolic locations. Outdoors, geometric addressing is beneficial, for instance, to address parts of a larger place. Moreover, geometric positioning systems like GPS are prevalent outdoors. Therefore, a *hybrid location model* is proposed in this dissertation combining symbolic and geometric information and the advantages of both basic types of models. Basically, this model consists of a hierarchical tree-based or lattice-based symbolic location model, where locations are associated with geometric coordinates. Besides stationary target areas like a building or room, this model also allows for the addressing of mobile target areas like a specific coach of a train. Since positioning systems typically output uncertain position information rather than perfectly precise positions, we will show how to consider these uncertainties using probabilistic models for comparing user positions and target areas.

Second, *scalable geocast routing protocols* are proposed in this dissertation. Since geocast routing protocols for geometric addressing are already well-covered by related work, this dissertation is focussed on geocast routing protocols for symbolically addressed messages. Two basic classes of approaches are considered: a directory based approach and symbolic routing in a dedicated geocast overlay network.

The *directory-based approach* uses a two-step process. It first determines the network addresses of all recipients in the target area. Then it forwards the message to this group using unicast or multicast protocols. For the latter, the utilization of an explicit multicast protocol (Xcast) is proposed in this dissertation to cope with the potential large number of groups.

For forwarding symbolically addressed messages in an overlay network, special overlay network structures together with the mechanisms to maintain these structures and suitable routing algorithms are proposed. In particular, a tree-based overlay network and a lattice-based overlay network are proposed, depending on the underlying tree- or lattice-based location models that are proposed in the first part of this dissertation.

The concepts for location modeling and geocast routing are presented in more detail in the next sections.

Preliminaries

The purpose of a location model in the scope of geocast is to define target locations (denoted as τ), user positions (denoted as π), and the comparison of target locations to user positions in order to define the set of recipients of geocast messages. Formally, a location model $M = (L_M, \Theta_M, \alpha_M)$ is defined by

- a set $L_M \subseteq L$ of locations,
- a spatial configuration Θ_M , which defines the spatial relations between locations in L_M ,
- an addressing scheme $\alpha_M : L_M \times A_M$, such that $\forall l \in L_M \exists a \in A_M : (l, a) \in \alpha_M$, i.e. at least one address is assigned to each location $l \in L_M$.

For a geometric model, the addressing scheme assigns a geometric figure to a location; for a symbolic model, the addressing scheme assigns a symbolic name to a location. Moreover, the spatial relations of a geometric model can be derived automatically from the geometric figures of locations, whereas relations have to be modelled explicitly for symbolic models.

The spatial configuration is defined by a set of spatial relations. Since the basic purpose of our location model is to define whether the user position is in the target area, the following topological relations of the Region Connection Calculus RCC5 are particularly relevant:

- $\text{EQ}(l_1, l_2)$: l_1 and l_2 are identical (“equal”)
- $\text{PP}(l_1, l_2)$: l_1 is completely within l_2 (“proper part”)
- $\text{PPi}(l_1, l_2)$: l_2 is completely within l_1 (“proper part inverse”)
- $\text{PO}(l_1, l_2)$: l_1 and l_2 overlap partially (“partially overlapping”)
- $\text{DR}(l_1, l_2)$: l_1 and l_2 are disjunct (“discrete”)

With this set, we can define in a qualitative way whether the receiver position π is certainly within target area τ ($\text{EQ}(\tau, \pi)$, $\text{PPi}(\tau, \pi)$), certainly not in the target area ($\text{DR}(\tau, \pi)$), or maybe located in the target area ($\text{PP}(\tau, \pi)$, $\text{PO}(\tau, \pi)$).

A quantitative comparison is possible, if locations are assigned with quantitative probabilities that a user resides at a location. For instance, GPS positions can be approximated by a normal distribution that can be compared to the geometries of a geometric location model.

Basic Location Model

Based on the general definitions above, we defined a basic hybrid location model that can contain geometric information as well as symbolic locations [DBR03, BD05]. We start with a purely symbolic location model that is augmented in the next step with geometric information to form a hybrid model.

We designed two hierarchical *symbolic location models*: a *tree-based model* and a *lattice-based model*. The main difference is the supported set of spatial relations for defining the spatial configuration of a model. The tree-based model only supports the relations EQ, PP, PPi, and DR, whereas the lattice-based model additionally supports the modeling of partial overlapping locations through the relation PO. Since tree-based models are a special case of lattice-based models, we focus on the latter in the following.

First of all, we define a partial order on locations l_1, l_2 according to the spatial inclusion relationship:

$$l_1 < l_2 \text{ iff } \text{PP}(l_1, l_2) \quad (1)$$

Moreover, we define two locations \top (top) and \perp (bottom) such that

$$\forall l \in L : l \neq \top \rightarrow \top > l \quad (2)$$

$$\forall l \in L : l \neq \perp \rightarrow \perp < l \quad (3)$$

Next, for each pair of intersecting locations l_1 and l_2 with $\text{PO}(l_1, l_2)$, we explicitly model another location $l_{1 \cap 2} = l_1 \cap l_2$ that defines the intersection of l_1 and l_2 .

The result is a lattice-based model where every pair of locations l_1, l_2 has a well-defined unique infimum $\inf_{l_1, l_2} \in L_M$ (greatest lower bound) and supremum (least upper bound) $\sup_{l_1, l_2} \in L_M$ in the set of modelled locations L_M of model M . The existence of the infimum and supremum is important for geocast since they define the intersection and union of two symbolic locations, respectively. In particular, the infimum defines the qualitative relation between target area and user position as defined above and can be used for symbolic message forwarding as shown later.

To finalize the lattice-based symbolic location model, we assign hierarchical location addresses to each location. These addresses are based on a concatenation of the addresses of locations traversed in the hierarchy from the top to the respective location. For instance, /de/bw/stuttgart denotes the city “Stuttgart” in the state “Baden-Württemberg” (“bw”) in the country “Germany” (“de”). Note that in a lattice, a location might have multiple addresses but each address is only assigned to one location. (This influences our routing algorithms as shown below. In a tree-based model, simple prefix matching algorithms on location addresses are sufficient, whereas we have to navigate on the lattice structure for lattice-based models.)

Based on the hierachic symbolic location models we define our *hybrid location model* by assigning geometric extents to the locations in the hierarchy. As geometric descriptions we support 2D as well as 2.5D figures, where a 2.5 figure is defined by a 2D base figure (e.g.

polygon) plus the altitude of the base and the relative height of the figure. 2.5D figures represent a compromise between flexibility and complexity since most locations that are relevant for geocast like floors and rooms of a building can be modelled by a 2.5D figure. Coordinates of figures are defined based on a global coordinate reference system such as the WGS84 in order to ensure that any geometrically defined target location can be compared to any geometric position.

Based on this model, it is straightforward to compare two symbolic or two geometric locations. The first can be compared based on the qualitative relations defined above; for the second, these relations can be derived from the geometry of the target area and receiver position. However, comparing heterogeneous locations—symbolic target area with geometric position, or vice versa—requires another modeling concept. The basic idea is to ensure that each symbolic location is associated with a geometric representation and vice versa. In order to ensure this, we utilize the location hierarchy. Each symbolic location that was not explicitly assigned to a geometric extent implicitly inherits the geometric extent of its parent location in the hierarchy; an intersection location inherits the geometric intersection of all of its parent locations. Since at least the top location of the hierarchy is assigned to a geometric extent, it is ensured that every location inherits a geometric description. The inherited extent approximates the exact geometric extent and can be used for comparing symbolic to geometric locations.

Extended Location Model

The basic location model presented above was extended in several ways.

First, we introduced the possibility to define *local reference systems*. In contrast to the coordinates of the global model presented above, local coordinates are only valid within the scope of their local reference system. We support both local symbolic systems and local geometric reference systems. For instance, a local symbolic model of a building can be embedded into a global geometric model based on the geometric WGS84. Or a local geometric model of a room using a local cartesian coordinate reference system can be embedded into the symbolic model of a building.

In order to ensure that every target area definition can be compared to every user position also if both are defined in different reference systems, we have to make sure that coordinates of different reference systems can be translated into a common reference system. In order to allow for this coordinate transformation, we first introduced the concept of an anchor point. The anchor point of a local location model embeds a local model into a superordinate model—a higher-level local model or the global location model—by defining its position based on coordinates of the superordinate model. For instance, in order to embed a local symbolic model (e.g. a building model) into a higher-level geometric model (e.g. the WGS84), the anchor point defines the geometric area covered by the root location of the local model; in order to embed a local geometric model into a symbolic model, the anchor point defines the smallest symbolic location covering the local geometric model. This concept also allows for deeply nested local models.

The anchor point is used to assign an approximated coordinate of the superordina-

te model to every location of the embedded model. For instance in the example above, the locations of the local symbolic building model inherit the extent of the root location, which was used as anchor point to embed the local model into the global WGS84. These approximations can already be used to compare coordinates of a parent and a child model. In order to compare coordinates of arbitrary systems, we use multiple coordinate transformations. For instance, for geometric systems, we define coordinate transformations from local coordinates to a global reference system, e.g. to the WGS84. With this transformations, local coordinates from two arbitrary local system can be transformed to global coordinates and compared in the global system.

Finally, we presented a concept for embedding mobile coordinate systems like the local system of a train into a global location model. This concept utilizes the above presented concept of local coordinate systems. However, now the anchor point is mobile defining an area around the mobile object using coordinates of the superordinate model. This area is also used to decided whether a message addressed to an area around the mobile object should be delivered to recipients within the mobile object. In order to facilitate the addressing of local areas within the mobile object, we assign a location-transparent identifier with each mobile system. Thus, local coordinates can be specified in coordinates of the local system without specifying the current location of the mobile object.

System Model and Requirements of Routing System

Based on the location model introduced above, we presented different approaches for geocast message forwarding. Since the forwarding of geometrically addressed messages is already well-covered by related work, we focus on the forwardig of symbolically addressed messages based on the presented tree-based and lattice-based symbolic location models. First, we introduce the underlying system model of the geocast system.

The three components of our system are hosts, message servers, and routers. *Geocast hosts* represent the mobile or stationary recipients of geocast messages. Messages have to be delivered to all hosts within the addressed target area. *Geocast message servers* are responsible for message distribution to all hosts within certain access networks (local area network). A message server has a geographic *service area* whose size is equal to the area covered by its assigned access network. This service area is defined by a symbolic location of an hierachic symbolic location model as introduced above. *Geocast routers* are responsible for forwarding geocast messages from the sender to the message servers whose service areas overlap with the target area of the message. Geocast routers are arranged in an overlay network as presented below and exchange messages using the UDP service offered by the underlying IP-based Internet infrastructure.

The following requirements should be fulfilled by the routing approaches. First, they should be based on a pure symbolic location model as presented above without using any geometric information—otherwise, a trivial solution would be to translate symbolic coordinates to geometric representations, and use a geometric geocast protocol from the literature for forwarding. Second, it should support the global forwarding of geocast messages between messages servers, i.e., we focus on the efficient forwarding of messages via

the geocast overlay network from the sender to geocast message server, i.e., to the local networks containing the hosts. Efficient local message distribution protocols for distributing a message within a local area network are beyond the scope of this work. For instance, a broadcast could be used in a wireless access network; in a wired access network, messages could be forwarded to a well-defined multicast group. Third, the system must be scalable to large numbers of receivers and locations of a fine-grained location model. Fourth, the approach should be robust against router failures. Although our goal is a best effort service that gives no strict delivery guarantees, still the routing infrastructure should compensate failures as fast as possible.

Directory-based Routing Approach

The directory-based approach uses a two-step process for message forwarding. First, it queries the transport layer addresses (e.g. UDP addresses) of the geocast messages servers whose service areas cover the target area. Second, it uses a common transport protocol to forward the message to these servers. Actually, no geocast router infrastructure is required by this approach since the existing Internet router infrastructure is utilized for message forwarding.

In the first step, a scalable directory is required to map service areas to message server addresses. Such a directory is, for instance, the goal of the Nexus project at the University of Stuttgart [NGSV01], which also constitutes the framework of this dissertation.

In the second step, theoretically any common transport protocol could be used for message forwarding. However, a multicast protocol seems to be more suitable to forward messages to larger groups of hosts. However, assigning a multicast group to every symbolic location leads to a huge number of multicast groups, which is critical for many multicast protocols since multicast trees have to be established and maintained. Therefore, we propose to use a special multicast protocol, namely explicit multicast (Xcast [BFI⁺01, BC05, STE00]) instead. Xcast supports large numbers of medium size multicast groups. The basic idea of Xcast is to encode the recipient addresses (message server IP addresses) explicitly in the message header. Then, IP routers make forwarding decisions by looking up the next hops for these addresses according to their unicast routing tables. Therefore, no costly maintenance of a separate multicast routing table is required. Moreover, Xcast can be implemented gradually. However, addressing large multicast groups with many receivers is costly or even impossible because of the large overhead for encoding addresses explicitly in the message header.

Symbolic Routing in Overlay Network

Next, we present routing approaches for symbolically addressed geocast messages based on an overlay network of geocast routers. We designed two geocast overlay networks together with suitable routing algorithms: one approach for tree-based symbolic location models, and one approach for lattice-based location models. We start with a description of the approach for tree-based models [DR06, DR08].

Overlay Network Topology: The basic idea to form the overlay network is to assign each symbolic location of the location model to one overlay router. We call this router the *designated router* of the location. For instance, there exists an earth router, country routers, state routers, city routers, etc. The symbolic location associated with a router, say r , is called its service area, $s(r)$, which is defined when a router is configured. Since it is not reasonable to assign a different physical router to each single location, a physical router can implement multiple virtual routers. For instance, a building router also implements virtual floor routers for this building as long as no designated floor routers have been configured. In the following, the term “router” denotes a virtual router.

Basically, these geocast routers form a *routing tree* according to the spatial inclusion relation between service areas. That is, the designated router of a location, say l , has a link to the designated router of the parent location of l and vice versa. For instance, state routers are child routers of country routers, city routers are child routers of state routers, etc. To add a new router to the tree, a bootstrapping process is performed. After this process, the newly integrated router knows the UDP addresses and service areas of parent and child routers and vice versa.

Over time, the routing tree is extended by *shortcuts* that are used to send messages directly to certain target areas, by-passing routers of the routing tree. Adding shortcuts leads to a *routing mesh*. This mesh may change continuously as shortcuts may be added and removed dynamically. Within this mesh the routing tree is sort of a backbone guaranteeing that a path to every target area exists. Links of the routing tree are used whenever no path via a shortcut exists.

Message Forwarding: Messages are forwarded in two phases. In Phase 1, the message is forwarded to the designated router of the target area. For instance, a message to New York City is forwarded to the New York City router. The forwarding algorithm chooses the locally known router whose service area address is the longest prefix of the target area address as next hop. This can be either a router reachable via the routing tree or a shortcut.

In Phase 2, which is started by the designated router of the target area, the message is distributed among all designated routers with service areas within the target area by simply forwarding the message down the sub-hierarchy rooted at the designated router of the target area. For instance, the New York City router forwards the message to all borough routers like the Manhattan router, these routers forward the message to district routers, etc. In Phase 2, the routers also forward the message to the message servers whose access networks cover parts of the addressed area.

Shortcut Selection: As already mentioned above, the basic tree-shaped overlay network topology can be extended by introducing additional shortcuts between routers. However, these shortcuts have to be chosen carefully. On the one hand, they should shorten routing paths significantly. On the other hand, the overhead of maintaining additional shortcuts should be minimized. We achieve the second goal by only installing a limited number of shortcuts. Therefore, the remaining question is how to select the best shortcuts. We proposed two shortcut selection strategies: static and adaptive shortcut selection.

Static shortcuts use a fixed set of target locations (however, the designated router of

these locations might change over time, and the network topology is adapted whenever the target router of a shortcut changes). We use a simple yet effective heuristic to define the target areas of static shortcuts: a router establishes shortcuts to all designated routers of ancestor locations and direct children of ancestor locations. For instance, a city router of city c knows the earth router, the country routers, and the state routers in which c is located, as well as all city routers of the state in which c is located, all state routers of the country in which c is located, etc. Thus, a router has many shortcuts to close destinations and few to distant locations. (The same strategy is applied by many peer-to-peer overlay networks, although they define shortcuts on virtual coordinates rather than an hierachic symbolic location model.)

Dynamic shortcuts are adapted to the dynamic popularity of target areas. Each geocast router individually determines the utility $\text{util}_t(\tau)$ of a shortcut target τ at time t based on the observed target area τ of the forwarded message using the following formula:

$$\text{util}_{t'}(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{if } \tau \text{ has never been referenced} \\ \text{weight}(\tau) & \text{if } \tau = \tau' \text{ and } \tau \text{ is referenced for the first time} \\ \text{util}_t(\tau) \times F(t' - t) & \text{if } \tau = \tau' \text{ and } \tau \text{ is referenced for the } 2^{\text{nd}}, 3^{\text{rd}}, \dots \text{ time} \\ \text{util}_t(\tau) \times F(t' - t) & \text{if } \tau \neq \tau' \end{cases} \quad (4)$$

Function $F(x) = (\frac{1}{2})^{\lambda x}$ with parameter λ defines the influence of reference recency and frequency of a target area. Function $\text{weight}(\tau)$ assigns an individual weight to each target τ . We define the weight of τ as the number of saved overlay hops if a shortcut is established to τ . Adaptive shortcuts are kept in a cache and replace according to their utility.

Extensions for Lattice-based Networks: The routing algorithm presented above based on longest-prefix matching of target and service area addresses is applicable only to tree-based models. For a lattice-based location model, more complex operations are required to make forwarding decisions.

The basic idea to build the overlay network is still similar to the tree-based approach: designated geocast routers are assigned to the locations of the model and link to the routers of parent and child locations. Since the underlying location model is a lattice, the basic overlay topology now resembles the lattice structure of the location model. Therefore, multiple paths in the lattice might exist that lead to a given target area. The basic idea of the lattice-based routing algorithm is to choose a *least ascending path* that has the lowest “culmination point” in the router hierarchy to reduce the load on routers at the top of the hierarchy. This path is defined by the supremum of the lattice. A router can calculate this supremum and the respective paths based on local knowledge of the router hierarchy (lattice). In order to calculate the supremum efficiently, we use an internal graph representation of the lattice as well as a lattice-encoding from the literature proposed in [GMR94].

Multicast-based Optimization: Moreover, we proposed an optimization of the overlay-based routing approach using IP multicast. The goal was an approach that can utilize multicast whenever available rather than strictly relying on its availability.

The approach initially uses overlay-based routing as presented above, and then switches to source-specific multicast routing (SSM, [Bha03, HC06]). When the first geocast messages are received by the target message servers via the overlay, they join an SSM tree routed at the sender (source). When all message servers have joined the SSM tree, overlay-based message forwarding is stopped, and messages are only forwarded via the (optimal) SSM tree. Note that with SSM, the management of large numbers of multicast groups is not an issue, since group addresses include the identity of the source (sender). However, since multicast trees have to be maintained in the network, this optimization should only be used in scenarios where many messages are forwarded from one sender to a certain target area. For these scenarios, we introduced a geocast streaming mode.

Forwarding to Mobile Target Areas: The above approaches only forwarded messages to stationary target areas and stationary access networks. In this dissertation we also designed concepts for forwarding messages to mobile target areas (e.g. all passengers in a certain coach of a train) and mobile access networks (e.g., WLAN of a train).

To address mobile target areas, we proposed two approaches: geocast-in-geocast-tunneling, and mobile geocast. The basic idea of *geocast-in-geocast tunneling* is to encapsulate a message to a mobile target area in a geocast message to a stationary area around the mobile object. For instance, a message to a coach of a train currently located in Stuttgart would be encapsulated into a message to Stuttgart. In order to determine the stationary area, a location service managing the positions of mobile objects is used. *Mobile geocast* uses a routing protocol with mobility support such as Mobile IP to forward the message to a message server within the mobile object which further distributes the message in the local area network of the mobile object.

To address the problem that geocast messages to stationary targets containing the mobile object should also be delivered to mobile access networks within the mobile object, we use a *proxy approach*. Here, the geocast message server acts as a proxy for all hosts in its access networks. To the outside geocast infrastructure, the proxy acts as a geocast host, and registers with a stationary message server.

Evaluation

In our evaluations, we first measured the performance of the proposed symbolic geocast routing algorithms based on overlay networks in terms of the achieved path lengths. Since overlay-based routing in general introduces detours compared to optimal routing on the network layer, we were particularly interested in the path length stretch, i.e. the factor by which overlay routing paths are longer than optimal paths. Our simulations show that both static and adaptive shortcuts are able to reduce path length significantly compared to simple tree-based overlay networks. We observed, that the performance of the different shortcut selection strategies is dependent on the geographic distribution of target areas. In scenarios, where many messages are addressed to distant target areas, static shortcuts

achieved path lengths that are by a factor of about 2.3 longer than optimal paths. Adaptive shortcuts further reduced the path length, leading to paths that are 30% to 50% shorter than with static shortcuts. If mostly local target areas close to the sender are addressed, the static shortcut heuristic leads to slightly better results than dynamic shortcuts with stretch factors close to the optimum. Therefore, we conclude that a combination of both strategies is most beneficial. With such a combined strategy, adaptive shortcuts optimize the paths to the (usually few) very popular targets, whereas static shortcuts optimize paths for the majority of equally popular targets. Note that by applying our multicast-based optimization, we can even achieve optimal paths.

Moreover, we also measured the message overhead of installing dynamic shortcuts. Our evaluations show that our concepts for selecting only stable shortcuts are efficient, reducing the overhead for shortcut maintenance to 15% of the overall messages. In extreme situations where many shortcuts have to be invalidated due to router failures, the communication overhead quickly returns to a low overhead.

Finally, we showed that also the lattice-based routing algorithm, which uses complex lattice-operations rather than simple prefix matching, can be implemented efficiently leading to very short forwarding decision times.

Related Work

Location Modeling: Different location models have been proposed for different purposes in the literature.

First of all, we have to mention the Region Connection Calculus (RCC, [RC89]) by Randal, Cui und Cohn and the 4-Intersection Model and 9-Intersection Model [EH90, EF91] by Egenhofer that define basic topological relations between locations. The relations of these model serve as a basis for the design of symbolic location models for geocast in this work.

In [Leo98], Leonhardt gives a first formal specification of a hybrid location model as basis for a location service. This model is based on a hierarchy of domains, which are assigned to geometric extents to form a hybrid location model similar to our hybrid model. Beyond this model, our model supports the integration of local location models, which are also used to model mobile location models. Moreover, we consider uncertain position information and assign geometric extents to every location through geometric approximation. These features are essential to compare heterogeneous descriptions of target areas and user positions.

Brumitt and Shafer [BS01] also proposed a lattice-based model, however, they did not consider the integration of geometric information.

The Aura location model of Jiang and Steenkiste [JS02] is a hybrid model similar to our model that integrates symbolic and geometric location information through the concept of sub-spaces. These sub-spaces are defined based on a partitioning of the world, and geometric transformations between sub-spaces are defined for translating coordinates. Since the authors assume that every sub-space is modelled geometrically and symbolically, they propose a chain of transformations between different local systems, whereas

we define transformations between local systems and a global reference system. Moreover, we consider also lattice-based models instead of tree-shaped models, and the approximation of geometric descriptions through inheritance.

Jörg Roth also proposed a symbolic location model for the Nimbus platform [Rot05, Rot03], which includes a symbolic geocast service. Similar to our model, this model is also based on a hierarchy of locations. However, the Nimbus model uses a different concept to integrate different models. Nimbus uses different tree-shaped models, and connects locations through so-called associations. In contrast to this approach, we use a lattice of locations to model overlapping locations.

Finally, we want to mention the work on location modeling in the Nexus project at the University of Stuttgart. Initially, the Nexus model was a pure geometric model [BDG⁺04] based on a global reference system. Bauer and Becker proposed to extend this model by hierarchical and graph-based symbolic location models [BBR01]. Moreover, Drosdol proposed in particular a graph-based symbolic model as basis for a location service [Dro03]. For the implementation of a geocast service, Coschurba proposed in [CRD02] a fine-addressing concept including symbolic locations and geometric descriptions. Coschurba also proposed the concept of a scope to associate symbolic locations with geometric extents. We use the concept of scoping to define embedding of local models, and furthermore introduce methods for the transformation of coordinates between local models.

Geocast Routing: Our goal is a geocast routing infrastructure in form of an overlay network that can be used for world-wide geographic messaging (in contrast to approaches for mobile ad hoc networks [Mai04], which operate in limited geographic domains). Different geocast infrastructures have been proposed in the literature. Native geocast routing algorithms are implemented on the network layer. In [Nav01], different geographic extensions to distance vector and link state routing protocols as well as a multicast-based geocast routing algorithm are proposed. These approaches lead to “optimal” distribution trees with respect to the topology of the IP network, however, the IP network has to be modified, which is not an easy task as the slow adoption of IPv6 shows.

Overlay geocast routing avoids this problem by implementing geocast on the application layer using an overlay network of geocast routers on top of the IP network. For geometric addressing, [Nav01, Heu02] and [Heu05] proposed hierarchical and flat geocast routing algorithms. Although geometric addressing is powerful since almost any target area can be addressed, a detailed, possibly three-dimensional model is required and routers have to use complex geometric operations to forward messages. Therefore, we focus on symbolic addressing as a pragmatic and intuitive alternative without the need for complex geometric models and operations.

For symbolic geocast, Jörg Roth proposed a geocast service based on the location model of the Nimbus platform (see above). Similar to our approach, Roth optimizes message forwarding by introducing additional shortcuts to a basic hierachic network structure. However, a simple “top-down” strategy for adding shortcuts was used, i.e., shortcuts to top-level locations like countries are preferred to shortcuts to smaller locations like cities. Concurrently to our work, Wei et al. proposed a strategy to add shortcuts to a peer-to-peer system that resembles our strategy for static shortcuts [WS05]. However, they do not

consider adaptive strategies for adding shortcuts.

Finally, Coschurba proposed a geocast routing approach that also supports symbolic messages within the Nexus project [CRD02]. The basic idea of forwarding symbolic messages is to translate the symbolic address to an approximated geometric figure using an hybrid location model. Messages can then be forwarded using any geometric routing protocol. In contrast to this approach, our symbolic routing approaches do not require any geometric information since messages are forwarded solely based on symbolic information.

Summary

This dissertation designed concepts to enable fine-grained geographic communication (geocast), which allows for sending messages to all recipients in a given geographic target area. The two main contributions of this work are on the one hand a fine-grained location model and addressing concept for geocast, and on the other hand scalable geocast routing protocols tailored to the forwarding of symbolically addressed messages.

In detail, the proposed location model supports the integration of symbolic and geometric information in a hybrid model. Moreover, local location models can be embedded, which also allow for the modeling of mobile locations like trains, ships, etc. Through approximation we ensure that every location has a symbolic representation as well as a geometric extent, which is a necessary prerequisite to compare heterogeneous target areas and user positions.

For forwarding symbolically addressed messages, we proposed two basic approaches. First, a directory-based approach that uses common transport protocols like UDP for forwarding messages to a set of recipients that were determined using a directory. Second, we proposed overlay networks for forwarding messages based on symbolic location information. These overlay networks are based on a hierarchy of routers resembling the location hierarchy. In order to optimize message forwarding and increase scalability, we proposed different strategies for introducing additonal shortcut links into the basic hierarchy besides further optimizations based on IP multicast. Finally, we proposed routing approaches for forwarding messages to mobile target areas.

Our evaluations showed the effectiveness and efficiency of our routing approaches.

Kapitel 1

Einleitung

Mit der Entwicklung leistungsfähiger mobiler Kommunikationstechnologien und der zunehmenden Verbreitung von Positionierungssystemen wurde der Weg für diverse neuartige ortsbezogene Anwendungen und Dienste geebnet. Klassische Beispiele umfassen Navigationssysteme, mobile Informationsdienste für Touristen oder ortsbezogene Einkaufsassistenten und Werbedienste.

Diese Dienste greifen typischerweise auf ortsbezogene Informationen zu, beispielsweise die aktuelle Stausituation entlang der Fahrtroute, oder Informationen über interessante Punkte (engl. *points of interest*, POI) wie Sehenswürdigkeiten, Geschäfte, usw. am aktuellen Standort. Der Zugriff kann dabei *empfängerinitiiert* durch Anfragen des Nutzers an das System erfolgen oder aber *senderinitiiert* durch das Senden von Informationen an einen oder mehrere Benutzer. In dieser Arbeit steht dabei die zweite Form der Kommunikation im Vordergrund. Diese Arbeit untersucht insbesondere ein *ortsbezogenes Kommunikationsparadigma* namens *Geocast*, bei dem die Empfänger einer Nachricht aufgrund ihrer aktuellen geographischen Position bestimmt werden. Mit Hilfe der Geocast-Kommunikation können somit ortsbezogene Informationen an Empfänger in einem vom Sender definierten geographisch beschriebenen Zielgebiet gesendet werden, wobei der Sender die Identitäten der Empfänger nicht kennen muss. Vielmehr ist es Aufgabe des Geocast-Systems mit Hilfe spezieller Geocast-Vermittlungsprotokolle die Nachricht an die Empfänger zu vermitteln.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Realisierung feingranularer und skalierbarer Geocast-Vermittlungsmechanismen. Die feine Granularität bezieht sich dabei auf das zur Verfügung gestellte geographische Adressierungskonzept und das unterlagerte Lokationsmodell zur Beschreibung von Zielgebieten. Dieses Konzept soll den Sender in die Lage versetzen, Nachrichten sowohl Ziele im Außenbereich als auch im Inneren von Gebäuden zu adressieren. Insbesondere sollen bei der Adressierung sowohl geometrisch definierte Zielgebiete, beispielsweise in Form von Polygonen, als auch symbolisch bezeichnete Zielgebiete, zum Beispiel allgemein gebräuchliche Gebäude- oder Raumnummern, unterstützt werden. Die Skalierbarkeit bezieht sich auf die Fähigkeit des Systems, eine große Anzahl von Teilnehmern (Sendern und Empfängern) als auch an Nachrichten zu unterstützen. Der Fokus liegt hierbei auf großen infrastrukturbasierten Systemen, vor allem Systemen, die auf Grundlage des Internets realisiert werden. Hierfür sind geeignete

effiziente Vermittlungsprotokolle und Netzstrukturen erforderlich.

Bevor das Adressierungskonzept und das Lokationsmodell sowie die Geocast-Vermittlungsprotokolle in den nächsten Kapiteln im Detail vorgestellt werden, sollen in diesem Kapitel zunächst die Hintergründe und die Motivation dieser Arbeit sowie die Ziele, Herausforderungen und resultierenden Fragestellungen ausführlicher dargestellt werden. Ferner gibt dieses Kapitel eine Übersicht über die einzelnen Beiträge und den weiteren Aufbau dieser Arbeit.

1.1 Hintergrund und Motivation

Bevor die ortsbezogene Kommunikation selbst motiviert wird, sollen an dieser Stelle zunächst die aktuellen Technologietrends kurz beschrieben werden, die einen Geocast-Dienst erst möglich machen und die somit die Grundlage zur Realisierung der vorgeschlagenen Konzepte bilden.

1.1.1 Technologietrends

Wie ortsbezogene Anwendungen und Dienste im Allgemeinen, so wird auch die Geocast-Kommunikation hauptsächlich durch zwei aktuelle Technologietrends ermöglicht.

Zum einen sind hier Entwicklungen im Bereich der *mobilen Endgeräte* und der *drahtlosen Kommunikationstechnologien* zu nennen. Es existiert eine Vielzahl mobiler Endgeräte, angefangen beim leistungsstarken Notebook oder TablePC, über Personal Digital Assistants (PDA) bis hin zum Smart Phone, die ausgestattet mit drahtlosen Kommunikationstechnologien dem Benutzer den mobilen Zugriff auf das Internet zu jeder Zeit und an jedem Ort ermöglichen. Die heute praktisch flächendeckend verfügbare Infrastruktur der diversen Mobilfunkunternehmen wird dabei längst nicht mehr nur für den reinen Sprachverkehr, sondern in zunehmendem Maße auch für Datenverkehr mittels Technologien wie GPRS (General Packet Radio Service) oder UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) genutzt, wobei ein stetiges Anwachsen der möglichen Datenübertragungsraten zu verzeichnen ist. Ergänzt wird diese Mobilfunkinfrastruktur durch ein immer dichter werdendes Netz an so genannten Hotspots. Diese räumlich beschränkten Gebiete, die z.B. an stark frequentierten Orten wie Flughäfen, Bahnhöfen oder Internet-Cafés zu finden sind, sind typischerweise mit Kommunikationstechnologien für drahtlose lokale Netze wie WiFi (IEEE 802.11) ausgestattet, die bereits heute Datenübertragungsraten von über 100 MBit/s ermöglichen und die in Zukunft voraussichtlich durch Technologien wie MIMO (Multiple Input, Multiple Output) noch deutliche Geschwindigkeitssteigerungen verzeichnen werden. Unterstrichen wird die hohe Relevanz der angesprochenen drahtlosen mobilen Kommunikationstechnologien durch immer günstigere Preise für den Datenverkehr. Waren zu Beginn noch Tarifmodelle üblich, die alleine auf der Verbindungsduer basierten, so werden heute volumenabhängige Tarife angeboten, bei denen nur die tatsächliche übertragene Datenmenge abgerechnet wird. Vermehrt sind auch so genannte flache Raten (engl. flat rate) zu finden, welche die unbeschränkte Nutzung des Kommunikationsdienstes zu einem pauschalen Preis ermöglichen. Diese

Abrechnungsmodelle bevorzugen vor allem Dienste, die nur sporadisch kommunizieren, dafür aber eine ständige Verbindung zum Internet benötigen. Diese Eigenschaften treffen auch auf neuartige ortsbezogene Anwendungen zu, insbesondere die ortsbezogene Kommunikation.

Bezüglich der zur Verfügung stehenden drahtlosen Kommunikationstechnologien kann man somit zusammenfassend feststellen, dass mobile Nutzer heute zu vergleichsweise geringen Kosten mit hoher Geschwindigkeit fast von jedem Ort und jederzeit kommunizieren können.

Der zweite zu beobachtende und für die Realisierung von Geocast wesentliche Technologietrend ist die zunehmende allgemeine Verfügbarkeit von *Positionierungssystemen*, die es ermöglichen, die Positionen von Personen, Fahrzeugen oder allgemein mobilen Objekten zu ermitteln. Im Freien sind dabei mit dem US-amerikanischen Global Positioning System (GPS) [DOD08, HWLW07] oder dem russischen Pendant GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) [RSA02, HWLW07] zwei satellitengestützte Systeme verfügbar. Aktuell findet für die zivile Nutzung hauptsächlich das weltweit einsetzbare GPS Anwendung. Nach Abschaltung der selektiven Verfügbarkeit (engl. selective availability), einer künstlichen Reduktion der Genauigkeit des ursprünglich militärischen Systemes für zivile Anwendungen, erreicht dieses System typischerweise Genauigkeiten von ungefähr 15 m. Durch differentielles GPS (DGPS) [HWLW03] und die Verwendung von großflächig verfügbaren Korrekturwerten aus Systemen wie WAAS (Wide Area Augmentation System) [FAA01] oder EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) [GMVTB01] sind auch Genauigkeiten im Meterbereich möglich, wobei zu erwarten ist, dass sich die Genauigkeit in Zukunft weiter steigern wird. Die neben der unbestrittenen militärischen Bedeutung enorme wirtschaftliche Bedeutung solcher Satellitennavigationssystemen wird durch die europäische Initiative zur Installation eines eigenen Systems mit dem Namen Galileo [BDG⁺00, HWLW07] deutlich, dessen Bereitstellungskosten sich auf mindestens 3,6 Mrd Euro belaufen und das bis zum Jahre 2011 den Regelbetrieb aufnehmen soll. Auch dieses System wird voraussichtlich die Positionierung mit Genauigkeiten im Meterbereich ermöglichen. Ein wesentlicher Nachteil all dieser Systeme ist die nur beschränkte Einsetzbarkeit in abgeschatteten Regionen wie Gebäuden, Tunnels, usw. Zwar wird durch diverse technische Maßnahmen die Empfindlichkeit der Empfänger kontinuierlich gesteigert, so dass teilweise bereits auch die Positionierung innerhalb von Gebäuden möglich wird, allerdings ist eine umfassende Abdeckung beispielsweise von Innenräumen mit den im Freien erzielbaren Genauigkeiten noch nicht absehbar.

Daher existieren diverse Positionierungssysteme, die vor allem in den von Satellitennavigationssystemen nicht ausreichend abgedeckten Bereichen zum Einsatz kommen. Erscheint die Systemlandschaft im Bereich der Positionierungssysteme für den Einsatz im Freien mit GPS noch sehr homogen, so werden im Innenbereich verschiedenste Technologien angewandt, beispielsweise hochgenau ultraschallbasierte Systeme, infrarotbasierte Systeme, Systeme beruhend auf drahtloser Kommunikation wie WiFi, Bluetooth oder RFID (Radio Frequency Identification) (für eine Übersicht über Positionierungssysteme siehe [HB01, GLN09]). Zwar sind durch einige Systeme Genauigkeiten im Zentimeterbereich möglich, allerdings erreichen großflächig, z.B. für eine gesamtes Gebäude, einsetzbare Systeme Genauigkeiten im Meterbereich bzw. Raumgenauigkeit.

Aufgrund der hohen Relevanz für die große Menge an Mobiltelefonen sind weitere Technologien zu erwähnen, die unter Zuhilfenahme der Mobilfunkinfrastruktur arbeiten. Ein frühes Verfahren beruht beispielsweise auf der Zuordnung von Teilnehmern zur jeweiligen Funkzelle, in die sie aktuelle eingebucht sind (Cell of Origin). Die so ermittelte Position kann allerdings je nach Zellgröße Genauigkeiten von mehreren Kilometern zur Folge haben. Durch verschiedene Verfahren kann allerdings die Position innerhalb einer Zelle verfeinert werden. So verwendet GSM beispielsweise den so genannten Timing-Advance-Parameter (TA), um sicherzustellen, dass Daten von entfernten und nahen Sendern zum richtigen Zeitpunkt bei der Basisstation ankommen, um sie entsprechenden Zeitfenstern zuordnen zu können. Mit Hilfe dieses Parameters kann die Position des Teilnehmers auf ca. 1 km im Umkreis der Basisstation bestimmt werden. Zusätzlich kann die Ausrichtung der (Sektor-)Antennen verwendet werden, um Sektoren in einer Zelle zu bestimmen und so den Aufenthaltsbereich weiter einzuschränken. Aufwändigeren Verfahren nutzen den Ankunftsinkel von Signalen (Angle of Arrival, AOA), die gemessene Signallaufzeit (Enhanced Observed Time Difference (E-OTD), Time Difference of Arrival (TDOA)) oder die Signalstärke (Received Signal Strength (RSS)) zur genaueren Positionierung (für eine Übersicht über diese Verfahren siehe [IB01]). Des Weiteren werden Mobilfunktechnologien zur Verbesserung der Leistung GPS-gestützter Positionierung verwendet. Insbesondere die notwendige Zeit zur Ermittlung einer Position kann mit Hilfe von Assisted GPS (AGPS [van09]) deutlich reduziert werden, indem zum einen eine grobe Position an den mobilen Empfänger übermittelt und somit der Suchraum für an der aktuellen Position relevante Satelliten eingeschränkt wird. Zum anderen wird der Empfänger über die Mobilfunkverbindung mit Daten zu den aktuellen Satellitenumlaufbahnen (Ephemeris) versorgt, die ansonsten nur langsam über den Datenkanal der GPS-Satelliten übertragen werden müssten.

Entsprechende Technologien finden bereits umfassenden Einzug in die verfügbaren mobilen Endgeräte. Neben den hierdurch entstehenden neuen Anwendungsmöglichkeiten, zum Beispiel im Bereich der Navigation oder der ortsbezogenen Anwendungen, wird dieser Trend ferner durch gesetzliche Bestimmungen wie dem E911-Programm [Fed09] in den USA unterstützt. Dieses Programm versucht, die Effektivität bei der Auswertung von Notrufen durch die Ortbarkeit des Notrufs zu steigern, so dass Anrufer auf 125 m geortet werden können. Hierfür müssen entsprechende Positionierungstechnologien in die Mobiltelefone oder die Mobilfunkinfrastruktur integriert werden.

Betrachtet man die verschiedenen Positionierungssysteme, so kann man sagen, dass die Ortung von mobilen Objekten wie Fußgängern oder Fahrzeugen bereits heute sowohl im Freien als auch innerhalb von Gebäuden technologisch möglich ist. Insbesondere können mit diesen Technologien die Empfänger von Geocast-Nachrichten sowohl im Außenbereich als auch innerhalb von Gebäuden bestimmt werden.

1.1.2 Geocast: Ein ortsbezogener Kommunikationsmechanismus

Die Verbreitung der beschriebenen Technologien zur drahtlosen Kommunikation mobiler Endgeräte sowie die erwähnten Möglichkeit der Positionsbestimmung von mobilen Objekten stellen wichtige Grundlagen für eine Vielzahl neuer so genannter ortsbezoge-

ner Anwendungen und Dienste dar. Allgemein berücksichtigen solche Dienste die Position des Benutzers, um relevante Informationen zu selektieren und zu präsentieren oder Aktionen auszulösen [RDD⁺03]. Typische Beispiele sind die bereits kurz erwähnten Navigationssysteme oder ortsbezogene Informationssystem zur Ermittlung lokaler Informationen in der Umgebung des Benutzers.

Wie bereits kurz eingeführt, stellt die Geocast-Kommunikation solchen ortsbezogenen Anwendungen und Diensten eine Funktion zur Verteilung von ortsbezogenen Informationen an eine Gruppe von Empfängern in einem bestimmten geographischen Zielgebiet bereit. Die hierbei eingesetzte ortsbezogene Adressierung von Gruppen stellt einen wesentlichen Unterschied zur traditionellen lokationstransparenten Adressierung dar, wie sie von verschiedenen Anwendungen verwendet wird. Beispielsweise werden E-Mails an einen bestimmten Empfänger adressiert, unabhängig davon, an welchem Ort er sich gerade befindet. Für einen Anruf gilt bei der Mobilkommunikation ebenfalls, dass der Angerufene unabhängig von seinem aktuellen Standort erreicht werden soll – betrachtet man herkömmliche Festnetznummer, so ist zwar durch die Vorwahl und den ortsfesten Anschluss ein Ortsbezug festzustellen, allerdings ist dieser vielmehr technisch durch das Vermittlungsverfahren begründet, als gewolltes Instrument zur ortsbezogenen Adressierung. Neben den Adressen auf Anwendungsschicht sind auch die Adressen auf der Vermittlungsschicht des Internet-(IP-)Protokollstapels ortstransparent und spiegeln eine Zuordnung zu Subnetzen wieder, deren Ort nicht bekannt ist. Insbesondere IP-Protokollerweiterungen für mobile Benutzer haben als erklärt Ziel die ortstransparente Adressierung der Benutzer durch auch unter Mobilität gleichbleibende IP-Adressen. Neben der Unicast-Kommunikation zwischen Paaren von je einem Sender und einem Empfänger werden ortstransparente IP-Adressen aber auch insbesondere bei der Gruppenkommunikation mit mehreren Empfängern benutzt. IP-Multicast-Adressen sehen dabei keinerlei Unterstützung der ortsbezogenen Adressierung vor.¹ Im Gegensatz zu dieser ortstransparenten Form der Adressierung, bietet Geocast die Möglichkeit, die Empfängergruppen aufgrund ihrer geographischen Abdeckung zu definieren. Die entsprechenden Geocast-Protokolle ermöglichen damit das Senden von Nachrichten an alle Empfänger an einem bestimmten Ort.

Die sich durch einen Geocast-Mechanismus ergebenden Anwendungsmöglichkeiten sind äußerst vielfältig. Insbesondere können mit Hilfe von Geocast ortsbezogene Informationen bei Bedarf effizient vom Sender an alle Empfänger in einem bestimmten Gebiet verteilt werden, ohne dass die Empfänger ständig Anfragen nach relevanten Informationen an ihrem aktuellen Aufenthaltsort stellen (engl. polling). Eine typische Anwendung für Geocast ist die Verteilung von Warnmeldungen an alle Empfänger in einem bestimmten gefährdeten Gebiet. Neben Warnmeldungen können auch Touristeninformationen, Veranstaltungshinweise oder Werbenachrichten in bestimmten Gebieten verteilt werden, die in der Nähe einer Sehenswürdigkeit, eines Geschäfts oder eines Veranstaltungsortes liegen. Auch mobile Zielgebiete, bei denen nicht nur die Empfänger selbst sondern auch das Zielgebiet sich bewegt, sind dabei denkbar, beispielsweise die Verteilung von Fahrplaninformationen und -änderungen an alle Passagiere eines be-

¹Diese Unterstützung kann wie auch in dieser Arbeit gezeigt wird durch eine spezielle Vergabe von IP-Multicast-Adressen und angepasste Vermittlungsprotokolle ergänzt werden.

stimmten Zuges. Neben der unidirektionalen Verteilung Informationen vom Sender an eine Menge von Empfängern kann ein Geocast-Mechanismus außerdem genutzt werden, um die bidirektionale Kommunikation zwischen einer Gruppe von Empfängern an einem bestimmten Ort zu ermöglichen, beispielsweise zur Realisierung eines ortsbezogenen Instant-Messaging-Dienstes [SWKD07a, DPG⁺08]; allgemein kann ein solcher Geocast-Mechanismus Bestandteil einer Middleware oder Plattform für generische ortsbezogene Dienste sein [LCG⁺09, DHN⁺04, SWKD07a].

Geocast bildet somit einen generischen Baustein für diverse ortsbezogene Anwendungen und Systeme.

1.2 Ziele und Fragestellungen

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Bereitstellung eines feingranularen und skalierbaren Geocast-Mechanismus zur Unterstützung ortsbezogener Anwendungen und Dienste. Dieses übergeordnete Ziel kann weiter in zwei Teilziele unterteilt werden. Zum einen soll ein *feingranulares Adressierungskonzept* und das dazugehörige *Lokationsmodell* zur Beschreibung von Zielgebieten und Empfängerlokalisationen entworfen werden. Zum anderen ist ein *skalierbares Vermittlungsverfahren* zu entwerfen, das in der Lage ist, auch globale Szenarien zu unterstützen. Die sich daraus ergebenden Fragestellungen sollen im Folgenden detailliert dargestellt werden.

Um in verschiedenen Anwendungsszenarien einsetzbar zu sein, muss das Geocast-System zunächst ausreichende Möglichkeiten zur Adressierung von Zielgebieten und Beschreibung von Empfängerpositionen bieten. Das System selbst muss außerdem in die Lage versetzt werden, Zielgebiete und Empfängerpositionen zu vergleichen um festzustellen, ob sich ein bestimmter Empfänger im adressierten Zielgebiet befindet. Die Beschreibung von Ziellokalisationen erfolgt durch ein entsprechendes Adressierungskonzept basierend auf einem darauf abgestimmten Lokationsmodell.

Im Allgemeinen können Lokationen durch zwei verschiedene Konzepte modelliert werden. Zum einen *geometrisch* mittels entsprechender Figuren (Polygone, Kreise, usw.); zum anderen mittels *symbolischer Bezeichner* wie Gebäude-, Stockwerks oder Raumnummern. Beide Konzepte bieten verschiedene Vor- und Nachteile. So ist die geometrische Modellierung sehr flexibel, da praktisch jedes Gebiet durch eine zwei- oder dreidimensionale Figur dargestellt werden kann. Auf der anderen Seite sind geometrische Modelle, beispielsweise eines Gebäudes und seiner Räume, sehr aufwendig zu erstellen. Symbolische Modelle sind dagegen mit vergleichsweise wenig Aufwand zu erstellen. Im Allgemeinen genügt hierzu die Festlegung der Menge der Lokationen, ihrer Adressen und der notwendigen Beziehungen zwischen den Lokationen, beispielsweise die Beschreibung, dass eine bestimmte Lokation eine andere enthält. Da sich ein symbolisches Modell an den Lokationen, Relationen und Adressen der physischen Welt orientiert, sind entsprechende Beschreibungen und Adressen für den Benutzer intuitiv verständlich. Auf der anderen Seite wird die Adressierung auf die festgelegten Lokationen des Modells eingeschränkt, wohingegen ein Sender mit einer geometrischen Beschreibung beliebige Gebiete als Zielgebiet definieren kann.

Beide Formen der Adressierung sind für Geocast relevant und für verschiedene Szenarien notwendig. So sind symbolische Adressen beispielsweise insbesondere für Innenraumanwendungen sehr interessant, da sie den Benutzer in die Lage versetzen, typische Lokationen der physischen Welt wie Räume oder Stockwerke mittels ihrer natürlichen Adressen zu beschreiben. Geometrische Adressen bieten dagegen vor allem im Außenraumbereich bei der Adressierung Vorteile, weil mit ihnen auch in nicht weiter strukturierten Gebieten beliebige Zielgebiete definiert werden können.

Ferner zeigt die Liste der in Abschnitt 1.1.1 aufgeführten aktuellen Positionierungs-technologien, dass in der Praxis sowohl Systeme mit geometrischer Ausgabe wie GPS als auch symbolischer Ausgabe, wie z.B. RFID- oder Infrarot-basierte Systeme, gleichzeitig zum Einsatz kommen werden, vor allem, wenn sowohl Szenarien in als auch außerhalb von Gebäuden betrachtet werden. Zur Nutzung dieser Systeme sind jeweils entsprechende Lokationsmodelle notwendig.

Hieraus ergibt sich die Frage, mit welchen Modellierungskonzepten ein entsprechendes *hybrides Lokationsmodell*, das geometrische und symbolische Beschreibung vereint und das insbesondere für die ortsbezogene Kommunikation geeignet ist, beschrieben werden kann.

Hierbei ist auch zu beachten, dass Positionen im Allgemeinen nicht exakt durch ein Positionierungssystem bestimmt werden, sondern immer mit einem gewissen Fehler behaftet sind. Das Geocast-System muss daher in der Lage sein, mit Hilfe eines geeigneten Lokationsmodells und Konzepten zur Beschreibung *unscharfer Lokationen* trotz der Un-genauigkeit einer Empfängerposition einen Vergleich mit einem definierten Zielgebiet einer Nachricht durchzuführen. Das oben skizzierte Beispiel einer Nachricht an eine Wagen eines Zuges zeigt außerdem die Notwendigkeit der Integration *mobiler Zielgebiete*.

Das zweite Teilziel ist die Realisierung skalierbarer Geocast-Vermittlungsverfahren. Die oben beschriebenen Anwendungsszenarien verdeutlichen bereits, dass die adressierten Gruppen aus einer großen Zahl an Empfängern bestehen können. So ist es zum Beispiel durchaus vorstellbar, dass Nachrichten an ganze Stadtteile gesendet werden. Ferner ist in einem global einsetzbaren Geocast-Dienst mit einer Vielzahl von Nachrichten zu rechnen. Hieraus ergibt sich die Frage nach geeigneten *Netzstrukturen und Vermittlungs-algorithmen zur effizienten Vermittlung von Geocast-Nachrichten*. Wie später im Kapitel 3 noch erläutert wird, existieren bereits effiziente Vermittlungsverfahren für geometrisch adressierte Nachrichten. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt daher auf der Vermittlung symbolisch adressierter Nachrichten.

Eine effiziente globale Vermittlung von Geocast-Nachrichten erfordert eine geeignete Infrastruktur für die Vermittlung. Theoretisch kann die Geocast-Vermittlung direkt auf der Vermittlungsschicht (Schicht 3 des OSI-Referenzmodells [Int96]) implementiert werden. Hierfür wäre allerdings eine für ein globales Geocast-System aufwendige Modifikation der IP-Vermittlungsinfrastruktur notwendig. Es stellt sich daher die Frage, wie eine effiziente Vermittlung in einem dem IP-Netz überlagerten so genannten *Overlay-Netz* realisiert werden kann. Insbesondere sind hierfür spezielle Strukturen des Overlay-Netzes zu definieren, die eine geographische Vermittlung ermöglichen.

1.3 Beiträge und Struktur der Arbeit

Entsprechend der oben genannten Ziele leistet diese Arbeit zwei Hauptbeiträge (in Klammern sind jeweils die Referenzen auf die entsprechenden Abschnitte dieser Arbeit angegeben, so dass gleichzeitig ein Überblick über den weiteren Aufbau der Arbeit gegeben ist):

- Modellierungskonzepte hybrider Lokationsmodelle für die ortsbezogene Kommunikation (Kapitel 2)
- Skalierbare Geocast-Vermittlungsverfahren für symbolische Lokationsmodelle (Kapitel 3)

1.3.1 Hybrides Lokationsmodell

Die in Kapitel 2 entworfenen Modelle lassen sich wie in Abbildung 1.1 dargestellt weiter untergliedern, so dass sich im Detail die folgenden Beiträge bezüglich der Lokationsmodellierung ergeben:

- *Hierarchische symbolische Lokationsmodelle und Adressierungskonzepte* (Abschnitt 2.4.2): Die symbolischen Modelle basieren auf einer Menge von natürlichen Lokationen wie Gebäuden und Räumen und ermöglichen somit eine intuitive Beschreibung bei gleichzeitig (im Vergleich zu geometrischen Modellen) einfachen Beschreibungen. Sie sind grundsätzlich hierarchisch anhand der räumlichen Inklusionsbeziehung strukturiert. Die Modellierung dieser topologischen Relation ermöglicht insbesondere den für Geocast wichtigen Vergleich von Zielgebieten und Empfängerpositionen bezüglich der räumlichen Inklusion. Die Adressierung von Lokationen erfolgt aufgrund hierarchischer Lokationsbezeichner. Im Detail werden zwei Unterklassen der hierarchischen Modelle betrachtet:
 - *Baumbasiertes Modell*: Diese Subklasse der hierarchischen Modelle bilden keine überlappenden Lokationen ab.
 - *Verbandsbasiertes Modell*: Mit Hilfe dieses im Vergleich zum Lokationsbaum mächtigeren Modells können auch räumlich überlappende Lokationen modelliert werden.
- *Geometrische Lokationsmodelle und Adressierungskonzepte* (Abschnitt 2.4.1): Diese Modelle beschreiben Ziellokationen und Empfängerpositionen durch geometrische Figuren. Entsprechend der Komplexität werden die folgenden Subklassen unterschieden:
 - *Zweidimensionales Modell*, bestehend aus 2D-Figuren wie Punkten, Polygone, usw.
 - *2,5-dimensionales Modell*, bestehend aus 2D-Figuren und zusätzlichen Höheninformationen.

- *Hybrides Lokationsmodell:* (Abschnitt 2.4.3ff) Dieses Modell integriert die vorgeschlagenen symbolischen und geometrischen Modelle mit Hilfe der folgenden Konzepte:
 - *Hybride Beschreibung und Approximation:* Lokationen können sowohl symbolisch als auch geometrisch modelliert werden. Diese Beschreibung kann auch approximiert erfolgen. Beispielsweise kann einer Lokation anstatt einer exakten geometrischen Ausdehnung eine vereinfachte Ausdehnung zugewiesen werden. Insbesondere können geometrische Ausdehnungen in der Lokationshierarchie „vererbt“ werden, so dass jeder Lokation eine (approximierte) geometrische Ausdehnung zugewiesen wird, ohne eine durchgängige (aufwändige) exakte geometrische Modellierung vorauszusetzen. Eine solche Zuordnung ist insbesondere für den Vergleich heterogen definierter Zielgebiete und Empfängerpositionen erforderlich, zum Beispiel für den Vergleich eines geometrisch definierten Zielgebiets mit einer symbolisch definierten Empfängerposition.
 - *Lokale Teilmodelle und Referenzsysteme:* Das vorgeschlagene Modellierungskonzept bietet die Möglichkeit, rein geometrisch oder symbolisch modellierte Teilmodelle in ein globales Modell zu integrieren. Hierfür werden insbesondere Konzepte zur Definition lokaler Referenzsysteme und Transformation von Koordinaten verschiedener Systeme benötigt, um eine durchgängige Vergleichbarkeit von Zielgebieten und Empfängerpositionen sicherzustellen.
 - *Vergleichsoperationen für geometrische und symbolische Lokationen:* Der Hauptzweck der vorgeschlagenen Modelle ist neben der Bestimmung von Zielgebieten und Empfängerpositionen insbesondere deren Vergleich. Die durch das hybride Modell integrierten geometrischen und symbolischen Modellierungskonzepte erfordern entsprechende Vergleichsoperationen. Diese müssen insbesondere auch den *Vergleich ungenauer (approximierter) Lokationen* und den *Vergleich heterogener Lokationen* (symbolische und geometrisch, verschiedene lokale Teilmodelle) ermöglichen.
 - *Integration mobiler Teilmodelle:* Die vorgeschlagenen Modellierungskonzepte ermöglichen schließlich auch die Integration mobiler Objekte, die selbst als Ziellokationen dienen können, beispielsweise eines Zuges mit seinen untergeordneten Lokationen (Wagen). Hierfür wird das Konzept der lokalen Referenzsysteme erweitert, um solche mobilen Lokationen im Gesamtmodell zu verankern und mobile Lokationen durch geeignete Adressierungskonzepte bestimmen zu können.

1.3.2 Symbolische Geocast-Vermittlungsverfahren

Aufbauend auf den Lokationsmodellierungskonzepten widmet sich Kapitel 3 skalierbaren Geocast-Vermittlungsverfahren. Der Fokus liegt hier insbesondere auf Geocast-

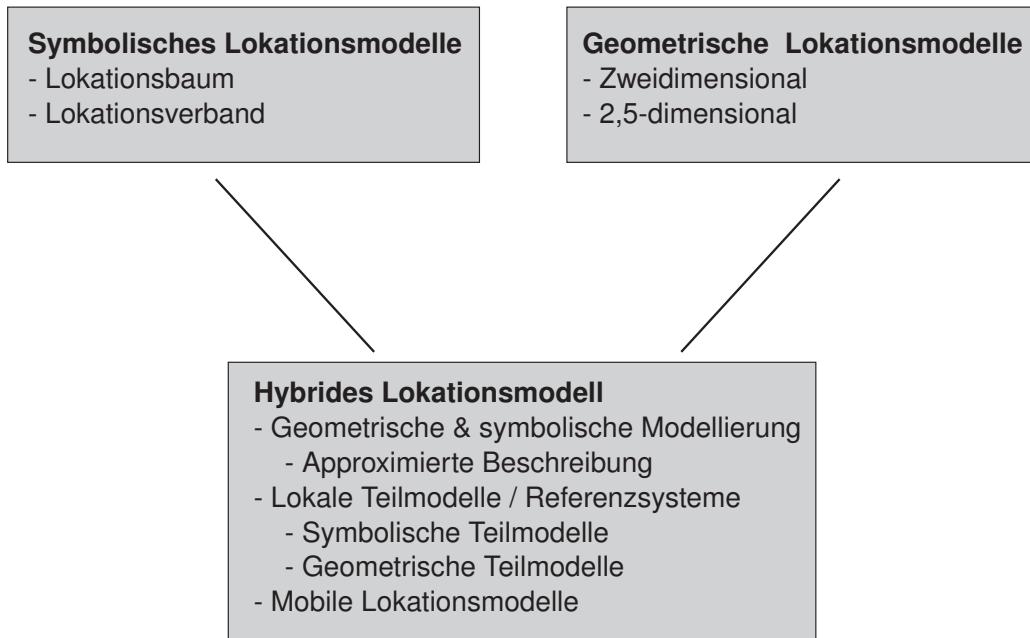


Abbildung 1.1: Modellierungskonzepte (Übersicht)

Protokollen zur Vermittlung symbolisch adressierter Nachrichten (kurz: symbolische Geocast-Protokolle).

Die Beiträge im Bereich der symbolischen Geocast-Protokolle lassen sich anhand der vorgeschlagenen Ansätze wie folgt weiter untergliedern (vgl. Abbildung 1.2):

- *Verzeichnisbasierter Ansatz* (Abschnitt 3.5): Dieser Ansatz verwendet für die Vermittlung von symbolischen Geocast-Nachrichten IP-Unicast- oder IP-Multicast-Vermittlungsprotokolle. Vereinfacht ausgedrückt werden zunächst mit Hilfe eines Verzeichnisses die Empfänger der Nachricht – genauer deren IP-Adressen – aufgrund der Zielgebietsadresse der Geocast-Nachricht ermittelt. An diese IP-Adressen wird die Geocast-Nachricht mittels herkömmlicher oder optimierter IP-Unicast oder -Multicast-Protokolle zugestellt. Entsprechend der verwendeten IP-Vermittlungsprotokolle werden in dieser Arbeit zwei Ansätze vorgeschlagen:
 - *Verzeichnisbasierter Ansatz mit Unicast-basierter Vermittlung*: Dieser einfache Ansatz adressiert die Empfänger durch mehrere Unicast-Nachrichten. Er eignet sich somit nur für kleinere Empfängermengen.
 - *Verzeichnisbasierter Ansatz mit Multicast-basierter Vermittlung*: Dieser Ansatz verwendet IP-Multicast-Protokolle für die Vermittlung der Nachricht. Bei fein-granularen Lokationsmodellen ergibt sich dabei die Schwierigkeit des Umgangs mit großen Mengen an IP-Multicast-Gruppen, da jeder Lokation eine entsprechende Gruppe zugeordnet wird. Diese Arbeit schlägt daher die Verwendung von so genanntem *Expliziten Multicast-Protokolls (Xcast)* vor. Dieses Multicast-Verfahren verwendet für die Gruppedefinition die (expliziten)

IP-Unicast-Adressen der Empfänger. Im Gegensatz zum IP-Unicast-basierten Ansatz werden aber keine redundanten Nachrichtenkopien bei der Vermittlung erzeugt. Allerdings führt die explizite Auflistung der Empfängeradressen in der Nachricht zu einem großen zusätzlichen Aufwand, so dass auch dieses Verfahren nur für kleinere bis mittlere Gruppengrößen einsetzbar ist.

- *Geocast-Overlay-Netze*: Im Gegensatz zu den verzeichnisbasierten Ansätzen mit IP-basierter Unicast- oder Multicast-Vermittlung basieren die in dieser Arbeit betrachteten Overlay-Netz-basierten Ansätze auf einem der IP-Infrastruktur überlagerten (logischen) Overlay-Netz, das speziell auf die Anforderungen der Geocast-Kommunikation ausgerichtet ist. Diese Ansätze vermitteln Nachrichten direkt auf Grundlage der symbolischen Zielgebietsadresse. Das heißt, es erfolgt nicht zunächst eine Abbildung der Zielgebietsadresse auf eine zur Vermittlung verwendete (IP-)Adresse, wie das bei den verzeichnisbasierten Ansätzen der Fall ist. Vielmehr wird durch eine spezielle Overlay-Netz-Topologie, die sich an der Struktur des symbolischen Lokationsmodells orientiert, die Möglichkeit geschaffen, Nachrichten direkt anhand des symbolischen Zielgebietsadresses zu vermitteln. Entsprechend der eingeführten symbolischen Modelle (Baum und Verband) werden zwei Varianten von Geocast-Overlay-Netzen vorgeschlagen:
 - *Vermaschtes Overlay-Netz* (Abschnitt 3.6): Dieses Netz basiert auf einer baumförmigen Basistopologie, die durch zusätzliche Direktverbindungen bezüglich der Nachrichtenpfadlänge optimiert und somit zu einem Netz erweitert wird. Durch diese Direktverbindungen wird die Skalierbarkeit des Ansatzes erhöht. Insbesondere werden für hierarchische Strukturen kritische Flaschenhälse an der Spitze der Hierarchie vermieden und die Last auf das unterlagerte Netz wird verringert. Hierzu werden verschiedene *Strategien und Algorithmen zur Einrichtung von Direktverbindungen* vorgeschlagen.
 - *Verbandsbasiertes Overlay-Netz* (Abschnitt 3.7): Die Grundstruktur dieses Overlay-Netzes ist an den Lokationsverband des verbandsbasierten Lokationsmodells angelehnt. Hierfür werden entsprechend angepasste Vermittlungsalgorithmen vorgeschlagen.
 - *Optimierte Nachrichtenvermittlung durch IP-Multicast*: (Abschnitt 3.8) Neben der reinen Overlay-Netz-basierten Vermittlung stellt diese Arbeit außerdem einen Ansatz zur Integration eines IP-Multicast-Protokolls – Source-specific Multicast (SSM) – in die Overlay-Netz-basierten Verfahren vor. Das IP-Multicast-Protokoll ermöglicht dabei eine optimierte Vermittlung für große Geocast-Datenströme an bestimmte Zielgebiete, für die bei Bedarf Multicast-Gruppen eingerichtet werden. Die bedarfsgetriebene Einrichtung von Gruppen, bei dem das Overlay-Netz zur Einrichtung der Gruppe dient, zusammen mit den speziellen Eigenschaften von SSM vermeiden die Nachteile des verzeichnisbasierten Ansatzes mit Multicast-basierter Vermittlung (siehe oben). Da IP-Multicast in diesem Ansatz als reine Optimierung nicht aber als not-

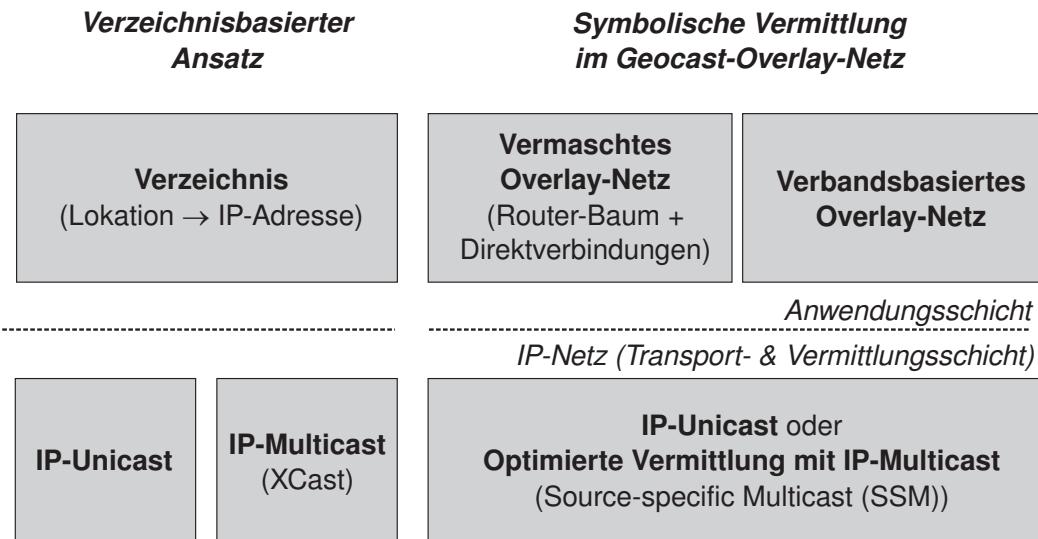


Abbildung 1.2: Vermittlungsansätze (Übersicht)

wendige Voraussetzung konzipiert wurde, bleibt der Ansatz auch ohne Unterstützung durch die IP-Infrastruktur für IP-Multicast anwendbar.

- *Geocast-Vermittlungsprotokolle für mobile Zielgebiete*: (Abschnitt 3.9, vergleiche Abbildung 1.3) Für die im Lokationsmodell vorgeschlagenen mobilen Zielgebiete werden schließlich geeignete Vermittlungskonzepte vorgeschlagen. Hierbei werden zwei Fälle unterschieden: Im ersten Fall wird eine Nachricht an ein (stationäres) Gebiet gesendet, welches das mobile Objekt enthält, beispielsweise eine Nachricht an eine Stadt, in der sich ein Zug aufhält. In diesem Fall sollen auch die Empfänger innerhalb des mobilen Objekts – im Beispiel die Passagiere des Zuges – die Nachricht empfangen, auch wenn sie ein Zugangsnetz innerhalb des mobilen Objekts – zum Beispiel ein WLAN des Zuges – verwenden. Für diesen Fall wird die so genannte *Stellvertretervermittlung* vorgeschlagen, bei der eine dedizierte Geocast-Komponente des mobilen Objekts die Geocast-Nachricht stellvertretend für alle Objekte im Zug entgegennimmt und an diese weiterleitet. Im zweiten Fall wird ein Zielgebiet innerhalb des mobilen Objekts adressiert, zum Beispiel ein Wagen des Zuges. Für diesen Fall werden zwei Ansätze vorgeschlagen. Die *Mobile-Geocast-Vermittlung*, welche auf herkömmlichen IP-basierten Vermittlungsprotokollen mit Mobilitätsunterstützung, zum Beispiel Mobile-IP, aufbauen, um die Nachricht an das mobile Objekt zuzustellen, sowie der *Geocast-in-Geocast-Tunnel*, bei dem die Geocast-Nachricht an das mobile Zielgebiet in eine weitere Geocast-Nachricht gekapselt wird, die mit einem herkömmlichen (stationären) Geocast an ein Gebiet gesendet wird, welches das mobile Objekt und somit auch alle Empfänger innerhalb des mobilen Objekts – dem eigentlichen Zielgebiet – enthält.

Die Geocast-Vermittlungsprotokolle werden in Abschnitt 3.10 bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit evaluiert, bevor die Arbeit in Kapitel 4 mit einem kurzen Resümee und

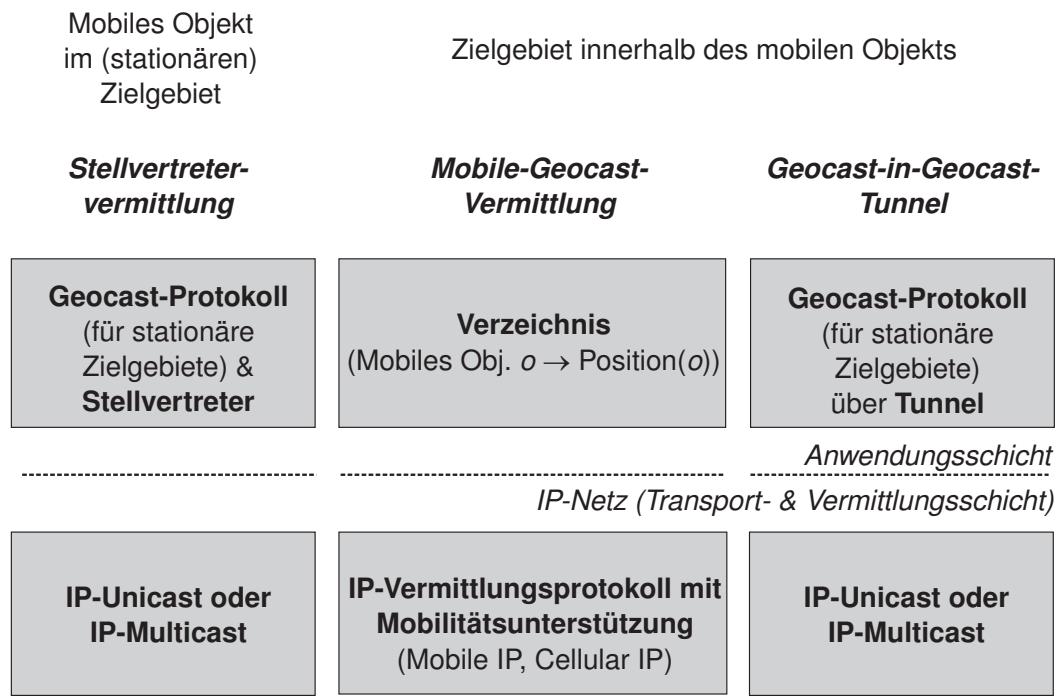


Abbildung 1.3: Vermittlungsansätze für mobile Zielgebiete (Übersicht)

einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten abgeschlossen wird.

Kapitel 2

Feingranulare Lokationsmodelle und Adressierungskonzepte für die ortsbezogene Kommunikation

2.1 Übersicht

Um ortsbezogene Nachrichten Empfängern zuordnen zu können, ist ein geeignetes Lokationsmodell zur Definition der Zielgebiete von Nachrichten sowie zur Definition von Empfängerpositionen erforderlich. Nach Stachowiak sind wesentliche Eigenschaft eines Modells im Allgemeinen das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal und das pragmatische Merkmal:

Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können (*Abbildungsmerkmal*). ... Modelle erfassen im Allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellbenutzern relevant scheinen (*Verkürzungsmerkmal*). ... Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion (*Pragmatisches Merkmal*). [Sta73]

Entsprechend bildet ein Lokationsmodell reale Lokationen der physischen Welt in einer Form ab, die von den Komponenten des Geocast-Systems interpretiert werden kann, so dass diese insbesondere feststellen können, ob sich eine Empfänger im adressierten Zielgebiet der Nachricht befindet und die Nachricht somit an diesen Empfänger auszuliefern ist. Ein zum Lokationsmodell passendes Adressierungskonzept bestimmt ferner, wie Orte adressiert und Empfängerpositionen bezeichnet werden können.

In diesem Kapitel wird ein für die ortsbezogene Kommunikation geeignetes Lokationsmodell und ein entsprechendes Adressierungskonzept auf Basis dieses Modells vorgestellt. Hierzu werden zunächst in Abschnitt 2.2 grundlegende Klassen von Lokationsmodellen identifiziert und anhand der Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition die genaue Semantik der Empfängergruppe einer ortsbezogenen Nachricht definiert, die bestimmt, ob sich eine Empfänger im Zielgebiet der Nachricht befindet. In

Abschnitt 2.4 wird ein Basismodell entworfen, dass sowohl die flexible geometrische als auch die intuitive symbolische Adressierung von Lokationen unterstützt. Dieses Basismodell wird schließlich in Abschnitt 2.5 um die Unterstützung lokaler Modelle mit eingeschränkter räumlicher Abdeckung und die Möglichkeit zur Adressierung mobiler Zielgebiete erweitert.

2.2 Grundlagen und Verwandte Arbeiten

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst eine Klassifizierung der grundlegenden Arten von Lokationsmodellen. Es werden des Weiteren die verwandten Arbeiten aus dem Bereich der Lokationsmodellierung vorgestellt. Anschließend werden die konkreten Anforderungen an ein Lokationsmodell zur feingranularen ortsbezogenen Kommunikation definiert. Dieses Modell dient primär der Definition des Zielgebiets einer Nachricht, der Empfängerposition sowie der Bestimmung der Empfängergruppe einer ortsbezogenen Nachricht durch den Vergleich von Zielgebiet und Empfängerposition anhand der entsprechenden räumlichen Relation zwischen Position und Zielgebiet. Die formale Definition der Empfängergruppe einer ortsbezogenen Nachricht anhand der räumlichen Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition bildet schließlich den Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen dieser Arbeit.

2.2.1 Klassifizierung von Lokationsmodellen

Lokationsmodelle beschreiben einen Ausschnitt der physischen Umgebung. Im Kontext der ortsbezogenen Kommunikation sind das insbesondere die Orte, die adressiert werden können und an denen sich Empfänger aufhalten. Für eine systematische Betrachtung der Eigenschaften der verschiedenen möglichen Lokationsmodelle erfolgt zunächst eine grobe Klassifizierung der Ansätze zur Lokationsmodellierung (vergleiche Abbildung 2.1). Die einzelnen Modelle werden dabei im Laufe der Arbeit weiter detailliert. In diesem Abschnitt erfolgt daher nur eine allgemeine Einführung.

Grundsätzlich bilden alle Lokationsmodelle eine Menge ausgezeichneter Lokationen sowie bestimmte räumliche Relationen zwischen diesen Lokationen ab. Ausgezeichnete Lokationen können beispielsweise Länder, Städte, Gebäude oder Räume sein. Der Hauptunterschied zwischen den verschiedenen Modellen besteht in der Art der Beschreibung dieser Lokationen sowie der abgebildeten räumlichen Relationen zwischen den Lokationen.

Bereits Leonhardt unterscheidet in [Leo98] drei grundsätzliche Formen der Lokationsmodellierung: Geometrische und symbolische Lokationsmodelle sowie die Kombination beider Arten in Form hybrider Lokationsmodelle. Eine feinere Untergliederung wird außerdem in unserem Übersichtsartikel in [BD05] vorgenommen. Insgesamt ergeben sich die folgenden Klassen und Subklassen der Lokationsmodelle (vergleiche auch Abbildung 2.1).

Geometrische Lokationsmodelle benutzen für die Beschreibung von Lokationen geometrische Figuren, die mit Hilfe von Koordinaten in Bezug zu einem geometrischen

Referenzsystem definiert werden. Geometrische Figuren können dabei zwei-, 2,5- oder dreidimensional sein, so dass sich entsprechende Unterklassen der geometrischen Modelle ergeben. Typische Beispiele für zwei und dreidimensionale geometrisch definierte Lokationen sind Polygone oder Quader.

Symbolische Lokationsmodelle bestehen ebenfalls aus einer Menge von ausgezeichneten Lokationen. Lokationen werden hierbei durch abstrakte symbolische Bezeichner wie Raum- und Stockwerksnummern oder Städtenamen bezeichnet. Da diesen Modellen kein geometrischer Raum zugrunde liegt, aus dem sich räumliche Beziehungen zwischen Lokationen ableiten ließen, werden entsprechende räumliche Relationen explizit im Modell definiert. Die von den einzelnen Modellen unterstützten räumlichen Relationen führen jeweils zu verschiedene Subklassen von symbolischen Modellen.

So unterscheidet Leonhardt in [Leo98] zellen- und zonenbasierte symbolische Modelle. In *zellenbasierten Modellen* sind die einzelnen symbolischen Lokationen disjunkt, während sie sich in *zonenbasierten Modellen* überlappen können. In zellenbasierten Modellen können Lokationen also nur auf Gleichheit und Ungleichheit überprüft werden, während in zonenbasierten Modellen auch ein Test auf Überlappung möglich ist. Sowohl zonenbasierte als auch zellenbasierte Modelle gehören den *flachen Modellen* an, da keine hierarchische Ordnung zwischen Lokationen definiert wird.

Neben diesen flachen Modellen existierend des Weiteren *hierarchische Modelle*, die auch die Inklusionsbeziehung zwischen Lokationen modellieren. Mit ihnen können beispielsweise die Stockwerke eines Gebäudes dem umgebenden Gebäude untergeordnet werden. Je nachdem, ob in der Hierarchie überlappende Lokationen abgebildet werden können, werden *baumförmige* und *verbandsbasierte* symbolische Lokationsmodelle als Subklassen der hierarchischen Modelle unterschieden. Modelle basierend auf dem Region Connection Calculus (RCC5) unterscheiden des Weiteren auch die Begrenzung einer Lokationen um so zum Beispiel festzustellen, ob sich der Rand zweier Lokationen berührt oder nicht. Für eine detaillierte Diskussion dieser Modelle sei an dieser Stelle auf Abschnitt 2.3.2 verwiesen.

In [BD05] führen wir außerdem mengenbasierte und graphbasierte Modelle ein. Das *mengenbasierte Modelle* modelliert Lokationen auf Grundlage einer Menge (atomarer) Lokationen. Eine Lokation ist somit eine Teilmenge der Potenzmenge der atomaren Lokationen. Offensichtlich kann mit Hilfe der Mengenoperationen überprüft werden, ob Mengen identisch, disjunkt, ineinander enthalten (Inklusion) oder partiell überlappend sind. Damit sind mengenbasierte und hierarchische Modelle in Bezug auf die unterstützten räumlichen Relationen sehr ähnlich. Der Hauptunterschied liegt in der Art der Modellierung. Während mengenbasierte Modelle diese Relationen auf Mengenoperationen zurückführen, werden entsprechende Relationen in hierarchischen Modellen explizit modelliert (zum Beispiel, „Lokation 1“ ist Teil von „Lokation 2“).

Graphbasierte Modelle basieren wie der Name es bereits suggeriert auf einen Gra-

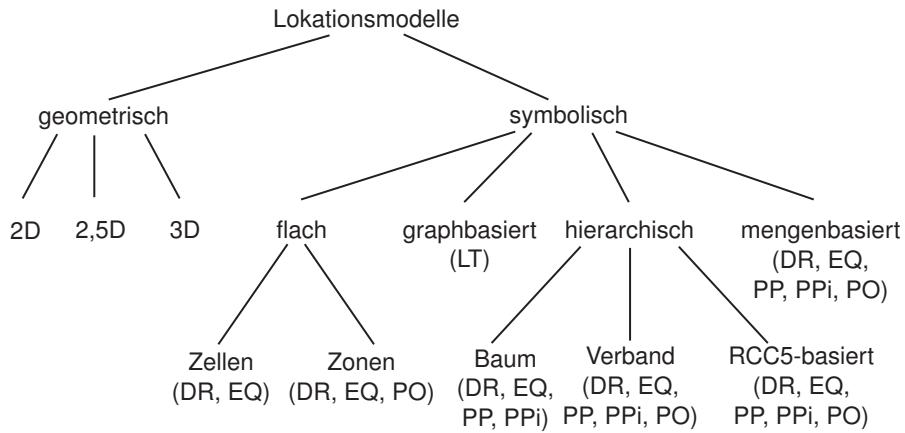


Abbildung 2.1: Lokationsmodellklassifizierung. Für baumförmige und verbandsbasierte Lokationsmodelle gelten zusätzlich die in den Abschnitten 2.4.2.2 und 2.4.2.2 beschriebenen Modellierungsrichtlinien. Für die symbolischen Modelle wurden die jeweils zugrunde liegenden modellierten Relationen des Region Connection Calculus (RCC) in Klammern angegeben (vergleiche Abschnitt 2.3.2.)

phen, dessen Knoten die Lokationen darstellen und dessen Kanten die Beziehung „ist verbunden mit“ (engl. linked to, in Abbildung 2.1 mit „LT“ bezeichnet) modellieren. Durch Gewichtung der Kanten können außerdem Distanzen zwischen Lokationen modelliert werden. Die genaue Semantik der Relation „ist verbunden mit“ sowie des Gewichts ist dabei anwendungsabhängig. So können Kanten beispielsweise mögliche physische Übergänge wie Türen zwischen Räumen modellieren oder auch die Möglichkeit zur drahtlosen Kommunikationen zwischen zwei Lokationen in einem drahtlosen LAN modellieren.

Hybride Lokationsmodelle bestehen allgemein aus einer Kombination zweier oder mehrerer verschiedener Modellgrundformen. Im Kontext dieser Arbeit wird, wenn nicht anders angegeben, unter einem hybriden Lokationsmodell die Kombination geometrischer und symbolischer Lokationsmodelle verstanden. Durch die Zuordnung von geometrischen Informationen zu symbolischen Lokationen können Ziele und Positionen sowohl durch geometrische Figuren als auch durch symbolische Adressen bestimmt und auch heterogene Ortsdarstellungen – beispielsweise ein geometrisches Zielgebiet und eine symbolische Empfängerposition – miteinander verglichen werden.

Denkbar sind allerdings auch weitere hybride Modelle, zum Beispiel die Kombination eines hierarchischen und eines graphbasierten symbolischen Lokationsmodells, wobei diese Kombination für diese Arbeit keine besondere Relevanz besitzt und daher nicht weiter diskutiert wird.

Zweifelsohne sind sowohl die geometrische als auch die symbolische Bestimmung von Orten für verschiedene Anwendungen der ortsbezogenen Kommunikation von Relevanz. Ein übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist daher die Unterstützung der hybriden

ortsbezogenen Adressierung. Im Folgende wird ein entsprechendes hybrides Lokationsmodell entworfen, nachdem zunächst die verwandten Arbeiten im Bereich der Lokationsmodellierung im nächsten Abschnitt vorgestellt wurden.

2.2.2 Verwandte Arbeiten

Lokationsmodelle bilden die Grundlage jedes Systems oder Anwendung, die mit räumlichen Daten umgehen, angefangen von Positionierungssystemen, über geographischen Informationssysteme (GIS) und räumliche Datenbanken bis hin zu ortsbezogenen Anwendungen wie Navigationssysteme. Viele dieser Arbeiten setzen dabei implizit ein bestimmtes Lokationsmodell voraus und wenden dieses an, behandeln selbst aber nicht die Lokationsmodellierung. An dieser Stelle sollen gezielt diejenigen verwandten Arbeiten vorgestellt werden, die sich *explizit* mit der Lokationsmodellierung befassen und entsprechende Modelle vorschlagen.

Region Connection Calculus und 4-Intersection-Model: Der Region Connection Calculus (RCC) [RC89] nach Randell, Cui und Cohn und das 4-Intersection-Model¹ nach Egenhofer [EH90, EF91] beschreiben jeweils Mengen von möglichen Relationen in einem topologischen Raum. Der darauf aufbauende Kalkül dient dem qualitativen räumlichen Schließen (engl. qualitative spatial reasoning) über räumlichen Konfigurationen. Der RCC und das 4-Intersection-Model, die unabhängig und parallel entwickelt wurden, sind dabei grundsätzlich identisch², weswegen die folgende Beschreibung des RCC auch auf das 4-Intersection-Model übertragbar ist.

Beim RCC werden entsprechend der modellierten Relationen zwei verschiedene Varianten unterschieden, nämlich der RCC8 und der RCC5. Der RCC5 beschreibt fünf topologische Relationen zwischen Paaren von Regionen: Zwei Gebiete können identisch oder disjunkt sein, partiell überlappen, oder ein Gebiet kann ein anderes enthalten oder ist in einem anderen enthalten. Der RCC8 berücksichtigt zusätzlich den Rand einer Region und kann somit eine feinere Unterscheidung vornehmen und Situationen beschreiben, in denen sich der Rand zweier Regionen berührt, sowohl extern als auch intern. Das 4-Intersection-Model betrachtet dieselben Relationen wie der RCC8.

Die Relationen des RCC dienen in dieser Arbeit als Grundlage für die Modellierung symbolischer Lokationen und deren Relationen. Eine detaillierte Diskussion über die dabei für die ortsbezogene Kommunikation relevanten Relationen erfolgt in Abschnitt 2.3.2 dieser Arbeit, so dass an dieser Stelle auf diesen Abschnitt verwiesen wird.

¹Das 4-Intersection-Model wurde später zum 9-Intersection-Model erweitert [ESM93]. Bei der Betrachtung zweier Gebiete ergeben sich allerdings dieselben acht topologischen Relationen, die auch vom 4-Intersection-Model unterschieden werden [EH91]. Unterschiede ergeben sich dagegen beim Vergleich von flächigen und linienförmigen Beschreibungen; hier können mit Hilfe des 9-Intersection-Model zusätzliche topologische Relationen unterschieden werden. Da in dieser Arbeit sowohl Geocast-Zielgebiete als auch Empfängerpositionen als Gebiete modelliert werden, ergeben sich für diese Arbeit allerdings keine Unterschiede zwischen 4- und 9-Intersection-Model, so dass im Folgenden stellvertretend immer das 4-Intersection-Model herangezogen wird.

²Das 4-Intersection-Model entspricht dem RCC8; das RCC5 unterstützt dagegen nicht alle topologische Relationen des 4-Intersection-Models.

Nexus-Lokationsmodell: Das Nexus-Projekt hat als Ziel die Erforschung von Methoden und Mechanismen zur Unterstützung kontextbezogener Anwendung [HKL⁺99, LCG⁺09]. Unter Kontextinformationen sind hier insbesondere ortsbezogene und räumliche Informationen zu verstehen. Den Kern des Nexus-System bildet eine Plattform zur Verwaltung räumlicher Kontextinformationen, wobei sowohl statische Informationen wie Karteninformationen oder Points of Interests (POI) als auch dynamische Informationen von in der Umgebung installierten Sensoren verwaltet werden können [NGSV01]. Teil der Plattform sind neben den Diensten zur Datenverwaltung auch zusätzliche Dienste, beispielsweise ein Dienst zur Beobachtung räumlicher Ereignisse oder insbesondere der Geocast-Dienst, der innerhalb dieser Arbeit entwickelt wurde.

Die Grundlage der Verwaltung von räumlichen Daten bilden dabei geeignete Lokationsmodelle. Zu Beginn basierte das Nexus-Modell [BDG⁺04] auf einem globalen geometrischen Referenzsystem. Koordinaten wurden durch Längen- und Breitengrade bezüglich des globalen WGS84-Systems beschrieben und dienten der Beschreibung zweidimensionaler geometrischer Figuren zur Modellierung der Positionen und Ausdehnungen von geographischen Objekten wie Gebäuden oder Straßen.

Globale geometrische Koordinaten bilden auch die Grundlage für spezielle Nexus-Dienste. Hervorzuheben ist hier insbesondere der Nexus-Lokationsdienst zur skalierbaren Verwaltung mobiler Objekte. Dieser Dienst unterstützt neben Anfragen nach der Position eines mobilen Objekts auch Bereichsanfragen nach allen Objekten innerhalb eines bestimmten geographischen Gebiets. Insbesondere Bereichsanfragen haben dabei einen Bezug zur ortsbezogenen Kommunikation, bei der während der Nachrichtenvermittlung schließlich auch alle Objekte in einem bestimmten Bereich ermittelt werden. Neben der einfachen Modellierung einer Objektposition durch eine punktförmige Koordinate unterstützt dieser Dienst auch unscharfe Objektpositionen in Form von Gebieten und berücksichtigt diese ungenauen Informationen auch während der Anfrageverarbeitung durch Schnitt des angefragten Gebiets und des aktuellen Gebiets des Objekts. Dieses Konzept lässt sich grundsätzlich auf die Behandlung unscharfer geometrischer Empfängerpositionen in der Geocast-Kommunikation dieser Arbeit übertragen. In dieser Arbeit wird außerdem ein Konzept zum Umgang mit unscharfen symbolischen Empfängerpositionen vorgeschlagen.

In weiteren Arbeiten wurde vorgeschlagen, das Konzept der geometrischen Modelle durch symbolische Modelle in Form von hierarchischen und graphbasierten Modellen zu ergänzen [BBR01]. In [Dro03] wurden außerdem verschiedene Konzepte für einen auf symbolischen Lokationsmodellen basierenden Lokationsdienst analysiert. Insbesondere wurde hier auch ein graphbasiertes symbolisches Lokationsmodell vorgeschlagen, das durch zusätzliche Angabe von Kantengewichten eine Abschätzung der Entfernung zwischen symbolischen Lokationen auch ohne eine exakt definierte Geometrie erlaubt.

In einem weiteren Schritt wurde das Nexus-Umgebungsmodell unter Mitwirkung des Autors dieser Arbeit um ein Konzept zur Beschreibung allgemeiner und insbesondere räumlicher Relationen erweitert [ADD⁺04]. Dieses Konzept zur expliziten Modellierung topologischer Relationen bildet die notwendige Voraussetzung zur Beschreibung symbolischer Lokationsmodelle, wie sie in dieser Arbeit vorgeschlagen werden.

Schließlich wurde als Vorläufer dieser Arbeit von Coschurba ein dediziertes feingra-

nulares Adressierungskonzept für Geocast entworfen [CRD02]. Zielgebiete können hier durch hierarchische symbolische Namen als auch durch zwei und 2,5-dimensionale geometrische Figuren bezeichnet werden. Da für die Weiterleitung der Nachrichten ein existierendes Geocast-Verfahren für geometrisch beschriebene Zielgebiete eingesetzt werden sollte, war es außerdem notwendig, jeder symbolischen Lokation eine geometrische Ausdehnung zuzuordnen. Hierfür wurde das Konzept des Gültigkeitsbereiches (engl. scope) eingeführt, der die geometrische Ausdehnung eines symbolischen Modells beschreibt. Die Grundidee des Gültigkeitsbereiches wurde auch in dieser Arbeit für die Einbettung lokaler Lokationsteilmodelle verwendet, allerdings in erweiterter Form, die es zulässt, sowohl lokale symbolische Systeme in übergeordnete geometrische Systeme einzubetten als auch umgekehrt die Einbettung lokaler geometrischer Systeme in ein übergeordnetes symbolisches System ermöglicht. Zusätzlich wurden Koordinatentransformationsvorschriften in das Modell integriert, so dass insgesamt ein durchgängiges Konzept zur Definition lokaler Koordinatensysteme entsteht.

Lokationsmodell nach Leonhardt: Leonhardt gibt in [Leo98] eine der ersten formalen Spezifikationen eines hybriden Lokationsmodells, das sowohl geometrische als auch symbolische Koordinaten unterstützt. Dieses Lokationsmodell wurde als Grundlage eines Lokationsdienstes zur Verwaltung der Positionen von mobilen Objekten entwickelt. Das Modell basiert auf einer Hierarchie von Lokationen – hier als „Domänenmodell“ (engl. domain model) bezeichnet –, die durch Verknüpfung mit geometrischen Informationen zu einem hybriden Modell – hier als „kombiniertes Modell“ (engl. combined model) bezeichnet – erweitert wird. Hiermit werden Abbildungen in beide Richtungen ermöglicht, das heißt, von symbolischen Lokationen auf geometrische Gebiete und von einem geometrischen Gebiet auf seine jeweilige (best angenäherte) symbolische Lokation. Dieses Modell ähnelt somit dem hybriden Basismodell dieser Arbeit. Dieses Basismodell wird in dieser Arbeit um diverse Aspekte erweitert. Zum einen können lokale symbolische oder geometrische (Teil-)Modelle in ein globales Modell integriert werden. Durch solche lokalen Teilmodelle werden ferner auch mobile Teilmodelle unterstützt, welche einem mobilen Objekt, zum Beispiel einem Zug oder Schiff, zugeordnet sind. Für die Integration heterogener Teilmodelle wird außerdem die Möglichkeit zur geometrischen Approximation von symbolischen Lokationen geschaffen, so dass jeder symbolischen Lokation im hybriden Modell eine geometrische Ausdehnung zugeordnet werden kann, auch wenn diese nicht explizit modelliert wurde. Schließlich bietet das Modell die Fähigkeit zum Umgang mit unscharfen (approximierten) Lokationen, insbesondere im Hinblick auf die für Geocast essenzielle Funktion des Vergleiches von Zielgebiet und Empfängerposition bezüglich der räumlichen Inklusion.

Subspaces (Aura-Lokationsmodell): Das Lokationsmodell von Jiang und Steenkiste [JS02], das innerhalb des Aura-Projekts an der Carnegie Mellon University entstanden ist, wurde zur Unterstützung von Ubiquitous-Computing-Systemen entworfen. Es kann beispielsweise dafür eingesetzt werden, Ressourcen an Orten zu finden, zum Beispiel alle Farbdrucker auf dem zweiten Stock eines bestimmten Universitätsgebäudes. Hierfür wurde eine SQL-ähnliche Anfragesprache entworfen, die neben räumlichen Attributen

weitere Attribute wie den Typ einer Objekts (z.B. Farbdrucker) unterstützt. An dieser Stelle soll allerdings nur auf das zugrunde liegende räumliche Modell eingegangen werden.

Ein ausdrückliches Ziel des Aura-Lokationsmodells war die Integration hierarchischer und geometrischer Lokationsmodelle. Hierfür wurde ein hybrides Lokationsmodell vorgeschlagen. Das Grundkonzept dieses Modells basiert auf so genannten *Subspaces*. Subspaces partitionieren den Raum, wobei einzelne Teile wiederum in kleiner Bereiche (die Subspaces) aufgeteilt werden können. Im Allgemeinen erfolgt die Aufteilung anhand natürlicher Lokationen wie Gebäude, Stockwerk oder Raum, wobei die Lokationen mit entsprechenden Namen versehen werden. Das Resultat ist ein so genannter „Space Tree“, ein baumförmiges hierarchisches Modell mit entsprechenden Vater-Kind-Relationen zwischen den Subspaces.

Jedem Subspace kann ein eigenes geometrisches Koordinatensystem zugeordnet werden. Um Koordinaten verschiedener Subspaces miteinander vergleichen zu können, werden hierarchische Transformationsvorschriften definiert, die Koordinaten eines Subspaces in Koordinaten des übergeordneten (Super-)Spaces umrechnen, indem sie einen Pfad in der Hierarchie von einem System zum anderen bestimmen und die jeweiligen lokalen Transformationen verketten.

Subspaces und die Transformation geometrischer Koordinaten aus verschiedenen lokalen Referenzsystemen sind teilweise mit dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Ansatz zur Einbettung lokaler Lokationsmodelle in übergeordnete Modelle vergleichbar. Auch hierfür werden Koordinatentransformationen für die Umrechnung von Koordinaten der lokalen TeilmODELLE eingesetzt, wobei in dieser Arbeit verschiedene Ansätze für die Transformation (neben der hierarchischen Transformation) diskutiert werden. Eine zusätzliche Schwierigkeit bei der Umrechnung geht auf ein grundsätzlich unterschiedliche Annahme dieser Arbeit im Vergleich zum Subspaces-Modell zurück. Das Subspaces-Modell geht davon aus, dass *alle* Subspaces sowohl geometrisch als auch symbolische modelliert sind. In dieser Arbeit wird dagegen auch die Einbettung lokaler symbolischer Modelle in übergeordnete geometrische Modelle und umgekehrt betrachtet. Hierfür werden eingebetteten symbolischen Lokationen approximierte Koordinaten zugewiesen wohingegen das Subspaces-Modell immer von einer exakten geometrischen Modellierung ausgeht. Hierfür werden auch zusätzliche Konzepte zum Umgang mit den resultierenden ungenauen (approximierten) Koordinaten erforderlich. Wesentliche weiter Unterschiede zum Subspaces-Modell sind die Betrachtung von verbandsbasierten anstatt strikt baumförmiger Modellen und die Einbeziehung mobiler Lokationsmodelle.

Lokationsmodell nach Brumitt und Shafer: Wie das oben beschriebene Modell des Aura-Projekts, so stand auch beim Lokationsmodell von Brumitt und Shafer [BS01] die Unterstützung von Ubiquitous-Computing-Anwendungen im Vordergrund. Dieses Modell sollte beispielsweise die Grundlage für räumliche Positions- und Bereichsanfragen bilden, wie „Wo befindet sich Benutzer X gerade?“ oder „Welche Bildschirme sind in der Nähe von Benutzer X?“ Ähnlich wie diese Arbeit, so argumentieren auch Brumitt und Shafer, dass ein geometrisches Modell grundsätzlich gut geeignet ist, solche Anfragen zu beantworten, dass aber ein detailliertes geometrisches Modell vor allem im Innenraumbereich selten verfügbar ist und zusätzlich spezielle Hardware für die genaue geometrische

Positionsbestimmung benötigt werden würde. Sie schlagen daher die Verwendung eines symbolischen Modells – hier als topologisches Modell bezeichnet – vor.

Dieses Lokationsmodell basiert wie das Modell dieser Arbeit auf einer Verbandsstruktur anstatt auf einem einfachen Lokationsbaum. Über die Modellierung der Inklusion hinausgehende Konzepte, insbesondere die Integration geometrischer Koordinaten wird allerdings keine Aussage getroffen. Im Gegensatz hierzu ist das Ziel dieser Arbeit ein hybrides Lokationsmodell, das auch die Integration geometrischer Informationen zulässt, so diese vorhanden sind.

Nimbus-Lokationsmodell: Die Nimbus-Plattform ist eine Plattform für ortsbezogene Anwendungen [Rot05]. Sie dient der Bereitstellung von Lokationsinformationen und bietet darüber hinaus verschiedene Dienste basierend auf Lokationsinformationen an, insbesondere einen symbolischen Geocast-Dienst [Rot03].

Zur Beschreibung semantischer Lokationen verwendet Nimbus ein symbolisches Lokationsmodell. Die Grundlage bildet wie üblich eine Menge von symbolischen Lokationen, wobei Nimbus symbolische Lokationen als „semantische“ Lokationen bezeichnet, da solche Lokationen vom Anwender im Allgemeinen mit einer bestimmten Bedeutung assoziiert werden. Diese Lokationen werden hierarchisch angeordnet, so dass das Nimbus-Modell den hierarchischen symbolischen Lokationsmodellen zugeordnet werden kann. Die Lokationen einer Hierarchie sind dabei strikt baumförmig entsprechend der räumlichen Inklusionsbeziehung angeordnet, das heißt, Lokationen innerhalb der Hierarchie überlappen sich nicht. Den Lokationen werden durch hierarchische Namen ähnlich den Namen des Domain-Name-Systems (DNS) benannt. So steht in diesem Modell `university.hagen.de` beispielsweise für die Universität Hagen.

Als Besonderheit ist das Nimbus-Modell nicht auf eine einzelne Hierarchie beschränkt. Vielmehr können verschiedene Hierarchien mit verschiedenen Bedeutungen existieren, beispielsweise ein Hierarchie mit Ländern, Landkreisen und Städten und eine nach geographischen Einheiten geordnete Hierarchie mit Flüssen, Bergen, usw. Durch die Existenz verschiedener Hierarchien kann eine räumliche Aufteilung entstehen, in der sich Lokationen aus verschiedenen Hierarchien überlappen. Neben der in Hierarchien üblichen Vater-Kind-Relation, die aufgrund der räumlichen Inklusionsbeziehung definiert ist, modelliert Nimbus zusätzlich spezielle Relationen, so genannt Assoziationen, die teilweise überlappende Lokationen miteinander verbinden. Assoziationen werden allerdings nicht zur Erhöhung der Ausdrucksfähigkeit des Modells, sondern zur effizienten Suche innerhalb des (verteilt verwalteten) Modells eingesetzt.

Anstatt verschiedene baumförmige Teilmodelle zu verwenden, basiert das symbolische Modell dieser Arbeit auf einer einheitlichen Hierarchie. Um überlappende Lokationen beschreiben zu können, basiert das dabei angewandte Modellierungskonzept auf einem Verband anstatt auf (mehreren) Bäumen. Somit unterscheiden sich bereits die Modelle konzeptionell was später auch Auswirkungen auf die hierarchischen Vermittlungskonzepte haben wird, die in Kapitel 3 beschrieben werden.

2.3 Anforderungen an das Lokationsmodell und das Adressierungskonzept

Bevor das eigentliche Lokationsmodell vorgestellt wird, werden hier zunächst die Anforderungen an ein solches Modell aus Sicht der Anbieter und Nutzer eines ortsbezogenen Kommunikationsmechanismus definiert.

Hybrides Lokationsmodell: Ein hybrides Lokationsmodell, das sowohl die symbolische als auch die geometrische Definition von Zielgebieten und Empfängerpositionen unterstützt, ist aus verschiedenen Gründen für die ortsbezogene Kommunikation wünschenswert. Aus Sicht eines Senders sind symbolische Lokationen oft deutlich intuitiver anwendbar als geometrische Figuren. Symbolische Lokationen sind ausgezeichnete Orte, von denen Benutzer konkrete Vorstellungen haben und mit denen sie eine entsprechende Bedeutung verbinden (symbolische Lokationen werden daher auch teilweise in der Literatur als *semantische Lokationen* bezeichnet). So ist einem Benutzer beispielsweise aus seinem täglichen Leben klar, was ein Raum ist oder welchem Zweck ein Hörsaal einer Universität dient. Abstrakte geometrische Figuren entbehren dieser Eigenschaft weitgehend und erfordern meist eine entsprechende Visualisierung, beispielsweise in Form einer Karte darstellung, um dem Sender eine Vorstellung des Zielgebiets und eine Zuordnung zu realen Lokationen zu vermitteln.

Aus Betreibersicht lässt sich ein symbolisches Lokationsmodell im Gegensatz zu einem geometrischen Modell ohne großen Aufwand erstellen. So ist es beispielsweise relativ einfach möglich, die Stockwerke eines Gebäudes und die Räume auf den einzelnen Stockwerken zu definieren, wohingegen eine geometrische Repräsentation entsprechende Vermessungswerkzeuge, maßstabsgetreue Pläne, usw. erfordert. Gerade im Innenraumbereich sind dabei geometrische Modelle nicht unbedingt automatisch mit einer höheren Funktionalität verbunden, zumindest was die ortsbezogene Kommunikation anbelangt, da ein Sender sowieso meist nur klar definierte Orte wie Räume adressiert. Außerdem geben vor allem Positionierungssysteme im Innenraumbereich oft keine geometrischen sondern symbolischen Positionen aus. So lässt sich eine Infrarotbake zum Beispiel leicht einem bestimmten Raum zuordnen, da die Wände dieses Raumes automatisch die „Sichtbarkeit“ der Bake auf den Raum begrenzen. Ähnliches gilt für RFID-Lesegeräte, die mit RFID-Tags ausgestattete Objekte in ihrer Nähe identifizieren können. Ist die Position des RFID-Lesers bekannt, so können Objekte entsprechenden Positionen zugeordnet werden. Auch hierbei wird man die Lesegeräte sehr wahrscheinlich ausgezeichneten Lokationen, beispielsweise einem Gebäudeeingang oder einer Bearbeitungsstation in einer Fabrik zuordnen, um somit eine Zuordnung von Objekten zu symbolischen Lokationen (Gebäude *X*, Fertigungsstation *Y*) zu erhalten.

Dem gegenüber stehen die Vorteile der geometrischen Adressierung. Diese ist wesentlich flexibler, da durch geometrische Figuren praktisch jedes denkbare Ziel definiert werden kann. Insbesondere in wenig strukturierten Bereichen, beispielsweise innerhalb einer großen Freifläche, können damit gezielt kleinere Gebiete selektiert werden. Symbolische Modelle sind dagegen in ihrer Granularität auf die explizit vordefinierten Lokatio-

nen des Modells beschränkt. Um die Flexibilität der geometrischen Adressierung allerdings voll ausnützen zu können, muss das zugrunde liegende Modell die räumliche Bestimmung von Lokationen in drei Dimensionen unterstützen. Insbesonders ist ansonsten die Flexibilität innerhalb von Gebäuden eingeschränkt, da ohne Höheninformation beispielsweise nicht ohne Weiteres verschiedene Stockwerke unterschieden werden können.

Aus diesen Ausführungen ist ablesbar, dass sowohl die symbolische als auch die geometrische Adressierung jeweils wesentliche Vorteile besitzen und somit idealerweise beide dem Nutzer der ortsbasierten Kommunikation bereitstehen. Somit ist ein hybrides Lokationsmodell erforderlich.

Integration von Teilmodellen: Im Idealfall kann die Realisierung eines ortsbasierten Kommunikationsmechanismus auf einem hybriden Lokationsmodell aufsetzen, in dem jede Lokation sowohl symbolisch als auch mit ihren exakten geometrischen Koordinaten im Modell abgebildet wird. Aufgrund des hohen Aufwands, der für die Erstellung eines solches Modells notwendig ist, ist aber davon auszugehen, dass einzelne Orte geometrisch, andere symbolisch modelliert sein werden. Beispielsweise können Lokationen im Außenbereich durch geometrische Koordinaten, einzelne Gebäude dagegen symbolisch modelliert werden. Das Lokationsmodell sollte in diesem Fall die Integration dieser heterogenen Teilmodell zulassen. In einem solchen integrierten Modell ist insbesondere die Approximation symbolischer Lokationen durch geometrische Beschreibungen und umgekehrt ein wichtiger Aspekt, um jeder Lokationen sowohl symbolische als auch geometrische Informationen zuordnen zu können – auch wenn diese nicht explizit modelliert wurden – und somit die durchgängige Adressierung und Zuordnung von Nachrichten zu Empfängern zu ermöglichen.

Mobile Objekte: Geocast-Nachrichten können nicht nur an stationäre Zielgebiete geschickt werden, sondern auch an mobile Zielgebiete. Ein einfaches Beispiel ist eine Nachricht an alle Passagiere eines bestimmten Zuges. In diesem Beispiel sind nicht nur die Passagiere, sprich die Empfänger der Geocast-Nachricht, mobil, sondern das Zielgebiet – der Zug – selbst. Das Lokationsmodell sollte hierfür die entsprechenden Konzepte zur Adressierung solcher mobilen Zielgebiete bereitstellen.

Inklusionstest: Neben der Definition von Zielgebieten und den Positionen von Teilnehmern dient das Lokationsmodell der ortsbasierten Kommunikation einem zentralen Zweck, nämlich festzustellen, ob sich ein Empfänger im angegebenen Zielgebiet befindet. Die daraus resultierende wichtigste funktionale Eigenschaft des Lokationsmodells ist somit die Unterstützung eines Inklusionstests, um feststellen zu können, ob eine Lokation (Empfängerposition), in einer anderen (Zielgebiet) enthalten ist.

2.3.1 Formalismen und Lokationsmodelldefinition

Bisher wurden in dieser Arbeit Lokationsmodelle nur informell behandelt und beschrieben. Für eine präzise Beschreibung des zu entwerfenden Lokationsmodells für die geographische Kommunikation führen wir die folgenden Formalismen ein:

Lokation: Die Menge der Lokationen L enthält alle real existierenden Gebiete. $l \in L$ bezeichnet eine konkrete Lokation.

Zielgebiet: $\tau_m \in L$ bezeichnet das Zielgebiet einer Nachricht m . Wir schreiben kurz τ , wenn die Unterscheidung verschiedener Nachrichten für die Beschreibung nicht notwendig ist, es sich also um eine beliebige Nachricht handelt.

Empfängerposition: $\pi_h \in L$ bezeichnet die Position eines Empfängers h . Wir schreiben kurz π , wenn eine Unterscheidung verschiedener Empfänger für die Beschreibung nicht notwendig ist, es sich also um einen beliebigen Empfänger handelt.

Räumliche Relation: Eine räumliche Relation $\phi : L \times L$ setzt zwei Lokationen l_1 und l_2 in Beziehung zueinander und beschreibt dadurch einen bestimmten räumlichen Zusammenhangen zwischen diesen Lokationen.

Räumliche Konfiguration: Eine räumliche Konfiguration Θ ist eine Menge von räumlichen Relationen.

Um Lokationen adressieren zu können, ist außerdem ein Adressierungsschema $\alpha : L \times A$ zur Identifikation von Lokationen durch entsprechende Adressen erforderlich. A bezeichnet die Menge der Adressen. Jede Adresse $a \in A$ bezeichnet dabei eine Lokation eindeutig, das heißt, α ist eine injektive Relation für die gilt $(l_1, a) \in \alpha \wedge (l_2, a) \in \alpha \rightarrow l_1 = l_2$.

Auf Grundlage dieser Definitionen definieren wir ein Lokationsmodell wie folgt:

Ein *Lokationsmodell* $M = (L_M, \Theta_M, \alpha_M)$ besteht aus

- einer Menge $L_M \subseteq L$ von Lokationen,
- einer räumlichen Konfiguration Θ_M , welche die räumlichen Beziehungen zwischen Lokationen aus L_M beschreibt,
- einem Adressierungsschema $\alpha_M : L_M \times A_M$, so dass gilt $\forall l \in L_M \exists a \in A_M : (l, a) \in \alpha_M$, das heißt, jeder Lokation $l \in L_M$ wird mindestens eine Adresse zugewiesen.

Entsprechend des oben erwähnten Modellbegriffs nach Stachowiak bildet das Modell nur eine Teilmenge aller existierenden Lokationen und räumlichen Relationen ab (Verkürzungsmerkmal), nämlich die für die geographische Kommunikation zur Feststellung der Zugehörigkeit eines Teilnehmers zur Empfängergruppe relevanten (pragmatisches Merkmal).

Diese Definition ist zunächst unabhängig davon, ob es sich um geometrische oder symbolische Lokationen handelt. Im Verlauf dieser Arbeit werden die konkreten Realisierungen für symbolische und geometrische Modelle im Detail behandelt.

2.3.2 Definition der Empfängermenge

Da der Hauptzweck des zu entwerfenden Lokationsmodells für die ortsbezogenen Kommunikation in der Bestimmung der Relation zwischen Zielgebiet und Empfängerposition besteht, soll an dieser Stelle zunächst analysieren werden, welche Beziehungen zwischen

Zielgebiet und Empfängerposition prinzipiell möglich sind und wie darauf aufbauend die Semantik der Empfängermenge definiert werden kann.

Grundsätzlich handelt es sich sowohl beim Zielgebiet als auch bei der Empfängerposition um geographische *Gebiete*. Zwar könnte man vereinfachend annehmen, dass die Empfängerposition exakt, das heißt, als Punktkoordinate, vorliegt, allerdings weist in der Praxis jedes Positionierungssystem eine bestimmte Ungenauigkeit auf, die dazu führt, dass die Empfängerposition nicht in Form einer Punktkoordinate sondern nur in Form eines Gebiets bestimmt werden kann. Ferner führt die Verwendung von symbolischen Lokationen zur Empfängerpositionsbestimmung unwillkürlich zu einem Gebiet, da entsprechende Lokationen wie Räume, Stockwerke, Städte, usw. immer eine räumliche Ausdehnung besitzen. Wir gehen daher im Folgenden davon, dass die Empfängerposition ein Gebiet darstellt ohne im Folgenden explizit darauf hinzuweisen.

2.3.2.1 Qualitative Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition

Zur Definition der Empfängermenge betrachten wir zunächst die *qualitativen* Beziehungen zwischen einem Zielgebiet τ und einer Empfängerposition π . Da es sich sowohl bei τ als auch bei π um räumliche Gebiete handelt, stellt sich zunächst die Frage, welche Beziehungen allgemein zwischen zwei solchen Gebieten bestehen können.

In der Literatur wurden bereits diverse Ansätze zur Beschreibung der topologischen Beziehungen zwischen räumlichen Gebieten beschrieben. Hervorzuheben sind hier insbesondere das *4-Intersection Model* nach Egenhofer [EH90, EF91] und der *Region Connection Calculus* (RCC) nach Randell, Cui und Cohn [RC89] (siehe jeweils Abschnitt 2.2.2). Beim RCC werden entsprechend der Anzahl an beschreibbaren grundlegenden Relationen zwischen Gebieten der RCC5 und der RCC8 unterschieden.

Sowohl der RCC8 als auch das 4-Intersection Model unterscheiden bei Gebieten zwischen dem Inneren eines Gebiets (Interior), dessen Begrenzung (Border) und dem Äußeren eines Gebiets (Exterior). Ein Gebiet muss dabei nicht zusammenhängend sein, das heißt, es kann aus mehreren nicht zusammenhängenden Teilen bestehen. Beide Ansätze basieren auf acht Basisrelationen, die je zwei Gebiete (in unserer Sprechweise Lokationen) l_1 und l_2 in Bezug zueinander setzen. (vergleiche Abbildung 2.2). Wir verwenden im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Bezeichnungen entsprechend des RCC.

- DC(l_1, l_2): l_1 und l_2 sind nicht verbunden („disconnected“)
- EC(l_1, l_2): l_1 und l_2 berühren sich extern („externally connected“)
- PO(l_1, l_2): l_1 und l_2 überlappen sich teilweise („partially overlapping“)
- TPP(l_1, l_2): l_1 ist eine echter Teil von l_2 und berührt l_2 am Rand („tangential proper part“)
- TPPi(l_1, l_2): l_2 ist eine echter Teil von l_1 und berührt l_1 am Rand („tangential proper part inverse“)
- NTPP(l_1, l_2): l_1 ist eine echter Teil von l_2 und berührt l_2 nicht („non-tangential proper part“)

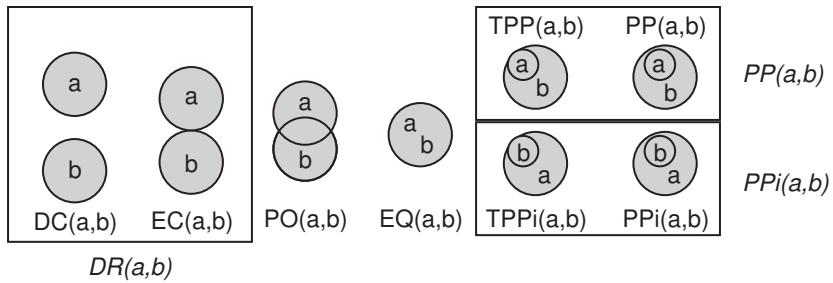


Abbildung 2.2: RCC5, RCC8/4-Intersection Model: Der RCC8 [RC89] und das 4-Intersection Model [EH90, EF91] definieren acht Basisrelationen. Der RCC5 fasst die eingehafteten Relationen zu den kursiv gesetzten Relationen zusammen.

- $\text{NTPPi}(l_1, l_2)$: l_2 ist eine echter Teil von l_1 und berührt l_1 nicht („non-tangential proper part inverse“)
- $\text{EQ}(l_1, l_2)$: l_1 ist identisch mit l_2 („equal“)

Durch die Berücksichtigung der Begrenzung eines Gebiets kann beispielsweise unterschieden werden, ob ein Gebiet l_1 in einem anderen Gebiet l_2 vollständig enthalten ist, ohne dass sich die Grenzen von l_1 und l_2 berühren ($\text{NTPP}(l_1, l_2)$) oder ob der Rand von l_1 dabei den Rand von l_2 berührt ($\text{TPP}(l_1, l_2)$). Diese Unterscheidung spielt für die ortsbezogene Kommunikation allerdings nur eine untergeordnete Rolle. So ist für die Überprüfung, ob die Empfängerlokation in der Ziellokation enthalten ist, insbesondere unerheblich, ob die Begrenzung der Empfängerlokation die der Ziellokation berührt, schneidet oder ob die Begrenzungen disjunkt sind.

Vernachlässigt man die Betrachtung der Begrenzungen von Gebieten und fasst die dann nicht mehr unterscheidbaren Relationen des RCC8 zusammen, so erhält man fünf anstatt acht Basisrelationen (vergleiche Abbildung 2.2). Durch die Basisrelationen des RCC5 können somit die folgenden Beziehungen zwischen zwei Lokationen l_1 und l_2 unterschieden werden:

- $\text{EQ}(l_1, l_2)$: l_1 und l_2 sind identisch („equal“)
- $\text{PP}(l_1, l_2)$: l_1 ist vollständig in l_2 enthalten („proper part“)
- $\text{PPi}(l_1, l_2)$: l_2 ist in l_1 enthalten („proper part inverse“)
- $\text{PO}(l_1, l_2)$: l_1 und l_2 überlappen sich partiell („partially overlapping“)
- $\text{DR}(l_1, l_2)$: l_1 und l_2 sind disjunkt („discrete“)

Diese Basisfunktionen sind paarweise disjunkt und in ihrer Gesamtheit vollständig (JEPD: „jointly exhaustive and pairwise disjoint“), das heißt, zwischen je zwei Lokationen l_1 und l_2 existiert jeweils genau eine Basisrelation. Sei Φ_{RCC5} die Menge der Basisrelationen des RCC5, das heißt, $\Phi_{\text{RCC5}} = \{\text{DR}, \text{PO}, \text{PP}, \text{PPi}, \text{EQ}\}$. Dann gilt:

$$\forall l_1 \in L \forall l_2 \in L \exists \phi \in \Phi_{\text{RCC5}} : \phi(l_1, l_2) \quad (2.1)$$

$$\forall l_1 \in L \forall l_2 \in L \forall \phi \in \Phi_{\text{RCC5}} \forall \phi' \in \Phi_{\text{RCC5}} : \phi(l_1, l_2) \wedge \phi'(l_1, l_2) \rightarrow \phi' = \phi \quad (2.2)$$

Um formal zu definieren, wann sich ein Empfänger im Zielgebiet befindet, führen wir die Funktion $\psi_{\text{qual}} : L \times L \rightarrow \{\text{true, maybe, false}\}$ ein. Gilt $\psi_{\text{qual}}(\tau, \pi) = \text{true}$, so befindet sich die Empfängerposition sicher innerhalb des Zielgebiets; gilt $\psi_{\text{qual}}(\tau, \pi) = \text{false}$, so befindet sich die Empfängerposition sicher außerhalb des Zielgebiets. Gilt dagegen $\psi_{\text{qual}}(\tau, \pi) = \text{maybe}$, so kann nicht mit Sicherheit entschieden werden, ob sich der Empfänger außerhalb oder innerhalb des Zielgebiets befindet.

Die RCC5-Relationen können wie folgt zum Vergleich des Zielgebiets τ und der Empfängerposition π verwendet werden:

- EQ(τ, π): Der Empfänger befindet sich *sicher* im Zielgebiet, d.h. $\psi_{\text{qual}}(\tau, \pi) = \text{true}$.
- PP(τ, π): Der Empfänger befindet sich *vielleicht* im Zielgebiet, d.h. $\psi_{\text{qual}}(\tau, \pi) = \text{maybe}$.
- PPi(τ, π): Der Empfänger befindet sich sicher im Zielgebiet, d.h. $\psi_{\text{qual}}(\tau, \pi) = \text{true}$.
- PO(τ, π): Der Empfänger befindet sich *vielleicht* im Zielgebiet, d.h. $\psi_{\text{qual}}(\tau, \pi) = \text{maybe}$.
- DR(τ, π): Der Empfänger befindet sich *sicher nicht* im Zielgebiet, d.h. $\psi_{\text{qual}}(\tau, \pi) = \text{false}$.

Die Fälle, in denen sich π vollständig innerhalb oder außerhalb des Zielgebiets befindet, sind offensichtlich. In den restlichen Fällen führt die Ungenauigkeit der Empfängerposition dazu, dass Teile der Empfängerposition außerhalb des spezifizierten Zielgebiets liegen.

Durch diese Definition der Funktion ψ_{qual} werden somit qualitativ alle für die ortsbzogenen Kommunikation relevanten Fälle unterschieden, und eine feinere Unterscheidung der Relationen bringt daher keinen weiteren Nutzen. Rein qualitativ können hiermit bereits Fälle identifiziert werden, in denen ein Empfänger sicher zur Empfängergruppe gehört (Empfänger *sicher* im Zielgebiet) bzw. in denen er sicher nicht zur Empfängergruppe gehört (Empfänger *sicher nicht* im Zielgebiet). In den verbleibenden Fällen (Empfänger *vielleicht* im Zielgebiet) kann zwar keine sichere Aussage getroffen werden, allerdings mag auch bereits diese unsichere Aussage für bestimmte Anwendungsklassen für eine Entscheidung genügen, ob eine Nachricht dem Empfänger zugestellt werden soll oder nicht. So ist es für sicherheitskritische Warnmeldungen unter Umständen sinnvoll, eine Nachricht im Zweifelsfall zuzustellen, um nicht Gefahr zu laufen, tatsächlich betroffene Empfänger vom Empfang auszuschließen. Ein „best-effort“ Dienst wird dagegen eher auf die Zustellung in unsicheren Fällen verzichten, um so beispielsweise Ressourcen einzusparen und potentiell unnötige Nachrichten zu vermeiden. Um in unsicheren Fällen eine feinere Unterscheidung zuzulassen, ist allerdings eine genauere quantitative Bestimmung der Zugehörigkeit zur Empfängergruppe erforderlich.

2.3.2.2 Quantitative Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition

Um auch in unsicheren Fällen eine feingranulare Bestimmung der Empfängermenge zu ermöglichen, ist eine *quantitative* Bestimmung der Wahrscheinlichkeit erforderlich, dass sich die Empfängerposition im Zielgebiet befindet. Hierzu wird die Funktion ψ_{quant} wie folgt deklariert: $\psi_{\text{quant}} : L \times L \rightarrow [0, 1]$. Ein Wert von 0 entspricht dabei der qualitativen Aussage false, und 1 entspricht der Aussage true.

Eine Anwendung kann nun genau spezifizieren, ab welcher Wahrscheinlichkeit eine Zugehörigkeit zur Empfängermenge gegeben ist, indem sie für jede Nachricht m an das Zielgebiet τ_m einen Schwellwert θ_m definiert. Ein Empfänger an Position π ist dann Teil der Empfängermenge, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\psi_{\text{quant}}(\tau_m, \pi) \geq \theta_m \quad (2.3)$$

Das heißt, die Nachricht wird nur dann ausgeliefert, wenn der Empfänger sich mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit auch tatsächlich im Zielgebiet befindet.

Wie die Abbildung auf Werte zwischen 0 und 1 erfolgt, ist von der Art des zugrunde liegenden Lokationsmodells abhängig. Hierauf wird daher erst bei der Beschreibung des entworfenen Lokationsmodells genauer eingegangen.

2.4 Basislokationsmodell

In diesem Abschnitt werden ein hybrides Lokationsmodell und ein entsprechendes Adressierungskonzept entworfen [DBR03]. Dieses Basismodell kann bereits eigenständig für die ortsbezogene Kommunikation mittels geometrischer und symbolischer Adressen verwendet werden. Das globale Modell dient gleichzeitig als Ausgangspunkt für die in Abschnitt 2.5 beschriebenen Erweiterungen zur Unterstützung räumlich beschränkter lokaler Modelle sowie mobiler Zielgebiete.

2.4.1 Geometrisches Lokationsmodell

Ein geometrisches Modell beschreibt Lokationen wie Räume, Gebäude oder ganze Städte durch geometrische Figuren. Diese geometrische Beschreibung dient gleichzeitig der Adressierung dieser ausgezeichneten Lokationen. Beispielsweise kann der Benutzer ein entsprechendes Ziel in einer Kartendarstellung auswählen und somit die geometrische Zieladresse einer Nachricht mit Hilfe des Lokationsmodells bestimmen (theoretisch kann der Benutzer Ziele aber auch frei definierte, das heißt, nicht explizit modellierte Zielgebiete, als Zieladresse verwenden). Jeder Lokation $l \in L_M$ wird hierzu durch das in Abschnitt 2.3.1 eingeführte Adressierungsschema α_M eines Modells M eine entsprechende geometrische Ausdehnung in Form eines Polygons, eines Kubus, o.Ä. zugewiesen.

Wie oben beschrieben, ist das Ziel dieser Arbeit ein geometrisches Modell, das sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Figuren unterstützt, um einen maximalen Grad an Flexibilität zu ermöglichen. Entsprechende geometrische Modellierungskonzepte werden im Folgenden im Detail beschrieben.

2.4.1.1 Zweidimensionale Lokationen

Die bisher in der Literatur gebräuchlichste Form der Lokationsmodellierung im Allgemeinen und der Adressierung innerhalb der ortsbezogenen Kommunikation im Speziellen stellen zweidimensionale geometrische Figuren dar. Als einfachste Form der geometrischen Adressierung unterstützt auch unser Lokationsmodell diese Adressierungsform ähnlich dem Ansatz von Navas und Imielinski [Nav01].

Zweidimensionale Zielgebiete

Für die zweidimensionale geometrische Adressierung können prinzipiell verschiedene geometrische Grundfiguren eingesetzt werden, beispielsweise Polygone, Kreise, Ellipsen, usw. Um die Komplexität des Vergleiches von Zielgebiet und Empfängerposition zu begrenzen und trotzdem eine genaue Annäherung beliebiger zweidimensionaler Gebiete zu ermöglichen, unterstützen wir in unserem geometrischen Modell allerdings nur zweidimensionale Polygonzüge.

Geometrische Koordinatenangaben, wie sie für die Definition der Eckpunkte eines Polygons notwendig sind, erfolgen bezüglich eines räumlichen Referenzsystems. Hierbei können sowohl globale als auch lokale Systeme zum Einsatz kommen. Wir definieren ein *globales Koordinatenreferenzsystem* als ein Referenzsystem mit weltweiter Gültigkeit. Das heißt, jeder Punkt auf der Erde kann in einem solchen System dargestellt werden. Unter einem *lokalen Referenzsystem* verstehen wir dagegen ein System mit eingeschränkter, das heißt, nicht globaler Gültigkeit. Koordinaten können in lokalen Systemen nur Positionen innerhalb dieses Gültigkeitsbereichs bezeichnen. An dieser Stelle gehen wir näher auf globale Systeme ein, die für ein geometrisches Lokationsmodell mit globaler Gültigkeit notwendig sind; lokale Systeme werden im Detail in Abschnitt 2.5.1 besprochen.

Für die globale Beschreibung zweidimensionaler Gebiete ist ein zweidimensionales global definiertes Referenzsystem erforderlich. Aufgrund der Form der Erdoberfläche bieten sich hierfür sphärische oder ellipsoide Referenzsysteme an, in denen Koordinaten in Form von Längen- und Breitengraden beschrieben werden. Aufgrund der relativ ungenauen Annäherung der Erdoberfläche durch einfache sphärische Modelle, werden heute hauptsächlich Systeme auf Basis von Referenzellipsoide eingesetzt. Hierbei können global angenäherte Ellipsoide und lokal angenäherte Ellipsoide unterschieden werden. Während global angenäherte Ellipsoide der gesamten Erdoberfläche bestmöglich entsprechen, sind lokale Ellipsoid an einen bestimmten Teil der Erdoberfläche, beispielsweise an ein bestimmtes Land, bestmöglich angenähert. Neben den Ausmaßen des Referenzellipsoids ist für die Definition eines ellipsoiden Referenzsystems auch die Lagerung des Ellipsoids von Bedeutung. So sind insbesondere lokal bestangenäherte Ellipsoide bezüglich des Erdmittelpunkts verschoben und bezüglich der Erdachsen gedreht. Entsprechende Parameter für die Definition des Referenzsystems (Ellipsoid und dessen Lagerung) werden durch das geodätische Datum definiert und ermöglichen somit auch die Umrechnung zwischen Koordinaten bezüglich verschiedener Daten.

Lokal bestangenäherte Referenzellipsoide werden hauptsächlich in der nationalen Landesvermessung eingesetzt. So ist für Deutschland beispielsweise das Potsdam-Datum basierend auf dem Bessel-Ellipsoid von Bedeutung. Obwohl sich im Potsdam-Datum

theoretisch beliebige Punkte auf der Erdoberfläche definieren ließen – unter Inkaufnahme größerer Abweichungen –, so weißt dieses Bezugssystem doch einen klaren lokalen Charakter mit nationaler Beschränkung auf. Gleiches gilt für eine Vielzahl anderer nationaler Referenzsysteme.

Für die Definition eines globalen Referenzsystems bieten sich somit global best angenäherte Ellipsoide an. Das derzeit gebräuchlichste globale Referenzellipsoid ist das Ellipsoid des World Geodetic System 1984 (WGS84) [DOD00], das geozentrisch gelagert ist. Wir verwenden daher WGS84 als globales Referenzsystem für die Festlegung zweidimensionaler Koordinaten.

Zielgebiete lassen sich auf Grundlage des WGS84 in XML-Schreibweise wie im folgenden Beispiel angegeben adressieren:

```
<!-- Zielgebietsdefinition -->
<targetarea>
    <!-- Zweidimensionales, geometrisch definiertes Gebiet. -->
    <area-2d_geometric>
        <referencesystem>
            <!-- Koordinaten bzgl. WGS84 Referenzsystem. -->
            <refsysid>WGS84</refsysid>
        </referencesystem>
        <!-- 2D Polygon. -->
        <polygon>
            <!-- Eckpunkte des Polygons -->
            <vertex>
                <lon>9.1793</lon>
                <lat>48.7791</lat>
            </vertex>
            <vertex>
                <lon>9.1786</lon>
                <lat>48.7784</lat>
            </vertex>
            <vertex>
                <lon>9.1802</lon>
                <lat>48.7779</lat>
            </vertex>
            <vertex>
                <lon>9.1807</lon>
                <lat>48.7787</lat>
            </vertex>
        </polygon>
    </area-2d_geometric>
</targetarea>
```

Das Element `area-2d_geometric` kennzeichnet ein zweidimensionales geometrisch definiertes Gebiet, in diesem Fall ein Zielgebiet (`targetarea`), das mit Hilfe des geome-

trischen Lokationsmodell ermittelt wird. Eine zweidimensionale geometrische Empfängerposition wird ebenfalls in Form eines Gebiets analog definiert (gekennzeichnet durch das Element `hostposition`). Die `vertex`-Elemente definieren die Eckpunkte des Polygons. Das Element `refsysid` mit dem Wert `WGS84` zeigt dabei die Verwendung des globalen Referenzsystems WGS84 als räumliches Bezugssystem an. Sollen Koordinaten bezüglich eines anderen globalen Systems verwendet werden, so kann hier der eindeutige Bezeichner des entsprechenden Systems angegeben werden, beispielsweise UTM für Koordinaten im UTM-System. Hierbei müssen dann auch die Koordinaten selbst in entsprechender Form angegeben werden; beispielsweise verwendet UTM Rechts- und Hochwerte innerhalb von Zonen anstatt von Längen- und Breitengraden, die durch entsprechende `vertex`-Elemente angegeben werden können.

Quantitative Definition der Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition

Für ein gegebenes zweidimensionales Zielgebiet kann die Empfängermenge auf Grundlage einer zweidimensional geometrisch definierten Empfängerposition wie folgt bestimmt werden.

Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, gehen wir davon aus, dass nicht nur das Ziel einer Nachricht, sondern auch die Position eines Empfängers in Form eines Gebiets anstatt als Punktkoordinate angegeben wird. Diese Annahme bedarf einer Erläuterung, die gleichzeitig auch die quantitative Beziehung ψ_{quant} zwischen Zielgebiet und Empfängerposition erklärt.

Betrachtet man Positionierungssysteme mit geometrischer Ausgabe, beispielsweise das Global Positioning System (GPS), so stellt man fest, dass vom System gemeldete Positionen im Allgemeinen mit einem Positionierungsfehler behaftet sind. Die gemeldete Position kann somit allgemein als *Wahrscheinlichkeitsverteilung* aufgefasst werden. Ist diese Verteilung stetig, wovon wir im Folgenden ausgehen wollen, so wird über die entsprechenden zweidimensionalen *Dichtefunktion* $f(x, y)$ definiert, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich der Empfänger in einem bestimmten Gebiet aufhält. Insbesondere kann somit auch $\psi_{\text{quant}}(\tau, \pi)$ – die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Empfänger mit der Position π im Zielgebiet τ befindet – wie folgt definiert werden:

$$\psi_{\text{quant}}(\tau, \pi) = \int_{(x, y) \in \tau} f(x, y) dx dy \quad (2.4)$$

Da das Referenzsystem nicht die gesamte Welt abdecken muss (siehe lokale Referenzsystem in Abschnitt 2.5.1), gilt für einen Empfänger $\int_{x \in X, y \in Y} f(x, y) dx dy \leq 1.0$, wobei X und Y die Abdeckung des Referenzsystems bezeichnen. Das heißt, der Empfänger kann sich auch außerhalb des durch das Modell abgedeckten Gebiets befinden. Deckt das Modell die gesamte Welt ab, so gilt die Gleichheit.

Wie die konkrete Wahrscheinlichkeitsverteilung für ein bestimmtes Positionierungssystem aussieht, hängt von den Charakteristika des Systems ab. Im nächsten Abschnitt wird eine konkrete Verteilung beispielhaft anhand von GPS dargestellt.

Qualitative Definition der Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition

Die Berechnung der quantitativen Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition kann abhängig von τ und $f(x, y)$ rechnerisch aufwendig sein. Außerdem ist in vielen Fällen bereits eine qualitative Bestimmung von ψ_{qual} ausreichend. ψ_{qual} definiert sich wie in Abschnitt 2.3.2.1 beschrieben auf Grundlage der RCC5-Relationen, das heißt, um ψ_{qual} zu bestimmen, muss die RCC5-Relation zwischen dem Zielgebiet τ und der Empfängerposition π bestimmt werden. Hierfür muss die Empfängerposition in Form eines klar begrenzten Gebiets, das heißt, einer geometrischen Figur – in unserem Fall ein Polygon – vorliegen.

Wird für die Positionierung eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugrunde gelegt, so ist es abhängig von der Verteilung allerdings nicht ohne Weiteres möglich, ein Gebiet π zu definieren, das mit hundertprozentiger Sicherheit die tatsächliche Empfängerposition enthält. Dies würde die Definition der Empfängerposition als klar begrenztes Gebiet unmöglich machen, da sich ein Empfänger immer mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit außerhalb des Gebiets befinden könnte. Allerdings sind sehr große Positionierungsfehler in der Praxis eher unwahrscheinlich. So wiesen beispielsweise die in [UBL02] durchgeführten Messungen mit aktuellen GPS-Geräten in 50% aller Fälle Abweichungen kleiner als 2,1 m auf, und Abweichungen von mehr als 7,9 m traten nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit unter 99,7% auf. Wir approximieren daher π als zweidimensionales Polygon, so dass sich der Empfänger mit hinreichend hoher Wahrscheinlichkeit im angehöerten Gebiet befindet.

Die Transformation der Wahrscheinlichkeitsverteilung in ein solches scharf begrenztes Gebiet ist allerdings selbst keine triviale Aufgabe und verdient daher eine kurze Betrachtung. Im Allgemeinen ist diese Transformation abhängig von den Charakteristika des verwendeten Positionierungssystems. Oft wird die Unsicherheit der ermittelten Position in Form eines Kreises mit einem bestimmten Radius angegeben. So definiert beispielsweise der *CEP*-Wert (engl. circular error probable, oft auch als circular error probability bezeichnet) den Radius eines „Streukreises“, in dem sich 50% der ermittelten Positionen befinden. Ein weiteres oft verwendetes Maß ist der *DRMS*-Wert (engl. distance root mean square), der sich im zweidimensionalen Fall wie folgt aus den Standardabweichungen in Nord- (σ_N) und Ostrichtung (σ_E) bestimmt:

$$DRMS = \sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_E^2} \quad (2.5)$$

Geht man von einer zweidimensionalen kreisförmigen Gauß'schen Verteilung aus, so definiert *DRMS* den Radius eines Kreises, in dem sich ca. 68,27% der Messungen befinden (σ -Bereich) und $2DRMS$ den Radius eines Kreises, in dem sich ca. 95,44% aller ermittelten Positionen befinden (2σ -Bereich). Da in der Praxis keine perfekte kreisförmige Gauß'sche Verteilung sondern vielmehr ein Fehlerellipsoid gegeben ist, können diese Werte allerdings leicht von diesen idealen Werten abweichen [van98].

Sowohl *CEP* als auch *DRMS* lassen sich experimentell aus einer ausreichend großen Menge an Messwerten bestimmen. So haben beispielsweise die Messungen in [UBL02] für GPS einen Wert von $CEP \approx 2,1$ m ergeben. Im Allgemeinen ist die Verteilung der Positionierungsfehler allerdings nicht in allen Situationen gleich und muss daher entweder

konservativ gewählt oder besser dynamisch ermittelt werden, um sicherstellen zu können, dass sich die Empfängerposition im entsprechenden Gebiet befindet. GPS-Geräte liefern neben der ermittelten Position auch Angaben zur erzielten Präzision der Messung, auf deren Grundlage die dynamische Bestimmung eines entsprechenden Gebiets ermöglicht wird. Für den zweidimensionalen Fall ist insbesondere die so genannte horizontale Verringerung der Präzision (engl. horizontal dilution of precision, HDOP) von Bedeutung, welche u.a. die aktuelle Konstellation der Satelliten berücksichtigt. Auf Grundlage des HDOP-Werts und dem so genannten User Equivalent Range Error σ_{UERE} , der die Unsicherheit der Entfernungsmessung zu den Satelliten beschreibt, lässt sich mit der folgenden Formel die Standardabweichung σ_π der ermittelten Position bestimmen:

$$\sigma_\pi = \sigma_{\text{UERE}} \times \text{HDOP} \quad (2.6)$$

Die so bestimmten Gebiete lassen sich durch ein entsprechendes Polygon, in dem sich die Position mit einer bestimmten Mindestwahrscheinlichkeit befindet, approximieren.

Damit liegen nun sowohl τ als auch π als Polygone vor, die auf Inklusion, Überlappung oder Schnitt überprüft werden können, um hiermit ψ_{qual} zu bestimmen.

2.4.1.2 2,5-dimensionale Lokationen

Alleine zweidimensionale Figuren sind in bestimmten Situationen nicht ausreichend, um Zielgebiete und Positionen zu bestimmen, insbesondere im Inneren von Gebäuden. So können beispielsweise übereinander liegende Räume auf verschiedenen Stockwerken eines Gebäudes nicht alleine durch zweidimensionale Figuren unterschieden werden. Auf der anderen Seite sind beliebige dreidimensionale Figuren sehr aufwendig zu konstruieren, zu verwalten und zu verarbeiten. Gesucht ist daher eine Kompromiss zwischen Expressivität und geringer Komplexität.

2,5D Zielgebiete

Einen solchen Kompromiss stellen 2,5-dimensionale Figuren dar, die einerseits eine ausreichend genaue Annäherung typischer Zielgebiete ermöglichen, andererseits aber eine im Vergleich zu beliebigen dreidimensionalen Figuren einfache Erstellung, kompakte Beschreibung und effiziente Verarbeitung ermöglichen.

Eine 2,5D-Figur besteht aus einer zweidimensionalen Grundfläche, in unserem Modell ein Polygon, und zwei Höhenangaben. Die erste Angabe definiert die absolute Höhe der Grundfläche, die zweite die relative Höhe der Figur bezüglich der absoluten Höhe der Grundfläche (vergleiche Abbildung 2.3).

Eine solche Figur benötigt im Vergleich zu einer zweidimensionalen Figur nur zwei Angaben mehr, nämlich die zusätzlichen Höhenangaben und hat damit eine kompakte Beschreibung. Durch die wenigen zusätzlichen Informationen ist die Modellierung einer solchen Figur außerdem im Vergleich zu beliebigen dreidimensionalen Figuren einfacher und nur wenig komplexer als die Modellierung einer zweidimensionalen Figur.

Ein Zielgebietadresse lässt sich mit Hilfe einer 2,5D-Figur, wie im folgenden Beispiel zu sehen, darstellen:

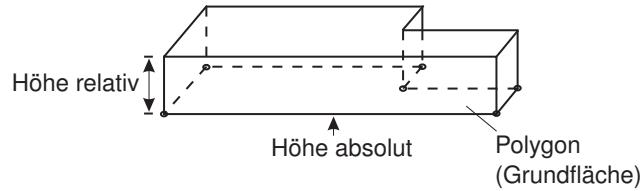


Abbildung 2.3: 2,5D Figur

```

<targetarea>
  <area-25d_geometric>
    <!-- Koordinaten bzgl. WGS84 Referenzsystem. -->
    <!-- Höhe bezüglich WGS84 Ellipsoid. -->
    <referencesystem>
      <refsysid>WGS84</refsysid>
    </referencesystem>
    <baseheight>250</baseheight>
    <relativeheight>3.2</relativeheight>
    <base>
      <polygon>
        <vertex>
          <lon>9.1793</lon>
          <lat>48.7791</lat>
        </vertex>
        <vertex>
          <lon>9.1786</lon>
          <lat>48.7784</lat>
        </vertex>
        <vertex>
          <lon>9.1802</lon>
          <lat>48.7779</lat>
        </vertex>
        <vertex>
          <lon>9.1807</lon>
          <lat>48.7787</lat>
        </vertex>
      </polygon>
    </base>
  <area-25d_geometric>
</targetarea>

```

Die Definition der Grundfläche `base` in Form eines zweidimensionalen Polygons bezüglich des WGS84 ist bereits aus Abschnitt 2.4.1.1 bekannt. Die absolute Höhe wird durch das Element `baseheight` bestimmt. Wie für die Positionsangabe, so können auch

für die absolute Höhe unterschiedliche Referenzsysteme verwendet werden. Im gegebenen Beispiel wird als Höhenreferenz das WGS84-Ellipsoid verwendet, das heißt, das mittels des Elements `refsysid` angegebene Referenzsystem WGS84 bezieht sich sowohl auf die Positions- als auch auf die Höhenangabe. Gebräuchlich ist aber beispielsweise auch die Höhenangabe bezüglich des Geoids auf Basis des Schwerkraftfelds der Erde, wobei sich teilweise Abweichungen bis zu 100 m vom WGS84-Ellipsoid ergeben können. Ein entsprechendes Referenzsystem, das Positionen bezüglich des WGS84 und Höhen bezüglich des Geoids definiert, könnte durch `<refsysid>WGS84-Geoid</refsysid>` angegeben werden.

Quantitative Definition der Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition

Wie im zweidimensionalen Fall kann die quantitative Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition aufgrund der Wahrscheinlichkeit ausgedrückt werden, mit der sich die Empfängerposition innerhalb eines bestimmten geographischen Gebiets befindet. Da für 2,5-dimensionale Zielgebiet auch die Höhe der Position relevant ist, muss eine dreidimensionale Dichtefunktion $f(x, y, z)$ betrachtet werden. Es gilt dann analog die bereits bekannte quantitative Beziehung zwischen dem geometrisch definierten Zielgebiet und der geometrisch definierten Empfängerposition aus Gleichung 2.4.

Wird das Zielgebiet 2,5-dimensional und die Empfängerposition in drei Dimensionen beschrieben, so kann diese Gleichung sofort auf τ und π angewandt werden. Allerdings ist zu beachten, dass unser Modell es auch zulässt, dass ein Zielgebiet zweidimensional, die Empfängerposition aber in drei Dimensionen beschrieben werden kann und umgekehrt. In diesem Fall stellt sich die Frage, wie die quantitative Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition nun berechnet werden kann. Betrachten wir hierzu zunächst den Fall eines zweidimensionalen Zielgebiets – ein einfaches Polygon – und einer dreidimensionalen Empfängerposition in Form der dreidimensionalen Dichtefunktion $f_{3d}(x, y, z)$. Ein zweidimensionales Zielgebiet kann so interpretiert werden, dass die dritte Dimension dem Sender der Nachricht unwichtig ist, das heißt, jeder Empfänger, dessen zweidimensionale Position sich im Zielgebiet befindet, gehört zur Empfängermenge, unabhängig von dessen Höhe. In diesem Fall kann die dreidimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilung in eine zweidimensionale Verteilung umgerechnet werden:

$$f_{2d}(x, y) = \int_{\tau} f_{3d}(x, y, z) dz \quad (2.7)$$

Der Vergleich von $f_{2d}(x, y)$ und dem zweidimensionalen Zielgebiet ist entsprechend Gleichung 2.4 möglich.

Werden dagegen ein 2,5-dimensionales Zielgebiet und eine zweidimensionale Empfängerposition miteinander verglichen, so ist der Vergleich problematisch. Während im Falle des Vergleichs einer zweidimensionalen Empfängerposition mit einem zweidimensionalen Zielgebiet die z -Koordinate als für den Sender nicht relevant erachtet wurde, so ist die z -Koordinate der Empfängerposition nun für den Sender einer 2,5-dimensional adressierten Nachricht sehr wohl von Relevanz. Da aber die zweidimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilung der Empfängerposition keine Aussage darüber trifft, ob sich auch die z -Koordinate des Empfängers im Bereich des adressierten Zielgebiets befindet,

ist somit ein quantitativer Vergleich eines 2,5-dimensionalen Zielgebiets und einer zweidimensionalen Empfängerposition grundsätzlich nicht möglich. Um trotzdem eine Zustellung in diesem eigentlich nicht bestimmten Fall zu ermöglichen, könnte der Sender definieren, wie in diesem Fall mit der Nachricht umzugehen ist. Mit Hilfe einer entsprechenden Kennzeichnung der Nachricht, kann der Sender somit angeben, ob die Nachricht grundsätzlich nicht ausgeliefert werden soll, oder ob in diesem Fall ein Vergleich rein auf Grundlage der zweidimensionalen Basis der 2,5D Figur erfolgen soll. Diese zweidimensionale Basis lässt sich wiederum entsprechend Gleichung 2.4 mit der zweidimensionalen Empfängerposition vergleichen.

Qualitative Definition der Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition

Wie bereits für den rein zweidimensionalen Fall angemerkt, ist der quantitative Vergleich von Zielgebiet und Empfängerposition unter Umständen rechnerisch aufwendig. Daher wird auch für 2,5-dimensionale Zielgebiete der einfachere qualitative Vergleich für viele Applikationen vorzuziehen sein. Hierfür muss analog zum zweidimensionalen Fall die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Empfängerposition in ein scharf begrenztes Gebiet, genauer einen 2,5-dimensionalen Körper, transformiert werden, um die topologische Relation zwischen diesem Körper und dem Zielgebiet und somit ψ_{quant} bestimmen zu können.

Betrachtet man wiederum GPS als konkretes Beispiel dieses Transformationsschritts, so bieten sich zwei Lösungen an. Die erste Alternative betrachtet die drei Dimensionen geographische Länge, Breite sowie Höhe gleichzeitig. Entsprechen zum zweidimensionalen Fall kann nun anstatt einer zweidimensionalen Kreisfläche eine dreidimensionale Kugel bestimmt werden, innerhalb derer sich die Empfängerposition mit hoher Wahrscheinlichkeit befindet. Entsprechend dem *CEP*-Wert kann der *SEP*-Wert (engl. spherical error probable) bestimmt werden, oder für die Berechnung des *DRMS*-Werts (Gleichung 2.5) wird nun zusätzliche die Standardabweichung der Höhe berücksichtigt. Für die dynamische Bestimmung ist der vom GPS-Gerät ermittelte *PDOP*-Wert (engl. position dilution of precision) hilfreich, der im Gegensatz zum oben bereits angesprochenen *HDOP*-Wert nicht die Verringerung der Präzision in der Horizontalen sondern in drei Dimensionen angibt. Im nächsten Schritt wird diese Kugel durch eine 2,5-dimensionale Figur approximiert. Da 2,5-dimensionale Figuren allerdings in der Höhe nur eine sehr eingeschränkte Modellierung zulassen, ist diese Approximierung im Gegensatz zum zweidimensionalen Fall, in dem ein Kreis durch ein Polygon angenähert wurde, unter Umständen relativ ungenau.

Daher erscheint die zweite alternative Transformationsmethode besser geeignet. Bei dieser Alternative werden die Koordinaten in der Ebene getrennt von der Höhenangabe betrachtet und transformiert. Die Transformation in der Ebene erfolgt auf gleiche Art und Weise wie im zweidimensionalen Fall. Das heißt, es wird zunächst ein kreisförmiges Gebiet hergeleitet, das durch ein Polygon approximiert wird und so die Grundfläche der 2,5-dimensionalen Figur ergibt. Schließlich wird die Höhe dieser Figur durch ein eindimensionales Intervall angenähert, so dass die Höhe des Empfängers sich mit hoher Wahrscheinlichkeit in diesem Intervall befindet. Die dynamische Bestimmung wird bei GPS durch den *VDOP*-Wert (engl. vertical dilution of precision) unterstützt, der die Ver-

ringierung der Präzision der Höhenangabe definiert. Die untere Grenze dieses Intervalls definiert die absolute Höhe der Basis; die relative Höhe der Figur wird durch die obere Grenze abzüglich der unteren Grenze des Intervalls definiert.

Liegt sowohl das Zielgebiet als auch die Empfängerposition als 2,5-dimensionale Körper vor, so gestaltet sich der qualitative Vergleich nur wenig komplexer als im zweidimensionalen Fall. Zunächst muss analog zum zweidimensionalen Fall der Schnitt der zweidimensionalen Grundfläche der 2,5D-Figuren berechnet werden. Zusätzlich ist im 2,5-dimensionalen Fall anschließend noch zu überprüfen, ob sich die Figuren in der dritten Dimension überlappen. Da es sich bei den Höhenangaben um zwei einfache Intervalle handelt, ist der gesamte Vergleichsprozess nur wenig aufwendiger als im rein zweidimensionalen Fall. Es sind hierfür nur zwei Vergleiche mehr notwendig.

Liegen das Zielgebiet als zweidimensionale Figur, die Empfängerposition aber als 2,5-dimensionales Gebiet vor, so gehen wir wie beim quantitativen Vergleich davon aus, dass der Sender keinerlei Einschränkung bezüglich der Empfängerhöhe bezeichnen will. Somit können die zweidimensionale Zielfigur und die zweidimensionale Basis der Empfängerposition wie für rein zweidimensionale Figuren bereits beschrieben behandelt werden.

Liegt dagegen das Zielgebiet als 2,5D-Figur, die Empfängerposition aber nur als zweidimensionale Figur vor, so muss wieder von einer unterbestimmten Konstellation ausgegangen werden. Analog zum quantitativen Vergleich kann durch eine Nachrichtenkennzeichnung durch den Sender signalisiert werden, ob in diesem Fall auf einen rein zweidimensionalen Vergleich zurückgegriffen oder auf einen Vergleich verzichtet und somit die Nachricht nicht ausgeliefert werden soll.

2.4.2 Symbolisches Lokationsmodell

Neben der geometrischen Adressierung soll das Lokationsmodell für die ortsbezogene Kommunikation auch die symbolische Adressierung unterstützen. Im Folgenden definieren wir zunächst, was unter einem symbolischen Lokationsmodell allgemein zu verstehen ist, das heißt, aus welchen Bestandteilen sich ein solches Modell zusammensetzt. Anschließend definieren wir verschiedene Klassen von symbolischen Lokationsmodellen, um schließlich hieraus ein für die ortsbezogene Kommunikation geeignetes Modell auszuwählen.

Grundlage eines symbolischen Lokationsmodells M bildet wiederum die Menge L_M an ausgezeichneten Lokationen, die beispielsweise Länder, Gebäude, Räume, usw. modellieren. Sowohl Zielgebiete als auch Empfängerpositionen werden jeweils durch eine Lokation aus dieser Menge definiert. Zu beachten ist hier ein wesentlicher Unterschied zur geometrischen Adressierung und Positionsbestimmung. Bei der geometrischen Adressierung und Positionsbestimmung ist es möglich, beliebige Gebiete als Ziel oder Position frei zu wählen, auch solche, die nicht explizit modelliert wurden, das heißt, die nicht Teil der Menge L_M sind (ein Polygon kann zum Beispiel frei definiert werden, ohne dass das Modell eine ausgezeichnete Lokation enthalten muss, die genau dieser Lokation entspricht). Die rein symbolische Adressierung und Positionsbestimmung ist dagegen genau auf die im Allgemeinen endliche diskrete Menge an Lokationen aus der Menge L_M beschränkt.

Zwischen den Lokationen des Modells können wiederum verschiedene räumliche Beziehungen existieren, das heißt, die Lokationsmenge L_M ist entsprechend der räumlichen Relationen zwischen Lokationen strukturiert. Auch hier ist ein wesentlicher Unterschied zur geometrischen Modellen zu beachten. Bei geometrischen Modellen ergeben sich die räumlichen Relationen zwischen Lokationen implizit aus der geometrischen Beschreibung. Das heißt, es ist insbesondere keine explizite Modellierung der räumlichen Konfiguration Θ_M (vergleiche Abschnitt 2.3.1) erforderlich. Für symbolische Modelle gilt dies im Allgemeinen nicht. Da sich räumliche Relationen im Gegensatz zu einem geometrischen Modell nicht aus der Geometrie herleiten lassen, ist es wesentliche Aufgabe des Lokationsmodells, diese Relationen *explizit* abzubilden und somit Θ_M zu definieren. Hierfür dient eine Menge Φ an räumlichen Relationen als Grundlage. Die verschiedenen Lokationsmodellklassen, die weiter unten im Detail vorgestellt werden, unterscheiden sich im Wesentlichen bezüglich der unterstützten Basismenge an Relationen Φ . Je nach Klasse können nur bestimmte Relationen tatsächlich modelliert werden. Beispielsweise unterstützt ein Lokationsmodell auf Basis des RCC5 die bereits aus Abschnitt 2.3.2.1 bekannten Basisrelationen $\Phi_{RCC5} = \{EQ, PO, PP, PPi, DR\}$.

Da sich räumliche Relationen nicht aus der Geometrie herleiten lassen, sondern explizit und unter Umständen manuell modelliert werden müssen, können bei fehlerhafter Modellierung der Relationen inkonsistente Modelle – genauer *inkonsistente Konfigurationen* – entstehen. Für eine inkonsistente Konfiguration existiert keine Realisierung, das heißt, die modellierte Konstellation kann niemals in der Realität auftreten. Die folgende Konfiguration $\Theta_{inconsistent}$ kann beispielsweise nicht realisiert werden:

$$\Theta_{inconsistent} = \{DR(l_1, l_2), PP(l_3, l_1), PP(l_3, l_2)\} \quad (2.8)$$

$\Theta_{inconsistent}$ ist inkonsistent, da l_3 niemals gleichzeitig Teil zweier disjunkter Gebiete l_1 und l_2 sein kann. Entsprechend bezeichnen wir ein Lokationsmodell als konsistent, wenn seine Konfiguration konsistent ist, das heißt, wenn das Modell eine reale Entsprechung besitzen kann. Hierbei ist zu beachten, dass dieser Konsistenzbegriff keine Aussage darüber trifft, ob ein Modell tatsächlich *konsistent mit der Realität* ist, nur dass das Modell selbst nicht widersprüchlich ist. Ein konsistentes Modell im Sinne unserer Definition kann der Realität entsprechen, kann aber auch bei einem Modellierungsfehler von der Realität abweichen. Umgekehrt ist für ein inkonsistentes Modell im Sinne unserer Definition eine Entsprechung mit der Realität ausgeschlossen.

Im Folgenden stellen wir verschiedene Klassen symbolischer Lokationsmodelle vor, die sich wie bereits angedeutet hauptsächlich in der Menge der unterstützten räumlichen Relationen unterscheiden.

2.4.2.1 Flaches Lokationsmodell

Flache Lokationsmodelle sind dadurch charakterisiert, dass sie die Inklusionsbeziehung PP nicht abbilden. Je nachdem ob partiell überlappende Lokationen zugelassen sind, können nach [Leo98] zwei Unterklassen des flachen Modells unterschieden werden, nämlich die zonenbasierten und zellenbasierten Modelle.

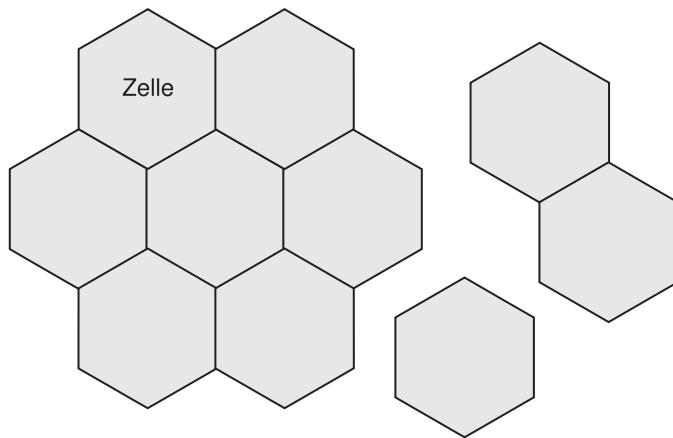


Abbildung 2.4: Zellenbasiertes Modell aus disjunkten Lokationen

Zellenbasiertes Modell

Das zellenbasierte Modell modelliert keine überlappenden Lokationen. Mit anderen Worten: Zwei Lokationen sind identisch oder disjunkt, und dieses Modell bildet die Relationen $\Phi_{cell} = \{EQ, DR\}$ ab. Abbildung 2.4 zeigt ein exemplarisches zellenbasiertes Modell.

Eine Einteilung von Lokationen in Zellen ist beispielsweise häufig in Mobilfunksystemen anzutreffen. Allerdings überlappen sich bereits hier die Zellen strenggenommen an den Rändern, um einen nahtlosen Wechsel (engl. handover) der Benutzer zwischen den Zellen zu ermöglichen. Für die geographische Kommunikation sind allerdings auch reale Lokationen von Bedeutung, die oft auch Überlappungen aufweisen. Somit eignet sich ein zellenbasiertes Modell hier nur sehr bedingt.

Zonenbasiertes Modell

Zonenbasierte Modelle bilden zusätzlich zu identischen und disjunkten Lokationen auch partiell überlappende Lokationen ab, das heißt, $\Phi_{zone} = \{EQ, PO, DR\}$. Wie für flache Modelle üblich, wird weiterhin keine Inklusionsbeziehung modelliert. Abbildung 2.5 zeigt ein exemplarisches zonenbasiertes Modell.

Offensichtlich ist auch das zonenbasierte Modell nur bedingt für die ortsbezogene Kommunikation geeignet, da die hierfür wichtige und häufig auftretende räumliche Inklusionsbeziehungen zwischen Lokationen nicht abgebildet wird. So kann mit diesem Modell – wie auch mit flachen Modellen im Allgemeinen – beispielsweise nicht dargestellt werden, dass die Lokation „Raum 2.062“ Teil der Lokation „Gebäude Universitätsstraße 38“ ist – eine in der Realität häufig zwischen ausgezeichneten Lokationen wie Räumen, Stockwerken und Gebäuden auftretende Beziehung mit entsprechend hoher Relevanz für die geographische Kommunikation.

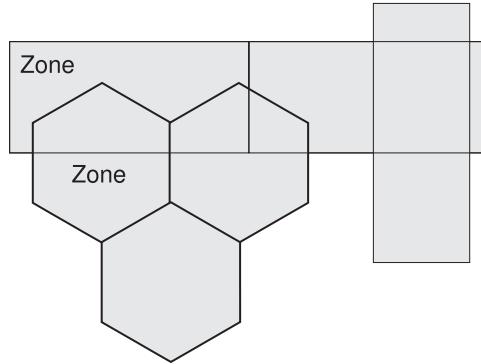


Abbildung 2.5: Zonenbasiertes Modell aus überlappenden und disjunkten Lokationen

2.4.2.2 Hierarchische Lokationsmodelle

Der wesentliche Nachteil eines flachen Lokationsmodells im Kontext der ortsbezogenen Kommunikation ist wie oben beschrieben die fehlende Möglichkeit zur Modellierung der räumlichen Inklusionsbeziehung (PP-Relation). Hierarchische Modelle bilden dagegen diese Beziehung ab. Durch die Modellierung der PP-Relation ist auf den Lokationen eine Halbordnung $< \in L \times L$ definiert, die zu einer Hierarchie von Lokationen führt:

$$l_1 < l_2 \quad \text{gdw.} \quad \text{PP}(l_1, l_2) \quad (2.9)$$

$$l_1 \leq l_2 \quad \text{gdw.} \quad \text{PP}(l_1, l_2) \vee \text{EQ}(l_1, l_2) \quad (2.10)$$

Im weiteren Verlauf der Arbeit bezeichnen wir l_1 als einen *Nachfahren* von l_2 , wenn $l_1 < l_2$ gilt und l_2 entsprechend als einen *Vorfahren* von l_1 .

Für eine einfachere Beschreibung führen wir außerdem die Menge der Vorfahren (engl. ancestors), direkten Vorfahren (engl. parents) und direkten Nachfahren (engl. children) einer Lokation l ein:

$$\text{ancestors}(l) = \{l' \in L \mid l' > l\} \quad (2.11)$$

$$\text{parents}(l) = \{l' \in L \mid l' > l \wedge \nexists l'' \in L : l' > l'' > l\} \quad (2.12)$$

$$\text{children}(l) = \{l' \in L \mid l > l' \wedge \nexists l'' \in L : l > l'' > l'\} \quad (2.13)$$

$$(2.14)$$

Wir definieren außerdem zwei ausgezeichnete Lokationen $\top \in L$ (Top bzw. überall, engl. everywhere) und $\perp \in L$ (Bottom bzw. nirgends, nowhere), welche die Hierarchie nach oben bzw. unten abschließen:

$$\forall l \in L : l \neq \top \rightarrow \top > l \quad (2.15)$$

$$\forall l \in L : l \neq \perp \rightarrow \perp < l \quad (2.16)$$

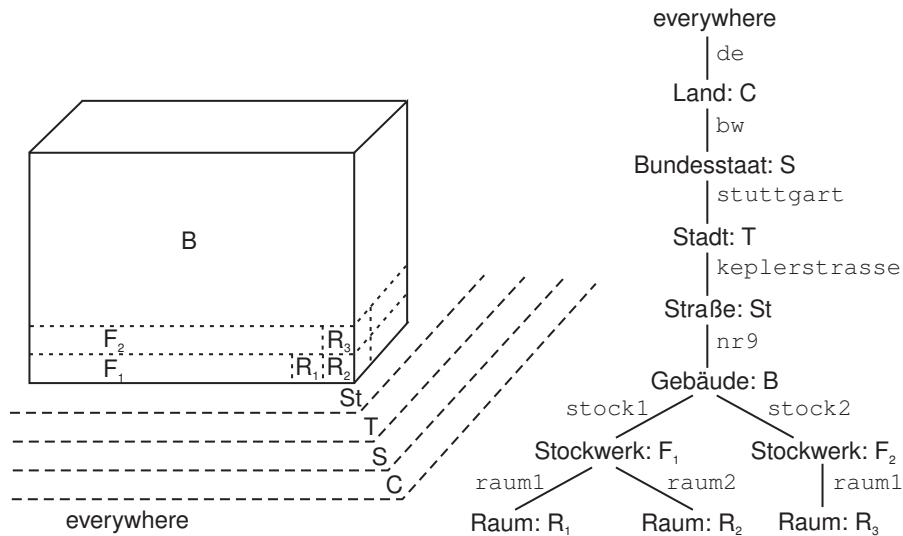


Abbildung 2.6: Baumförmiges Lokationsmodell. In dieser Abbildung sind nur die direkten Inklusionsbeziehungen zwischen Vater- und Kindlokationen dargestellt. Alle weiteren Lokationen sind disjunkt oder entsprechend der Transitivität der Inklusionsbeziehung Vorbzw. Nachfahren. Die Lokation \perp wurde zu Gunsten einer übersichtlicheren Darstellung nicht abgebildet.

Alleine die Berücksichtigung der PP-Relation liefert noch keine Aussage darüber, in welcher Relation jeweils zwei verschiedene Lokationen l_1 und l_2 ($l_1 \neq l_2$) zueinander stehen, bei denen nicht die eine Lokation Teil der anderen ist, das heißt, für die gilt $l_1 \not> l_2 \wedge l_1 \not< l_2$. Betrachtet man die verbleibenden Relationen des RCC5, so können diese Lokationen sich entweder teilweise überlappen ($PO(l_1, l_2)$) oder sie können disjunkt sein ($DR(l_1, l_2)$). Je nachdem ob das Lokationsmodell partiell überlappende Lokationen durch die Abbildung der Relation PO -Relation unterstützt, können verschiedene Klassen von hierarchischen Lokationsmodellen unterschieden werden, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

Lokationsbaum

Das einfachste hierarchische Lokationsmodell entsteht dann, wenn sich Lokationen nicht partiell überlappen, das heißt, eine Lokation ist entweder vollständig in einer anderen Lokation enthalten, oder die Lokationen sind jeweils disjunkt, und es gilt somit $\Phi_{\text{tree}} = \{\text{EQ}, \text{PP}, \text{PPI}, \text{DR}\}$. Das Resultat ist ein *Lokationsbaum*, in dem jede Lokation – bis auf die Sonderfälle T und \perp – höchstens eine Vaterlokation besitzt. Per Definition besitzt T keine Vaterlokation, und \perp ist in jeder Lokation enthalten und ist somit Kind jeder Blattlokation des Baums. Abbildung 2.6 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt aus einem solchen baumförmigen Lokationsmodell.

Um einzelne Lokationen im Modell M für die Definition von Zielgebieten und Empfängerpositionen verwenden zu können, muss das Lokationsmodell ein Adressierungsschema $\alpha_M : L_M \rightarrow A_M$ definieren (vergleiche Abschnitt 2.3.1). Aufgrund der

hierarchischen Natur des Modells bieten sich hierzu hierarchische Adressen der Form /lokationsname1/lokationsname2/... an. Das heißt, eine *absolute symbolische Adresse* besteht aus einer Menge von *relativen Adressen*, die eine Lokation jeweils eindeutig im Kontext ihrer Vaterlokation identifizieren. In Abbildung 2.6 sind diese relativen Adressen jeweils an der Kante zwischen Vater- und Kindlokation angegeben. Die absolute Adresse wird durch die Verknüpfung aller relativen Adressen auf dem Pfad vom Top-Element der Hierarchie hin zur zu adressierenden Lokation gebildet. So hat die Lokation *B* in Abbildung 2.6 beispielsweise die Adresse /de/bw/stuttgart/keplerstrasse/nr9 wodurch das Gebäude mit der Hausnummer 9 in der Keplerstraße in Stuttgart, Baden-Württemberg in Deutschland eindeutig identifiziert wird.

In XML-Schreibweise kann somit eine symbolische Lokation wie folgt zur Definition eines Zielgebiets verwendet werden:

```

<targetarea>
  <!-- Symbolische definiertes Gebiet. -->
  <area-symbolic>
    <!-- Angaben bezüglich des globalen symbolischen Modells -->
    <referencesystem>
      <refsysid>globalsymbols</refsysid>
    </referencesystem>
    <!-- symbolische Lokationsadresse -->
    <symbolicaddress>
      /de/bw/stuttgart/keplerstrasse/nr9
    </symbolicaddress>
  </area-symbolic>
</targetarea>

```

Durch das Element *area-symbolic* wird ein symbolische definiertes Gebiet angezeigt, dessen Adresse als Inhalt des Elements *symbolicaddress* angegeben wird. Durch das Attribut *refsysid* wird analog zum geometrischen Fall ein Bezugssystem definiert, bezüglich dessen die Lokationsangabe zu interpretieren ist. Für ein hierarchisches symbolisches Modell definiert dieses Bezugssystem die Vaterlokation relativ zu der die symbolische Adresse zu interpretieren ist. *globalsymbols* kennzeichnet in diesem Beispiel das globale symbolische Modell, das heißt, die folgende Adresse ist relativ zur Top-Lokation des globalen Modells zu interpretieren. In Abschnitt 2.5.1.1 werden wir zeigen, wie dieses Attribut genutzt werden kann, um Adressen in Bezug auf lokale Bezugssysteme zu definieren.

Entsprechend dieses Beispiels kann auch eine Empfängerposition durch Angabe der entsprechenden symbolischen Adresse definiert werden.

RCC5-Modell

Der wesentliche Nachteil eines baumförmigen Lokationsmodells ist die Einschränkung bei der Modellierung partiell überlappender Lokationen, die nicht in einem solchen Modell abgebildet werden können. Bereits das folgende Beispiel zeigt aber, dass dies in der Praxis durchaus eine relevante Einschränkung darstellen kann.

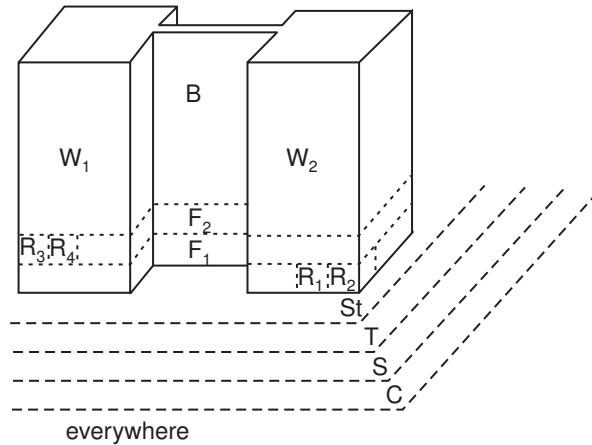


Abbildung 2.7: Beispielhaftes Gebäude bestehend aus Flügeln (W_1, W_2) und Stockwerken (F_1, F_2).

In Abbildung 2.7 ist ein exemplarisches Gebäude dargestellt, das aus zwei Stockwerken (F_1, F_2) und zwei Flügeln (W_1, W_2) besteht. Will man nun die Möglichkeit schaffen, Geocast-Nachrichten sowohl an Empfänger in einem Flügel des Gebäudes als auch an einzelne Stockwerke zu schicken, so müssen beide Lokationen im Modell abgebildet werden. Da Stockwerke und Flügel allerdings partiell überlappen, ist dies mit einem einfachen baumförmigen Modell nicht möglich. Hier muss man sich bereits bei der Modellierung entweder für die Stockwerkseinteilung *oder* die Einteilung nach Gebäudeflügeln entscheiden.

Um auch überlappende Lokationen modellieren zu können, ist also ein mächtigeres Modell erforderlich, das auch die Relation PO unterstützt. Da die fünf Basisrelationen des RCC5 diese Relation beinhalten, kann dieses Kalkül somit als Basis für ein solches Modell dienen. Es gilt dann für ein solches *RCC5-Modell* $\Phi_{\text{RCC5}} = \{\text{EQ}, \text{PO}, \text{PP}, \text{PPI}, \text{DR}\}$. So kann beispielsweise das obige Gebäude mit Hilfe des RCC5 durch die Lokationen $L_M = \{\top, C, S, T, St, B, F_1, F_2, W_1, W_2, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, \perp\}$ und $|L_M|(|L_M| - 1) = 16 \times 15 = 240$ Relationen modelliert werden.

Wie man sieht, ist die Menge der Relationen bereits für dieses einfache Beispiel mit nur 16 Lokationen relativ groß. Zunächst ist allerdings zu beachten, dass die meisten Lokationen tatsächlich disjunkt (DR) sind. Nimmt man an, dass alle Lokationen, die nicht explizit als nicht disjunkt modelliert wurden, disjunkt sind, so reduziert sich der Modellierungsaufwand bereits stark. Des Weiteren müssen nicht alle Inklusionsbeziehungen explizit modelliert werden. Aufgrund der Transitivität dieser Beziehung genügt es, die PP-Relationen zwischen Vater- und Kindlokationen zu definieren. Die restlichen PP-Relationen zwischen Vor- und Nachfahren können abgeleitet werden. Die Relation PO für partiell überlappende Lokationen ist zwar nicht transitiv. Allerdings kann mit Hilfe der Inklusionsbeziehung zumindest teilweise festgestellt werden, welche Lokationen sich partiell überlappen. Ist eine Lokation l_1 vollständig in zwei anderen Lokationen l_2 und l_3 enthalten, und enthält weder l_2 vollständig l_3 noch umgekehrt, so müssen sich l_2 und l_3

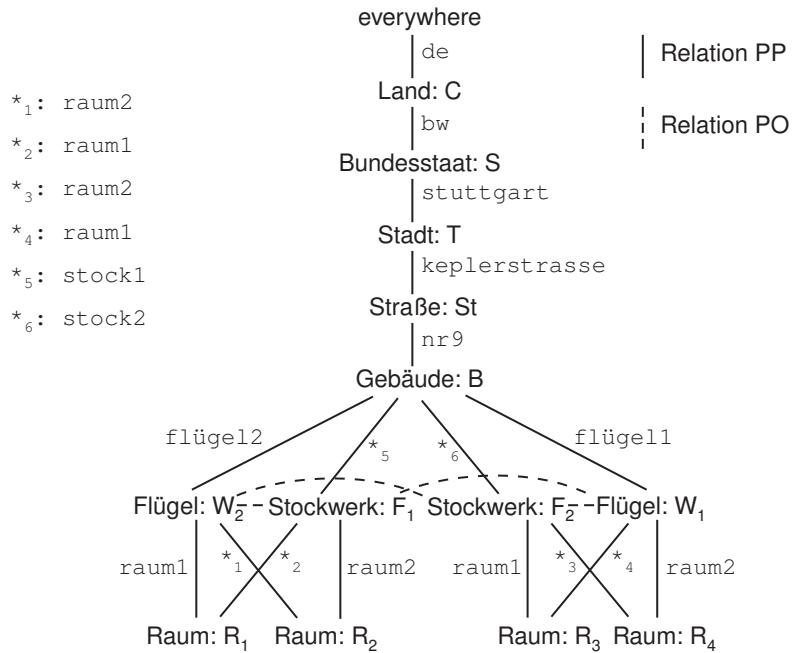


Abbildung 2.8: RCC5-Modell des in Abbildung 2.7 dargestellten Gebäudes. Dargestellt sind nur die direkten Inklusionsbeziehungen (durchgezogene Linien) zwischen Vater- und Kindlokationen und partielle Überlappungen (gestrichelte Linien). Aufgrund der Transitivitat der Inklusionsbeziehung gilt die Inklusion entsprechend zwischen Vor- und Nachfahren. Alle weiteren Lokationen sind disjunkt. Auf die Darstellung der Lokation \perp wurde zu Gunsten einer übersichtlicheren Darstellung verzichtet.

partiell überlappen:

$$\text{PP}(l_1, l_2) \wedge \text{PP}(l_1, l_3) \wedge \neg \text{PP}(l_2, l_3) \wedge \neg \text{PP}(l_3, l_2) \rightarrow \text{PO}(l_2, l_3) \quad (2.17)$$

Ordnet man die Lokationen wieder entsprechend der Inklusionsbeziehung $<$ an, so entsteht erneut eine Hierarchie von Lokationen wie in Abbildung 2.8 dargestellt. Ebenfalls in dieser Abbildung dargestellt ist das Adressierungsschema. Zu beachten ist, dass nun eine Lokation mehrere Adressen besitzen kann, da es entlang der Inklusionsrelation von der Wurzel zur jeweiligen Lokation mehrere Pfade geben kann. So hat der Raum R_1 in diesem Beispiel die Adressen `/de/bw/stuttgart/keplerstrasse/nr9/stock1/raum1` und `/de/bw/stuttgart/keplerstrasse/nr9/flügel2/raum1`. Jede Adresse bezeichnet dabei noch immer eindeutig eine bestimmte Lokation.

Offensichtlich ist das RCC5-Modell also in der Lage, partiell überlappende Lokationen zu modellieren. Ein Nachteil des RCC5-Modells stellt allerdings die Tatsache dar, dass ohne weitere Modellierungseinschränkungen beziehungsweise Modellierungsrichtlinien mehrdeutige Modelle entstehen können. Zwar garantiert die JEPD-Eigenschaft des RCC5, dass zwischen je einem *Paar* von Lokationen genau eine der RCC5-Relationen definiert ist. Betrachtet man allerdings die Beziehungen zwischen mehr als zwei Lokationen, so sind bestimmte Fälle nicht unterscheidbar.

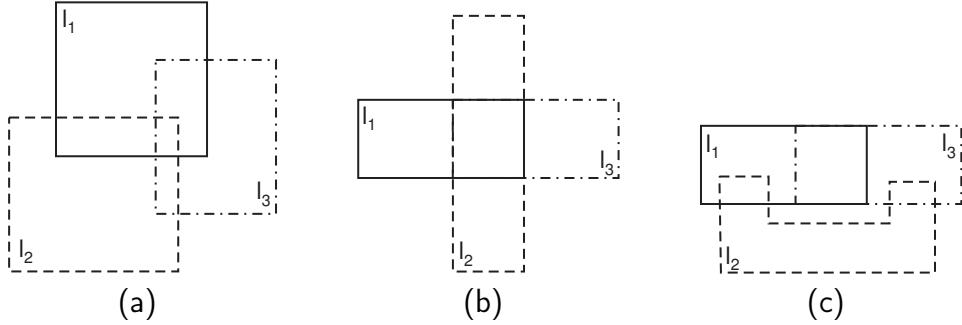


Abbildung 2.9: Mehrdeutiges RCC5-Modell. Drei unterschiedliche Realisierungen der räumlichen Konfiguration $\Theta_M = \{\text{PO}(l_1, l_2), \text{PO}(l_1, l_3), \text{PO}(l_2, l_3)\}$.

Abbildung 2.9 zeigt hierfür ein Beispiel. Diese Abbildung zeigt drei verschiedene Realisierungen – das heißt, mögliche reale Szenarien – der folgenden räumlichen Konfiguration eines Lokationsmodells M :

$$\Theta_M = \{\text{PO}(l_1, l_2), \text{PO}(l_1, l_3), \text{PO}(l_2, l_3)\} \quad (2.18)$$

Obwohl diese Realisierungen im RCC5 identische Darstellungen besitzen, bestehen doch deutliche Unterschiede, wenn man die Beziehungen zwischen allen drei Lokationen gemeinsam betrachtet. In der ersten und zweiten Realisierung (Abbildungen 2.9(a) und 2.9(b)) überlappen sich alle drei Lokationen, während sich in der dritten Realisierung (Abbildung 2.9(c)) die Lokationen jeweils nur paarweise überlappen aber die Schnittmengen untereinander disjunkt sind. Ferner sind auch die ersten beiden Realisierungen nicht identisch. In der ersten Realisierung (Abbildung 2.9(a)) beinhaltet die Schnittmenge von je zwei Lokationen Punkte, die nicht in der jeweils dritten Lokation enthalten sind. In der zweiten Realisierung (Abbildung 2.9(b)) hingegen schneiden sich alle drei Lokationen in genau einem gemeinsamen Gebiet.

Diese Mehrdeutigkeit ist irrelevant, solange die Benutzerposition π als genaue eine Lokation aus L_M dargestellt werden kann, denn dann werden genau zwei Lokationen miteinander verglichen, nämlich das Zielgebiet τ und die Empfängerposition π . Wird allerdings die Benutzerposition π als eine Menge von Lokationen aus L_M ermittelt, so kann es auch bei der Bestimmung der Zugehörigkeit zur Empfängermenge zu Mehrdeutigkeiten kommen wie folgendes einfaches Beispiel erläutert. Angenommen, ein Benutzer kann durch eines oder verschiedene Positionierungssysteme sicher feststellen, ob er sich in Lokation l_2 oder l_3 aufhält. Befindet sich der Benutzer im Schnitt von l_2 und l_3 , so werden beide Lokationen simultan zurückgeliefert. Wir nehmen des Weiteren an, dass sich ein Benutzer genau in diesem Schnittbereich von l_2 und l_3 befindet. Die Lokation l_1 sei dagegen nicht oder nur teilweise durch Positionierungssysteme abgedeckt. Betrachten wir nun eine Geocast-Nachricht an die Lokation l_1 . Sollte diese Nachricht an den Benutzer ausgeliefert werden, wenn das obige Modell zugrunde gelegt wird? Die Antwort ist abhängig von der Realisierung. Bei den Realisierungen 1 und 3 (Abbildungen 2.9(a) und 2.9(b)) besteht die Möglichkeit, dass sich der Benutzer, der sich im Schnittbereich von l_2 und l_3 aufhält, sich gleichzeitig auch in Lokation l_1 aufhält. Bei der Realisierung 1 ist die Wahr-

scheinlichkeit $\psi_{\text{quant}}(\tau, \pi)$ kleiner gleich 1,0; bei der Realisierung 3 ist es sogar sicher, dass sich der Benutzer im Zielgebiet der Nachricht befindet, das heißt, $\psi_{\text{quant}}(\tau, \pi) = 1,0$. Bei der Realisierung 3 dagegen ist es ausgeschlossen, dass sich ein Benutzer, der sich gleichzeitig in Lokation l_2 und l_3 befindet, auch in Lokation l_1 aufhält ($\psi_{\text{quant}}(\tau, \pi) = 0,0$). In diesem Fall darf die Nachricht also nicht zugestellt werden.

Diese Mehrdeutigkeit wird primär dadurch hervorgerufen, dass die Benutzerposition nicht mehr nur durch eine Lokation, sondern durch mehrere Lokationen ausgedrückt wird. Die oben dargestellte Mehrdeutigkeit lässt sich relativ einfach dadurch vermeiden, indem nicht nur die Lokationen l_1 , l_2 und l_3 modelliert werden, sondern zusätzlich auch die Schnittlokationen zwischen diesen Lokationen. Das RCC5-Modell erzwingt dies aber nicht. Im nächsten Abschnitt stellen wir mit dem verbandsbasierten Lokationsmodell ein Modell vor, das genau diese Modellierung von Schnittlokationen sicherstellt und die dargestellte Mehrdeutigkeit dadurch vermeidet.

Lokationsverband

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, führt die fehlende Modellierung von Schnittlokationen zu mehrdeutigen Modellen. Außerdem erweisen sich Schnittlokationen als wichtige Grundlage für die Bestimmung der Zugehörigkeit zur Empfängermenge (siehe Abschnitt 2.4.2.3). Im Gegensatz zum allgemeinen RCC5-basierten Modell fordert das *verbandsbasierte Lokationsmodell* daher die explizite Modellierung solcher Schnittlokationen. Das heißt, wenn für zwei Lokationen l_1 und l_2 der Lokationenmenge L_M gilt $\text{PO}(l_1, l_2)$, so muss L_M ebenfalls genau eine Lokation $l_{1\cap 2}$ enthalten, die das Gebiet definiert, in dem sich l_1 und l_2 überlappen. Somit ist bei diesem Modell die Menge der Lokationen unter der Schnittoperation abgeschlossen.

Durch diese Modellierung von Schnittlokationen folgt, dass je zwei Lokationen $l_1, l_2 \in L_M$ einen eindeutigen größten gemeinsamen Nachfahren, genannt *Infimum* $\text{inf}_{l_1, l_2} \in L$, besitzen, für den gilt:

$$\text{inf}_{l_1, l_2} \leq l_1 \wedge \text{inf}_{l_1, l_2} \leq l_2 \wedge \forall l \in L : l \neq \text{inf}_{l_1, l_2} \wedge l \leq l_1 \wedge l \leq l_2 \wedge l > \text{inf}_{l_1, l_2} \quad (2.19)$$

Wie für allgemeine hierarchische Modelle definiert, schließt das Bottom-Element die Hierarchie wiederum nach unten ab und definiert somit die Schnittlokation von disjunkten Lokationen.

Theoretisch könnte analog zur Abgeschlossenheit unter der Schnittoperation auch die Abgeschlossenheit unter der Vereinigung je zweier Lokationen gefordert werden. In diesem Fall enthielte L_M für jedes Paar l_1, l_2 eine Lokation $l_{1\cup 2}$, welche die Vereinigung von l_1 und l_2 definiert. Allerdings entstünden durch diese Art der Modellierung sehr große Lokationsmengen. Geht man von einer Grundmenge von n Lokationen aus, die der Einfachheit halber zunächst als disjunkt angenommen werden, so hätte die Gesamtmenge L_M eine Mächtigkeit von 2^n Lokationen einschließlich der Lokationen Top und Bottom, wenn alle möglichen Vereinigungen von Lokationen explizit modelliert würden (entspricht allen möglichen Kombinationen der Grundlokationen also der Potenzmenge der Grundmenge). Ein Gebäude mit 30 Räumen würde also bereits zu über einer Milliarde Lokationen führen. Offensichtlich wäre die Menge L_M aufgrund ihres exponentiellen Wachstums

somit kaum handhabbar. Dabei entstünden außerdem viele Lokationen, die in der Praxis für die ortsbezogene Kommunikation kaum Relevanz besäßen. Beispielsweise würde wahrscheinlich nicht eine Nachricht an die Vereinigungslokation „Deutschland & Neuseeland“ gesendet. Aber auch für nahe beieinander liegende Lokationen erscheint die explizite Modellierung der Vereinigung nicht sinnvoll. Anstatt beispielsweise eine Nachricht an die Vereinigungslokation „Deutschland & Österreich & Schweiz“ zu schicken, könnten ohne wesentlichen Mehraufwand drei Nachrichten an jeweils die einzelnen Lokationen gesendet werden. Daher fordern wir nicht die beschriebene explizite Modellierung aller möglichen Vereinigungslokationen.

Durch die Einführung der Top-Lokation und der oben beschriebenen Eigenschaft eines eindeutigen Infimums ist gleichzeitig auch die Existenz eines eindeutigen Supremums garantiert:

Je zwei Lokationen $l_1, l_2 \in L_M$ besitzen einen eindeutigen kleinsten gemeinsamen Vorfahren, genannt *Supremum* $\sup_{l_1, l_2} \in L_M$, für den gilt:

$$\sup_{l_1, l_2} \geq l_1 \wedge \sup_{l_1, l_2} \geq l_2 \wedge \forall l \in L : l \neq \sup_{l_1, l_2} \wedge l \geq l_1 \wedge l \geq l_2 \wedge l < \sup_{l_1, l_2} \quad (2.20)$$

Die Existenz des eindeutigen Supremums für je zwei beliebige Lokationen l_1 und l_2 kann aus der Existenz des Infimums abgeleitet werden:

Beweis durch Widerspruch: Angenommen, l_1 und l_2 besäßen zwei nicht identische kleinste Vorfahren a beziehungsweise b :

1. a und b sind jeweils Vorgänger von l_1 und l_2 : $a \geq l_1, a \geq l_2, b \geq l_1, b \geq l_2$
2. a und b sind tatsächlich verschieden: $a \neq b$
3. a und b sind die kleinsten gemeinsamen Vorfahren von l_1 und l_2 : $\forall l \in L : (l < a \vee l < b) \wedge l \geq l_1 \wedge l \geq l_2$

Da nach (1) $l_1 \leq a$ und $l_2 \leq b$ gilt, liegt l_1 im Schnittbereich der Lokationen a und b . Ebenso gilt aufgrund von (1), dass l_2 im Schnittbereich von a und b liegt. Aufgrund von (3) sind l_1 und l_2 die größten Lokationen, die im Schnittbereich von a und b liegen, das heißt, sowohl l_1 als auch l_2 sind größte gemeinsame Nachfahren von a und b . Dies ist aber ein Widerspruch zur Definition des Infimums, die besagt, dass der größte gemeinsame Nachfahre zweier Lokationen *eindeutig* definiert ist. \square

Durch die Existenz des Infimums und Supremums für jedes Paar von Lokationen ist das beschriebene Lokationsmodell ein Verband.

Abbildung 2.10 zeigt das verbandsbasierte Modell des oben dargestellten Gebäudes. Hinzugekommen sind vier Schnittlokationen ($F_x W_y$), die jeweils den Bereich im Schnitt je eines Stockwerks und eines Gebäudeflügels definieren. Hierdurch wird die Forderung nach einem Infimum erfüllt. Waren vorher beispielsweise sowohl Raum R_1 als auch Raum R_2 Kinder der Lokationen W_2 und F_1 , so definiert nun die Lokation $F_1 W_2$ eindeutig den Schnitt von F_1 und W_2 .

Die Adressierung einer Lokation erfolgt im verbandsbasierten Modell entsprechend der Adressierung im baumbasierten Modell. Absolute Lokationsadressen werden durch

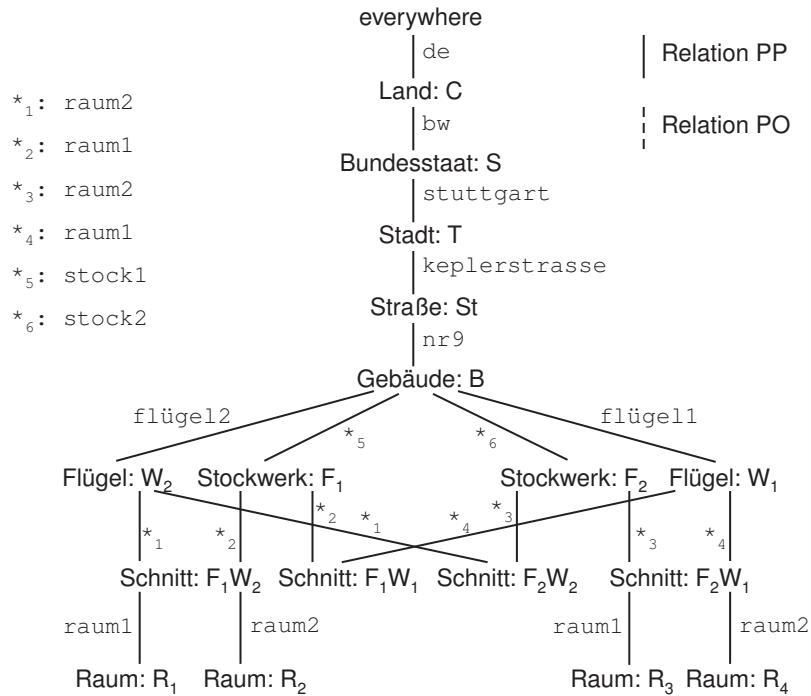


Abbildung 2.10: Verbandsbasiertes Lokationsmodell des in Abbildung 2.7 dargestellten Gebäudes.

die Konkatenation relativer Adressen gebildet. Im Gegensatz zum baumbasierten Modell enthält ein verbandsbasiertes Modell aber mehrere Pfade vom Top-Element zur adressierten Lokation. Somit hat eine Lokation im Allgemeinen auch mehr als eine Adresse. Eine Adresse bezeichnet aber weiterhin nur genau eine Lokation.

Wie später in Abschnitt 3.7 noch genauer beschrieben wird, hat diese Eigenschaft auch Auswirkungen auf die Realisierung des Vermittlungsprozesses. Während in einem baumbasierten Modell einfache Präfixvergleichsoperationen auf Adressen zur Auswertung der Inklusionsbeziehung eingesetzt werden können, ist bei einem verbandsbasierten Modell hierfür Wissen über die Struktur des Verbands erforderlich.

2.4.2.3 Definition der Empfängergruppe

Nachdem im vorigen Abschnitt ein verbandsbasiertes symbolisches Lokationsmodell entworfen wurde, wird nun beschrieben, wie mit Hilfe dieses Modells die Zugehörigkeit zur Empfängermenge definiert werden kann.

Quantitative Definition der Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition

Die quantitative Bestimmung der Zugehörigkeit zur Empfängergruppe erfolgt wiederum durch die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, mit der sich der Empfänger im Schnittgebiet des Zielgebiets und der Empfängerposition befindet. Sowohl das Zielgebiet τ als auch die Empfängerposition π sind nun Lokationen des symbolischen Lokationsmodells.

In einem verbandsbasierten Lokationsmodell wie dem unsrigen kann die Schnittlokation eindeutig durch die Bestimmung des größten gemeinsamen Nachfahren von τ und π bestimmt werden:

$$l_{\tau \cap \pi} = \inf_{\tau, \pi} \quad (2.21)$$

Es stellt sich nun also die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit hält sich der Empfänger, im Gebiet $l_{\tau \cap \pi}$ auf? Im Gegensatz zu einer stetigen geometrischen Verteilung der Empfängerposition, handelt es sich im symbolischen Fall um eine diskrete Verteilung, da π auf Grundlage der endlichen Menge diskreter Lokationen des Modells definiert wird. Wir betrachten zunächst die „Blattlokationen“ $L_{\text{leaves}} = \text{parents}(\perp) \subset L_M$ des Verbandes, das heißt, die Eltern des Bottom-Elements. Zu beachten ist dabei, dass sich diese Blattlokationen per Definition nicht überlappen, da für zwei Blattlokationen $l_{\text{leaf1}}, l_{\text{leaf2}} \in L_{\text{leaves}}$ mit $l_{\text{leaf1}} \neq l_{\text{leaf2}}$ gilt $l_{\text{leaf1}} \cap l_{\text{leaf2}} = \inf(l_{\text{leaf1}}, l_{\text{leaf2}}) = \perp$. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Empfänger in einer Blattlokation $l_{\text{leaf}} \in L_{\text{leaves}}$ aufhält, wird durch die Wahrscheinlichkeitsfunktion $g(l_{\text{leaf}})$ definiert. Somit ist $g(l_{\text{leaf}})$ das diskrete Gegenstück der kontinuierlichen Dichtefunktion $f(x, y)$, wie sie oben für die geometrische Positionierung für die Bestimmung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit in einem geometrisch definierten Gebiet eingesetzt wurde (siehe Abschnitt 2.4.1.1).

Bisher wurden nur Blattlokationen betrachtet. Eine beliebige Lokation (Blatt- oder nicht Blattlokation) $l \in L_M$ kann als eine Menge $L_{\text{leaves}, l}$ von Blattlokationen aufgefasst werden, so dass gilt:

$$L_{\text{leaves}, l} = \{l_{\text{leaf}} \in L_{\text{leaves}} : l_{\text{leaf}} \leq l\} \quad (2.22)$$

Durch diese Zuordnung von allgemeinen Lokationen zu einer Menge von Blattlokationen kann nun mit Hilfe der oben beschriebenen Verteilung $g(l_{\text{leaf}})$ die Wahrscheinlichkeit für den Aufenthalt eines Empfängers im Zielgebiet wie folgt definiert werden:

$$\psi_{\text{quant}}(\tau, \pi) = \sum_{l_{\text{leaf}} \in L_{\text{leaves}, \tau \cap \pi}} g(l_{\text{leaf}}) \quad (2.23)$$

Das heißt, die Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Zielgebiet entspricht der Summe aller Aufenthaltswahrscheinlichkeiten in einer Blattlokation im Zielgebiet.

Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung $g(l_{\text{leaf}})$ für einen bestimmten Empfänger ist analog zum geometrischen Fall Aufgabe des Positionierungssystems. Allerdings treffen die derzeit gebräuchlichen Positionierungssysteme mit symbolischer Ausgabe – beispielsweise RFID- oder infrarotbasierte Systeme – keine Aussage über mögliche Positionierungsfehler, im Gegensatz zu geometrischen Systemen wie GPS (vergleiche Abschnitt 2.4.1.1). Die Ausgabe solcher Systeme entspricht vielmehr einer binären Angabe: „Empfänger h befindet sich in Lokation π “. Dies kann beispielsweise durch die Sichtbarkeit einer in der Lokation π installierten Infrarotbake oder einem in dieser Lokation installierten RFID-Lesegerät festgestellt werden. Für eine so ermittelte Position kann somit angenommen werden, dass sich der Empfänger mit einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit in der ermittelten Lokation aufhält. Die ermittelte Lokation π muss dabei nicht notwendigerweise eine Blattlokation sein. So könnte ein RFID-Lesegerät am Eingang eines Gebäu-

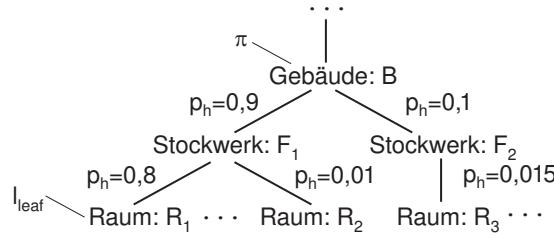


Abbildung 2.11: Um Aufenthaltswahrscheinlichkeiten erweitertes Lokationsmodell. Die Werte an den einzelnen Zweigen geben die Wahrscheinlichkeit an, dass sich ein bestimmter Empfänger h , der an einer bestimmten Lokation lokalisiert wurde, sich ebenfalls in den Kindlokationen dieser Lokation aufhält. Wurde beispielsweise die Lokation π durch ein Positionierungssystem ermittelt, so befindet sich der Empfänger h mit der Wahrscheinlichkeit $0,9 \times 0,8 = 0,72$ in der Lokation l_{leaf} .

des zum Beispiel nur feststellen, dass das Gebäude betreten oder verlassen wurde, nicht aber, in welchem Raum des Gebäudes sich der Empfänger gerade befindet. Andere Empfänger, die mit weiteren Positionierungssystemen ausgestattet sind, können dagegen unter Umständen eine raumgenaue Position ermitteln. Ermittelt das Positionierungssystem eine Position $\pi \notin L_{\text{leaves}}$, das heißt, *keine* Blattlokation, so muss aus dieser Information die Wahrscheinlichkeit für den Aufenthalt an den Blattlokationen $L_{\text{leaves},\pi}$ abgeleitet werden.

Wir gehen zunächst davon aus, dass die Position π eines Empfängers zunächst nur durch ein **einziges** Positionierungssystem ermittelt wird. Wir betrachten wiederum die Menge $L_{\text{leaves},\pi}$ der in π enthaltenen Blattlokationen. Wie bereits oben erwähnt, gehen wir ferner davon aus, dass sich der Empfänger sicher innerhalb der ermittelten Lokation befindet, das heißt, $\sum_{l \in L_{\text{leaves},\pi}} g(l) = 1,0$. Für die Bestimmung von $g(l)$ ist nun eine Aussage darüber notwendig, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich ein Empfänger an der ermittelten Lokation π auch an einer bestimmten Blattlokation $l_{\text{leaf}} \leq \pi$ aufhält. Ohne zusätzliche Informationen kann diese Bestimmung nur auf Grundlage von Heuristiken erfolgen. So kann man beispielsweise von einer Gleichverteilung ausgehen, so dass gilt $g(l \in L_{\text{leaves},\pi}) = \frac{1}{|L_{\text{leaves},\pi}|}$. Theoretisch könnte mit weiteren Kontextinformationen über den Empfänger auch komplexere Heuristiken realisiert werden. Kennt man zum Beispiel die Identität Empfängers und seine üblichen Aufenthaltsorte in einem Gebäude – beispielsweise sein Büro oder die Räumlichkeiten seiner Abteilung – so kann man davon ausgehen, dass er sich mit höherer Wahrscheinlichkeit in diesen Lokationen aufhält. Diese Informationen können in einem erweiterten *Kontextmodell* auf Basis des gegebenen Lokationsmodells verwaltet werden. Die Abbildung 2.11 zeigt hierfür ein Beispiel. An den Kanten sind hier jeweils die Wahrscheinlichkeiten angegeben, dass sich ein Empfänger, der an einer bestimmten Lokation l lokalisiert wurde, in den Kindlokationen von l aufhält. Zu beachten ist, dass diese Wahrscheinlichkeiten empfängerspezifisch sind. Es sind diverse Verfeinerungen dieses Modells denkbar, beispielsweise der Einbezug von Zeitinformationen, um verschiedene Aufenthaltswahrscheinlichkeiten zu bestimmten Tageszeiten zu reflektieren. Entsprechende Heuristiken sind allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit und werden hier nicht weiter betrachtet.

Durch Verwendung mehrerer Positionierungssysteme kann eine präzisere symbolische Positionsbestimmungen ermöglicht werden. In diesem Fall besteht die ermittelte Empfängerposition zunächst aus einer Menge $\{\pi_1, \dots, \pi_n\}$ von Lokationen. Auf Grundlage eines verbandsbasierten Lokationsmodells lässt sich diese Menge an Positionen zu einer einzelnen Position π fusionieren, indem das Infimum $\inf_{\pi_1, \dots, \pi_n} = \pi$ aller Ausgangspositionen bestimmt wird. π liegt im Schnitt der einzelnen Lokationen und ist somit eine Lokation kleineren Ausmaßes und daher eine präzisere Positionsangabe.

Qualitative Definition der Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition

Wie oben beschrieben, gehen wir davon aus, dass sich der Empfänger mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit in der durch eines oder durch mehrere symbolische Positionierungssysteme ermittelten Lokation π aufhält. Somit ist die Empfängerposition im symbolischen Fall bereits als klar begrenztes Gebiet in Form einer einzelnen Lokation π gegeben. Ebenso wird das Zielgebiet τ als eine einzelne Lokation des Modells definiert. Da die beschriebenen hierarchischen Modelle die für die Bestimmung der qualitativen Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition relevanten Relationen modellieren (siehe Abschnitt 2.4.1.1), kann $\psi_{\text{qual}}(\tau, \pi)$ somit einfach durch Abfrage der entsprechenden Relation mit Hilfe des Modells ermittelt werden.

2.4.3 Hybride Adressierung

Die oben beschriebenen Lokationsmodelle ermöglichen die jeweils rein geometrische und symbolische Adressierung. Durch die Kombination dieser Modelle soll im Folgenden ein hybrides Lokationsmodell konzipiert werden, das beide Arten der Adressierung unterstützt. Hierbei ist vor allem zu beachten, dass der Sender nicht notwendigerweise die gleiche Form der Adressierung zur Definition des Zielgebiets verwenden muss, wie die Empfänger für die Definition ihrer aktuellen Position. Beispielsweise kann ein Sender das gewünschte Zielgebiet durch einen Polygonzug definieren, während ein Empfänger seine Position durch eine symbolische Koordinate, beispielsweise eine Raumnummer, bestimmt. Liegt der Raum innerhalb des Polygons, so muss der Empfänger diese Nachricht erhalten. Es ist wiederum Aufgabe des nun hybriden Lokationsmodells, die Relation zwischen Zielgebiet und Empfängerposition zu bestimmen. Um dies zu erreichen, muss im Prozess der Nachrichtenzustellung eine Abbildung von geometrischen auf symbolische Lokationen erfolgen. Eine Kernanforderung an das hybride Lokationsmodell ist daher die Zuordnung von symbolischen Lokationen zu geometrischen Beschreibungen und umgekehrt.

2.4.3.1 Verknüpfung von geometrischen und symbolischen Informationen

In einem hybriden Lokationsmodell werden Lokationen symbolische *und* geometrische Informationen zugeordnet. Das Adressierungsschema $\alpha_M : L_M \rightarrow A_M$ verknüpft eine Lokation $l \in L_M$ nun sowohl mit einer oder mehreren symbolischen Adressen als auch einer zwei- oder 2,5-dimensionalen geometrischen Figur. Die Menge A_M besteht somit sowohl aus symbolischen Adressen als auch geometrischen Figuren. Als Grundlage für die Defini-

tion von Lokationen dient ein hierarchisches Lokationsmodell, wie es in Abschnitt 2.4.2.2 beschrieben wurde. Wie weiter unten noch im Detail dargestellt wird, kann der hierarchische Aufbau des Lokationsmodells für die Approximation symbolischer Lokationen durch geometrische Figuren genutzt und somit der Modellierungsaufwand verringert werden.

Ein ideales hybrides Lokationsmodell würde jeder symbolischen Lokation seine exakte Geometrie zuweisen. Allerdings würde dies zu einem sehr hohen Modellierungsaufwand führen, insbesondere für globale und feingranulare Lokationsmodelle, die aus sehr vielen Lokationen bestehen. Ein wesentlicher Vorteil eines symbolischen Lokationsmodells, nämlich sein vergleichsweiser geringer Modellierungsaufwand, müsste somit bei der durchgängigen Zuordnung exakter geometrischer Beschreibungen aufgegeben werden. Trotzdem ist es für die ortsbezogene Kommunikation erforderlich, *jeder* Lokation eine geometrische Ausdehnung zuzuweisen, um somit beliebige Zielgebiete und Empfängerpositionen miteinander vergleichen zu können. Das folgende Modell stellt dies sicher und reduziert gleichzeitig den für die Erstellung notwendigen Aufwand.

Zunächst erlaubt unser Modell die *explizite* Zuweisung einer Geometrie zu einer symbolischen Lokation. Insbesondere für große Lokationen wie Länder, Städte und Gebäude kann angenommen werden, dass deren Grenzen bekannt sind. Zumindest für das Top-Element der Hierarchie sind die Ausmaße bekannt und entsprechen dem gesamten Koordinatensystem (bei einem globalen Modell also der ganzen Erde).

Wurde einer Lokation keine explizite geometrische Ausdehnung zugewiesen, so erbt diese *implizit* die Geometrie ihrer Vaterlokationen, die wiederum rekursiv die Ausdehnungen ihrer Vaterlokationen erben, falls auch ihnen keine Geometrie explizit zugewiesen wurde. Besitzt eine Lokation nur eine Vaterlokation (baumförmiges Modell), so erbt sie deren Geometrie; besitzt eine Lokation mehrere Vaterlokationen (verbandsbasiertes Modell), so wird die approximierte Geometrie durch das Verschneiden der geometrischen Figuren der Vaterlokationen errechnet. Das Resultat ist allgemein eine approximierte Beschreibung, die größer als die exakte Beschreibung der angenäherten Lokation ist. Im Extremfall wird eine Lokation durch die Ausmaße des kompletten, unter Umständen globalen Koordinatensystems angenähert.

2.4.3.2 Koordinatentransformation zwischen geometrischen und symbolischen Systemen

Mit Hilfe des vorgestellten hybriden Lokationsmodells können sowohl symbolische Lokationen in geometrische Figuren, als auch umgekehrt geometrische Figuren in symbolische Lokationen transformiert werden.

Die *Transformation symbolischer Lokationen in geometrische Figuren* erfolgt über die mit jeder symbolischen Lokation assoziierte exakte oder approximierte geometrische Ausdehnung.

Die *Transformation beliebiger geometrischer Figuren in symbolische Lokationen* erfolgt durch den Vergleich der geometrischen Figur mit den geometrischen Ausdehnungen der symbolischen Lokationen. Da im Allgemeinen die zu transformierende Geometrie nicht exakt der Geometrie einer symbolischen Lokation entspricht, müssen die aus der Transformation resultierenden symbolischen Lokationen so ausgewählt werden, dass sie die

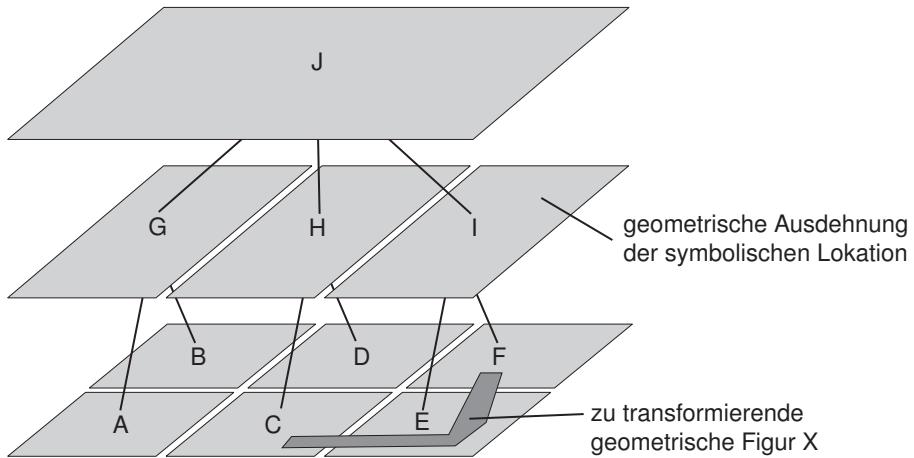


Abbildung 2.12: Transformation geometrischer Figuren in symbolische Lokation mit Hilfe eines hybriden Lokationsmodells. Zu den dargestellten Lokationen enthält das Lokationsmodell sowohl eine symbolische Adresse als auch die geometrische Ausdehnung. Die geometrische Figur X kann entweder in die einzelne Lokation J transformiert und somit auf eine symbolische Adresse abgebildet werden, da J X vollständig enthält. Alternativ kann X in die Lokationsmenge $\{C, I\}$ transformiert und somit auf mehrere symbolische Adressen abgebildet werden.

abzubildende Lokation möglichst genau annähren. Hierfür existieren verschiedene Strategien.

Einerseits kann die geometrische Figur auf *genau eine symbolische Lokation* abgebildet werden. Um eine möglichst genau Annäherung zu erzielen, ist dies die kleinste symbolische Lokation, welche die geometrische Figur vollständig enthält. Überschneidet eine geometrische Figur dabei mehrere symbolische Lokationen, so kann die resultierende symbolische Lokation unter Umständen die Figur nur sehr ungenau annähern. In Abbildung 2.12 kann beispielsweise die geometrische Figur X nur durch die Lokation J angenähert werden.

Andererseits kann eine geometrische Figur durch *mehrere symbolische Lokationen* angenähert werden. Hierzu werden zunächst die kleinsten Lokationen ermittelt, deren assozierte Geometrie die Figur schneiden. Um eine möglichst kleine Menge an symbolischen Lokationen zu erhalten, werden anschließend symbolische Lokationen durch ihre Vaterlokationen ersetzt, falls jeweils alle Kinder der entsprechenden Vaterlokation in der Resultatsmenge enthalten sind. In Abbildung 2.12 wird X in die Lokationen C und I transformiert. Da alle Kindlokationen von I in diesem Beispiel mit X überlappen, können diese durch I ersetzt werden, um die Größe der Resultatsmenge zu reduzieren.

Beide Ansätze besitzen Vor- und Nachteile. Die Abbildung auf eine Lokation erlaubt eine sehr kompakte Darstellung durch eine einzige symbolische Lokation, allerdings ist die resultierende Ungenauigkeit nur schwer abschätzbar und insbesondere von der gegebenen Aufteilung des symbolischen Modells abhängig. Die Abbildung auf mehrere Lokationen besitzt im Allgemeinen eine höhere Genauigkeit, die Größe der resultierenden

Lokationsmenge ist allerdings in diesem Fall nur schwer abschätzbar und ebenfalls von der Aufteilung des Lokationsmodells abhängig.

Bei der Abbildung von geometrischen auf symbolische Lokationen muss somit im Allgemeinen ein Kompromiss zwischen kompakter Darstellung und Genauigkeit der resultierenden symbolischen Lokationsmenge durch die Wahl einer der vorgeschlagenen Transformationsstrategien eingegangen werden.

2.5 Erweitertes Lokationsmodell

Das entworfene hybride Lokationsmodell unterstützt bereits sowohl die geometrische als auch die symbolische Adressierung von Geocast-Nachrichten. In diesem Abschnitt soll dieses Modell einerseits um die Möglichkeit zur Definition lokaler Lokationsmodelle mit räumlich beschränkter Gültigkeit erweitert werden; andererseits soll die Möglichkeit zur Adressierung mobiler Zielgebiet geschaffen werden [DBR03].

2.5.1 Lokale Referenzsysteme

In der bisherigen Diskussion wurden nur geometrische Koordinaten und symbolische Lokationen in Bezug auf ein durchgängiges *globales* Referenzsystem betrachtet. Neben solchen globalen Systemen sind auch lokale Referenzsysteme denkbar.

Lokale Referenzsysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie nur ein beschränktes räumliches Gebiet abdecken. Koordinaten bezüglich eines lokalen Koordinatensystems sind nur innerhalb dieses *Gültigkeitsbereichs* (engl. *scope*) interpretierbar. Solche lokalen Systeme sind immer dann vorteilhaft, wenn sich Koordinaten in diesem System leichter definieren, interpretieren oder verarbeiten lassen als in einem globalen Bezugssystem.

So geben beispielsweise verschiedene Positionierungssysteme Koordinaten bezüglich lokaler Referenzsysteme aus. Dies trifft typischerweise auf diverse Positionierungssysteme für den Innenraumbereich zu, die systembedingt nur eine beschränkte räumliche Abdeckung aufweisen. Mit Hilfe eines geeigneten lokalen Modells können die von einem solchen System ausgegebenen Koordinaten in globale Koordinaten umgerechnet werden.

Ferner erleichtern lokale Systeme oft die Interpretation von Koordinaten. So lassen sich Koordinaten meist einfacher in kartesischen Systemen interpretieren. Beispielsweise lassen sich in solchen Systemen Entfernungen zwischen einzelnen Punkten sehr viel einfacher berechnen als in sphärischen Systemen oder Koordinaten basierend auf Ellipsoiden wie den Breiten- und Längengraden des WGS84. Ebenso lässt sich beispielsweise ein Gebäude mit seinen oft rechtwinkligen Formen sehr viel einfacher durch lokale kartesische Koordinaten modellieren.

Die isolierte Betrachtung von lokalen Koordinaten ist insbesondere für einen globalen Geocast-Dienst nicht sinnvoll. Vielmehr muss die Möglichkeit zum Vergleich beliebiger Koordinaten geschaffen werden, unabhängig von den ursprünglichen Bezugssystemen. Um lokale Koordinaten mit globalen Koordinaten oder lokalen Koordinaten anderer lokaler Systeme vergleichen zu können, werden lokale Systeme in ein globales System oder andere übergeordnete lokale Systeme eingebettet, so dass eine Koordinatentransformati-

on zwischen einzelnen Systemen ermöglicht wird. Im Idealfall ist somit eine Transformation zwischen jedem Paar lokaler oder globaler Systeme definiert, so dass beliebige Koordinaten in Bezug zueinander gesetzt werden können. Hierfür muss für lokale Systeme ihre Lage bezüglich dieser übergeordneten Systeme definiert werden.

Die Einbettung lokaler Systeme erlaubt des Weiteren eine kombinierte hybride Adressierung, die sowohl geometrische als auch symbolische Teile in einer Adresse kombiniert und so beispielsweise Adressen der Form „symbolisch (global) → geometrisch (lokal)“, „geometrisch (global) → symbolisch (lokal)“, usw. ermöglicht.

Im Folgenden gehen wir im Detail auf die die Einbettung lokaler symbolischer und geometrischer Systeme sowie die Koordinatentransformation zwischen verschiedenen Systemen ein.

2.5.1.1 Lokale symbolische Modelle

Wir betrachten zunächst die Einbettung lokaler symbolischer Lokationsmodelle in übergeordnete geometrische Modelle. Als ein typisches Beispiel hierfür soll die Einbettung eines lokalen symbolischen Gebäudemodells in ein auf Grundlagen des WGS84 definiertes globales Lokationsmodell dienen. Hierdurch kann beispielsweise ein infrarotbasiertes Positionierungssystem innerhalb des Gebäudes verwendet werden, das symbolische Positionen in Form von Raumnummern ermittelt, während außerhalb des Gebäudes ein globales Positionierungssystem wie GPS mit geometrischer Ausgabe bezüglich des WGS84 zum Einsatz kommt und somit Orte wie Straßen, Plätze, usw. sinnvollerweise geometrisch modelliert werden.

Um das lokale symbolische System in das globale geometrische System einzubetten, führen wir das Konzept des *Ankerpunktes*³ ein. Der Ankerpunkt dient, wie der Name symbolisiert, der „Verankerung“ des lokalen Systems im übergeordneten System durch die Bestimmung des Ortes des lokalen Modells in Bezug zum übergeordneten System. Zur Definition des Ankerpunkts bietet sich der Gültigkeitsbereich des lokalen symbolischen Systems an, welcher den Ausmaßen der Wurzellokation des lokalen symbolischen Modells entspricht. Das heißt, das lokale System kann durch die Verortung des durch den Gültigkeitsbereich definierten Gebiets im übergeordneten System verankert werden. Im Beispiel des lokalen Gebäudemodells sind lokale symbolische Koordinaten nur innerhalb dieses Gebäudes gültig. Die geometrischen Ausmaße des Gebäudes definiert in Bezug zum WGS84 stellen somit ein geeignetes Gebiet für die Verankerung des lokalen Systems im übergeordneten geometrischen Modell dar.

Das folgende Beispiel zeigt die beschriebene Einbettung eines lokalen symbolischen Gebäudemodells in ein globales geometrisches Modell bezüglich des WGS84 in XML-Notation. Der Gültigkeitsbereich des Gebäudes entsprechend der Top-Lokation des lokalen symbolischen Modells ist in Form eines Polygons angegeben. Das übergeordnete Modell wird über die global eindeutige Kennung WGS84 identifiziert. Das lokale System erhält selbst eine im Gültigkeitsbereich eindeutige Kennung: uni_stuttgart-building_v38.

³In der Tat kann der Ankerpunkt auch durch ein Gebiet definiert sein.

```

<localreferencesystem>
  <scope>
    <-- Angaben bezüglich WGS84 -->
    <referencesystem>
      <refsysid>WGS84</refsysid>
    </referencesystem>
    <area-2d_geometric>
      <polygon>
        <vertex>...</vertex>
        ...
      </polygon>
    </area-2d_geometric>
  </scope>
  <refsysid>
    uni_stuttgart-building_v38
  </refsysid>
</localreferencesystem>

```

Diese Kennung wird verwendet, um Koordinaten in Bezug auf das lokale Modell anzugeben, wie das folgende Beispiel demonstriert:

```

<targetarea>
  <-- Symbolische definiertes Gebiet. -->
  <area-symbolic>
    <-- Angaben bezüglich des lokalen symbolischen Modells. -->
    <referencesystem>
      <-- Scope des lokalen Modells. -->
      <scope>
        <referencesystem>
          <refsysid>WGS84</refsysid>
        </referencesystem>
        <area-2d_geometric>
          <polygon>
            <vertex>...</vertex>
            ...
          </polygon>
        </area-2d_geometric>
      </scope>
      <-- ID des lokalen Modells. -->
      <refsysid>uni_stuttgart-building_v38</refsysid>
    </referencesystem>
    <-- Lokale symbolische Lokationsadresse. -->
    <symbolicaddress>
      /floor2/room2.402
    </symbolicaddress>
  </area-symbolic>
</targetarea>

```

```

</area-symbolic>
</targetarea>

```

In diesem Beispiel wird ein Raum durch Angabe seiner symbolischen Adresse im Bezug auf das oben definierte lokale symbolische Modell `uni_stuttgart-building_v38` adressiert. Die Raumadresse `/floor2/room2.402` ist also relativ zur Wurzellokation des lokalen Modells – im Beispiel ein Gebäude – zu interpretieren. Die Identifikation des lokalen Modells erfolgt durch Angabe des Gültigkeitsbereichs und der in diesem Gültigkeitsbereich eindeutigen Kennung des lokalen Modells. Hierbei kann der angegebene Gültigkeitsbereich auch größer als der bei der Definition des Gebäudes angegebene Bereich gewählt werden, vorausgesetzt, der Bezeichner des lokalen Modells ist immer noch eindeutig in diesem Bereich.

Die Festlegung des Ankerpunkts des lokalen symbolischen Systems durch geometrische Koordinaten erlaubt auch die geometrische Approximierung lokaler symbolischer Lokationen. Hierzu erben alle symbolisch definierten lokalen Lokationen die geometrischen Ausmaße der Wurzellokation. Im Beispiel wird hierdurch die Umrechnung einer lokalen symbolischen Adresse in eine globale geometrische Ausdehnung bezüglich des WGS84 und somit der Vergleich globaler Zielgebiete bzw. Empfängerpositionen mit lokalen Zielgebieten oder Empfängerpositionen ermöglicht – allerdings nur auf Grundlage approximierter anstatt exakter Geometrien und den daraus resultierenden unscharfen Aussagen bezüglich der Zugehörigkeit eines Empfängers zur Empfängergruppe.

2.5.1.2 Lokale geometrische Modelle

Auf die gleiche Weise kann ein lokales geometrisches System in ein symbolisches System eingebettet werden. Dieser Fall könnte zum Beispiel dann auftreten, wenn auf einem bestimmten Stockwerk eines Gebäudes ein WLAN-basiertes Positionierungssystem mit geometrischer Ausgabe eingesetzt werden soll. Das folgende Beispiel zeigt die Einbettung eines lokalen geometrischen Koordinatensystems eines Stockwerks in das übergeordnete symbolische Modell eines Gebäudes das Teil des globalen symbolischen Modells ist.

```

<localreferencesystem>
  <scope>
    <!-- Angaben bezüglich des globalen symbolischen Modells -->
    <referencesystem>
      <refsysid>globalsymbols</refsysid>
    </referencesystem>
    <symbolicaddress>
      /de/bw/stuttgart/keplerstrasse/nr9/floor2
    </symbolicaddress>
  </scope>
  <refsysid>
    floor2
  </refsysid>
</localreferencesystem>

```

Auch in diesem Fall kann der Gültigkeitsbereich dazu genutzt werden, Koordinaten im lokalen System durch eine globale Lokation zu approximieren. In diesem Beispiel wird allen lokalen geometrischen Koordinaten die symbolische Lokation /de/bw/stuttgart/keplerstrasse/nr9/floor2 zugeordnet.

2.5.1.3 Verschachtelte Systeme

Die Einbettung lokaler Systeme in übergeordnete Systeme ermöglicht auch die mehrfache Verschachtelung lokaler Systeme. Das folgende Beispiel zeigt die Einbettung eines lokalen geometrischen Systems mit dem Bezeichner `meeting_area` in das lokale symbolische Gebäudemodell namens `uni_stuttgart-building_v38`, das wiederum in das globale geometrische Modell bezüglich WGS84 eingebettet wurde:

```

<localreferencesystem>
  <!-- Definition eines lokalen geometrischen Modells,
      das in ein lokales symbolisches Modell eingebettet ist,
      das wiederum in ein globales geometrisches System
      eingebettet ist. -->
  <scope>
    <referencesystem>
      <scope>
        <referencesystem>
          <refsysid>WGS84</refsysid>
        </referencesystem>
        <area-2d_geometric>
          <polygon>
            <vertex>...</vertex>
            ...
            </polygon>
          </area-2d_geometric>
        </scope>
        <refsysid>uni_stuttgart-building_v38</refsysid>
      </referencesystem>
      <symbolicaddress>
        /floor2/room2.402
      </symbolicaddress>
    </scope>
    <refsysid>
      meeting_area
    </refsysid>
  </localreferencesystem>

```

Abbildung 2.13 zeigt dieses Szenario.

Um in diesem Beispiel den Gültigkeitsbereich des lokalen geometrischen Systems im Raum 2.402 auf Stockwerk 2 relativ zum übergeordneten Gebäudereferenzsystem defi-

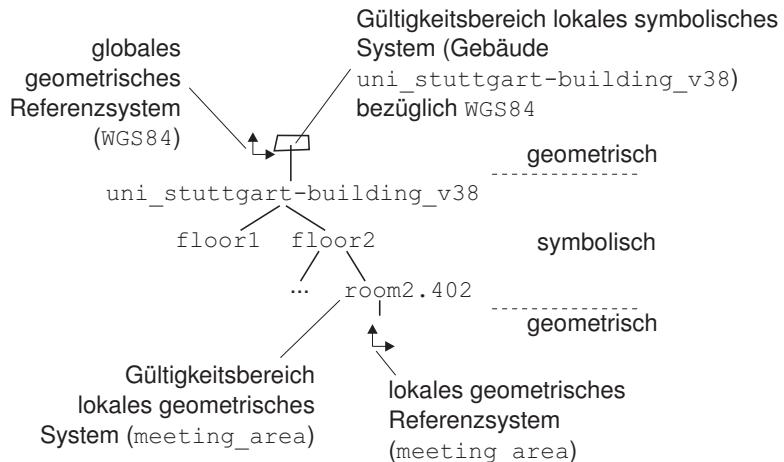


Abbildung 2.13: Geschachtelte lokale Lokationsmodelle: Dargestellt ist die Einbettung eines lokalen geometrischen Modells (meeting_area) in ein lokales symbolisches Modell (uni_stuttgart-building_v38), das wiederum in ein globales geometrisches Modell (WGS84) eingebettet ist.

nieren zu können, muss zunächst das Gebäudereferenzsystem eindeutig identifiziert werden. Dies geschieht mittels des Bezeichners des Gebäudemodells, der im globalen WGS84 eindeutig ist. Der Gültigkeitsbereich des lokalen geometrischen Systems wird durch eine symbolische Adresse im Gebäudemodell angegeben. Durch die Verschachtelung der Gültigkeitsbereiche, die jeweils eindeutig im Kontext ihres Vatermodells sind, ergibt sich schließlich eine global eindeutige Definition des lokalen geometrischen Systems.

Insgesamt ist das beschriebene Adressierungskonzept somit sehr mächtig und ermöglicht die beliebige Verschachtelung geometrischer und symbolischer Lokationsmodelle. Hierdurch resultiert allerdings auch eine entsprechende Komplexität beim Vergleich von Lokationen aus verschiedenen Modellen, die im Folgenden beschrieben wird.

2.6 Koordinatentransformation zwischen unterschiedlichen Referenzsystemen

Die Verfügbarkeit verschiedener geometrischer und symbolischer Referenzsysteme führt zum Problem der Vergleichbarkeit von Koordinaten aus unterschiedlichen Systemen. Beispielsweise könnte das Zielgebiet einer Geocast-Nachricht geometrisch bezüglich des globalen WGS84 definiert werden, die Empfängerposition aber in Form einer symbolischen Lokation in einem lokalen symbolischen Gebäudemodell bekannt sein. Um Zielgebiet und Empfängerpositionen in diesem Fall vergleichen zu können, das heißt, um die Inklusionsbeziehung zwischen Empfängerposition und Zielgebiet überprüfen zu können, müssen die Koordinaten zunächst in ein gemeinsames System transformiert werden.

Für eine systematische Analyse dieser Transformation betrachten wir im Folgenden zwei Lokationsangaben τ und π , die in unterschiedlichen Referenzsystemen S_{target} bzw.

S_{host} definiert sind. τ bezeichnet dabei das Zielgebiet einer Geocast-Nachricht; π bezeichnet die Position eines potentiellen Empfängers, dessen Position mit τ zu vergleichen ist.

Beim Vergleich von τ und π können vier Fälle unterschieden werden:

1. S_{target} und S_{host} sind unterschiedliche geometrische Systeme
2. S_{target} und S_{host} sind unterschiedliche symbolische Systeme
3. S_{target} ist ein geometrisches System; S_{host} ist ein symbolisches System
4. S_{target} ist ein symbolisches System; S_{host} ist ein geometrisches System

2.6.0.4 Transformation zwischen geometrischen Systemen

Um Koordinaten beliebiger geometrischer Systeme vergleichen zu können, muss zwischen jedem Paar von geometrischen Koordinatensystemen eine Transformationsvorschrift definiert sein. Diese Transformation kann entweder explizit für jedes Paar definiert werden, oder die Transformation vom Host- in das Zielsystem erfolgt durch Verknüpfung mehrerer Transformationen. Im ersten Fall kann mittels der Transformationsvorschrift eine Koordinate aus System S_{host} direkt ins System S_{target} transformiert werden. Wir schreiben $S_{\text{host}} \xrightarrow{T} S_{\text{target}}$, wenn die Transformationsvorschrift T eine Koordinate bezüglich System S_{host} ins System S_{target} transformiert. Im zweiten Fall erfolgt die Transformation durch eine Kette von Transformationen über weitere Referenzsysteme: $S_{\text{host}} \xrightarrow{T_1} S_1 \xrightarrow{T_2} S_2 \xrightarrow{T_3} \dots \xrightarrow{T_n} S_{\text{target}}$.

Die *direkte Transformation* benötigt explizite Transformationsvorschriften für jedes Paar von Referenzsystemen. Bei n Systemen sind dies $n(n - 1)$ Transformationsvorschriften inklusive der inversen Transformationen. Für ein globales Lokationsmodell mit einer unter Umständen großen Anzahl lokaler Koordinatensysteme erscheint diese Komplexität zu hoch.

Durch *verkettete Transformationen* lässt sich die Zahl der zu definierenden Transformationsvorschriften deutlich reduzieren. Um Koordinaten zwischen beliebigen Referenzsystemen transformieren zu können, muss zwischen jedem Paar eine solche Verkettung von einzelnen Transformationen definiert sein.

Um dies zu gewährleisten, kann einerseits eine *hierarchische Transformation* verwendet werden, welche die Einbettung von lokalen Referenzsystemen in übergeordnete Systeme ausnutzt. Hierfür wird jeweils bei der Definition des lokalen Systems die Transformationsvorschrift zum übergeordneten System sowie die inverse Transformationsvorschrift definiert. Die Koordinatentransformation zwischen zwei Systemen erfolgt nun durch Konkatenation der Transformationen auf dem Pfad in der Modellhierarchie vom Host- zum Zielsystem. Somit muss beim Anlegen eines neuen lokalen Koordinatensystems jeweils nur eine Transformationsvorschrift (bzw. zwei einschließlich der inversen Transformation) definiert werden. Insgesamt sind $2(n - 1)$ solche Transformationsvorschriften notwendig (inkl. der jeweiligen inversen Transformationen), also deutlich weniger als im Falle der direkten Transformation. Dafür steigt der Berechnungsaufwand aufgrund der Verkettung von mehreren Transformationen. Wenn man davon ausgeht, dass

die Modellhierarchie nicht entartet, dann ist die Länge einer solchen Kette allerdings auf $O(\log n)$ beschränkt.

Da geometrische *und* symbolische Koordinatensysteme ineinander verschachtelt werden können, stellt sich bei diesem Vorgehen die Frage, in welches übergeordnete System ein lokales geometrisches System eingeordnet werden soll, dessen Vatersystem von symbolischer Natur ist. Ein Beispiel hierfür wäre das oben beschriebene lokale geometrische Referenzsystem eines Raumes, das in ein symbolisches Gebäudemodell eingebettet ist, das wiederum in das globale geometrische WGS84 eingebettet ist. Dieses Problem kann dadurch gelöst werden, dass jedes lokale symbolische System rekursiv das geometrische System seines Vorgängers erbt. Obwohl das lokale symbolische System dieses Referenzsystems außer für die Definition des Gültigkeitsbereichs nicht nutzt, so kann es doch zur Einbettung untergeordneter geometrischer Systeme verwendet werden. Im angegebenen Beispiel erbt das symbolische Gebäude-System das WGS84-Referenzsystem. Entsprechend müssen bei der Definition des lokalen geometrischen Raumsystems innerhalb des lokalen symbolischen Gebäudemodells Transformationsvorschriften bezüglich des WGS84 definiert werden. Somit ist mit diesem Ansatz insgesamt sichergestellt, dass zwischen allen geometrischen Systemen schließlich eine Kette von Transformationsvorschriften existiert.

Eine weitere Möglichkeit der Bildung von Transformationsketten stellt die *Hauptsystemtransformation* dar. Hierfür wird ein einzelnes ausgezeichnetes Hauptsystem S_{master} eingeführt, zu dem für jedes geometrische Referenzsystem eine direkte Transformation einschließlich inverser Transformation definiert wird. Bei n Systemen werden hierzu insgesamt $2n$ Transformationsvorschriften benötigt. Koordinaten können über das ausgezeichnete System in zwei Schritten von einem System S_1 in ein beliebig anderes System S_2 transformiert werden: $S_1 \xrightarrow{T_{1,\text{master}}} S_{\text{master}} \xrightarrow{T_{\text{master},2}} S_2$. Als Hauptsystem S_{master} bietet sich ein geozentrisches kartesisches Koordinatensystem an. Dieser Ansatz ist aufgrund der geringen Anzahl zu definierender Transformationen und der kurzen Transformationsketten bestehend aus zwei Schritten für jedes Paar stationärer Systeme vorteilhaft. Ein Nachteil gegenüber dem hierarchischen Ansatz ergibt sich vor allem bei verschachtelten mobilen Referenzsystemen. Ein Beispiel für ein solches verschachteltes mobiles System könnte das lokale Referenzsystem eines Schiffdecks sein, das in das lokale System eines Schiffes eingebettet ist, das wiederum in das globale WGS84-System eingebettet ist. Werden diese lokalen Systeme mittels der Hauptsystemtransformation transformiert, so müssen bei jeder Bewegung des Schiffes sowohl die Transformationsvorschriften des lokalen Schiffsystems als auch die des lokalen Decksystems in Bezug auf das geozentrische Hauptsystem angepasst werden. Verwendet man dagegen eine hierarchische Transformation, so muss bei einer Bewegung des Schiffes nur die Transformationsvorschrift des Schiffsystems angepasst werden. Da sich die Lage des lokalen Decksystems in Bezug auf das Schiffssystem durch eine Bewegung des Schiffes nicht ändert, ist eine Anpassung der Transformationsvorschrift zur Umrechnung von Deckkoordinaten in Schiffkoordinaten und umgekehrt nicht notwendig. Die verschiedenen Transformationsverfahren sind nochmals in Abbildung 2.14 dargestellt.

Insgesamt kann man sagen, dass einerseits die verkettete Transformation insbesondere bei einer Vielzahl lokaler Systeme der direkten Transformation vorzuziehen ist. Bei den

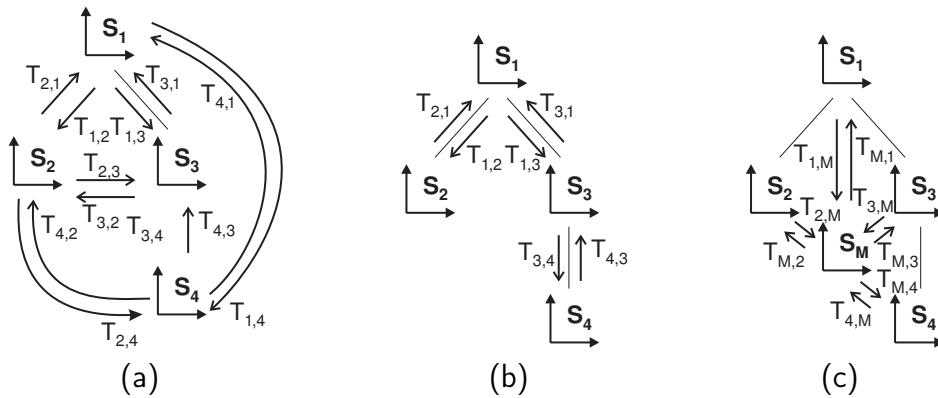


Abbildung 2.14: Transformation zwischen geometrischen Referenzsystemen verschiedener geometrischer Lokationsmodelle: (a) Direkte Transformation: Für jedes Lokationsmodellpaar werden je zwei Transformationen definiert. (b) Hierarchische Transformation zwischen eingebetteten Systemen: Zwischen eingebetteten und übergeordneten Systemen sind Transformationen definiert. (c) Hauptsystemtransformation: Jedes System definiert Transformationen von und zu einem Hauptsystem S_M .

verketteten Transformationen bietet sich die Hauptsystemtransformation für stationäre System an, wobei die hierarchische Transformation für lokale mobile Systeme vorzuziehen ist.

Die konkrete Realisierung einer Transformation ist wesentlich vom Typ des geometrischen Koordinatensystems abhängig. Zwei kartesische Koordinatensysteme lassen sich beispielsweise durch eine 7-Parameter-Transformation ineinander umrechnen: Drei Parameter definieren die Verschiebung des Ursprungs, drei Parameter definieren jeweils Rotationen um die Koordinatenachsen und ein weiterer Parameter definiert die Skalierung der Achsen. Eine solche Transformation ist auch Teil der Umrechnung von geographischen Koordinaten mit unterschiedlichen Referenzellipsoiden – die 7-Parameter-Transformation definiert hier die Verschiebung, Rotation und Skalierung der Ellipsoide. Auch die Berechnungsvorschriften für die Umrechnung geographischer Koordinaten in geozentrische kartesische Koordinaten oder die Transformation projizierter Koordinaten beispielsweise der Gauß-Krüger-Transformformation bzw. der Universellen Transversalen Mercator-Projektion (UTM) sind wohlbekannt, so dass diese hier nicht im Detail behandelt werden müssen. Entsprechende Beschreibungsformen für Koordinatensysteme und -transformationen können beispielsweise dem Standard der Geography Markup Language (GML) [Ope07] entnommen werden.

2.6.0.5 Transformation zwischen symbolischen Systemen

Um symbolische Lokationen unterschiedlicher symbolischer Ziel- und Host-Systeme S_{target} und S_{host} miteinander vergleichen zu können, müssen räumliche Beziehungen zwischen den Lokationen dieser Systeme definiert werden. Im Gegensatz zur Transformation zwischen geometrischen Systemen genügt dazu nicht *eine universelle* Transformationsvorschrift zur Transformation beliebiger Koordinaten aus S_{host} nach S_{target} . Vielmehr

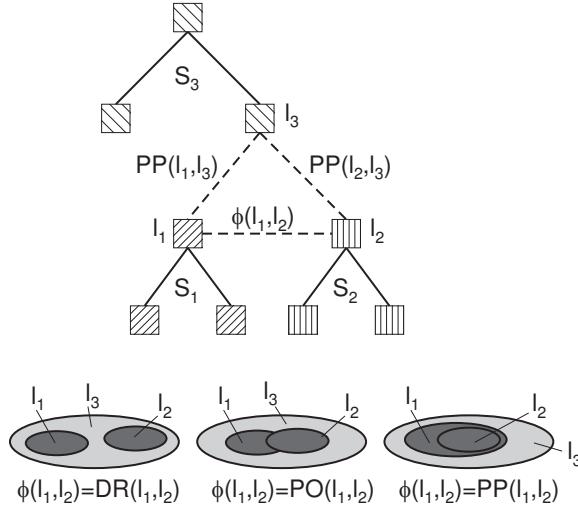


Abbildung 2.15: Problematische indirekten Transformation zwischen symbolischen Systemen.

müssen jeweils *individuelle Relationen* zwischen Paaren von Lokationen aus S_{target} und S_{host} definiert werden. Da wir wie oben beschrieben für die qualitative Definition der Beziehung zwischen Zielgebiet und Empfängerposition im Allgemeinen die Relationen des RCC5 einsetzen und Zielgebiet sowie Empfängerposition beliebige Lokationen aus S_{target} bzw. S_{host} sein können, muss zwischen jedem solchen Lokationenpaar genau eine RCC5-Relation definiert werden.

Bei der oben beschriebenen Transformation zwischen geometrischen Referenzsystemen konnte der Aufwand zur Definition von Transformation durch die Verkettung von Transformationen wesentlich reduziert werden, entweder durch die Einführung eines Hauptsystems oder hierarchischer Transformationsketten. Eine solche indirekte Transformation ist allerdings bei symbolischen Systemen im Allgemeinen nicht möglich, wie ein einfaches Beispiel demonstriert.

Abbildung 2.15 zeigt zwei symbolische Lokationen l_1 und l_2 zweier lokaler symbolischer Systeme S_1 bzw. S_2 . Gesucht ist die Relation $\phi(l_1, l_2)$. Sowohl für l_1 als auch l_2 ist deren Beziehung zur Lokation l_3 eines dritten übergeordneten Systems S_3 bekannt (S_1 und S_2 sind also in S_3 eingebettet). l_1 und l_2 sind jeweils vollständig in der Lokation l_3 enthalten. Trotz der definierten Transformationen $S_1 \xrightarrow{T_{1,3}} S_3$ und $S_3 \xrightarrow{T_{3,2}} S_2$, die insbesondere die Inklusionsbeziehungen $PP(l_1, l_3)$ und $PP(l_2, l_3)$ beinhalten, kann durch die hierarchische Verkettung von $T_{1,3}$ und $T_{3,2}$ nicht automatisch auf die Relation $\phi(l_1, l_2)$ zwischen l_1 und l_2 geschlossen werden. l_1 und l_2 könnten wie Abbildung 2.15 zeigt sowohl disjunkt sein, partiell überlappen oder es könnte eine der beiden Lokationen in der anderen enthalten sein. Im Allgemeinen muss daher für jedes Paar von Lokationen verschiedener Systeme eine RCC5-Relation modelliert werden. Im Beispiel müsste insbesondere die Relation zwischen l_1 und l_2 als Teil der Transformation $S_1 \xrightarrow{T_{1,2}} S_2$ modelliert werden.

Da potentiell jede Lokation eines beliebigen Lokationsmodells als Zielgebiet genutzt

werden kann bzw. sich ein Empfänger theoretisch an jeder Position eines beliebigen Lokationsmodells aufhalten kann, muss für jedes Lokationspaare $\{l_1 \in L_1, l_2 \in L_2\}$ aus jeweils unterschiedlichen Modellen $M_1 \neq M_2$ eine Relation definiert werden. Aufgrund der JEPD-Eigenschaft der RCC5-Relationen existiert zwischen jeder Lokation $l_1 \in L_1$ und $l_2 \in L_2$ genau eine Relation aus Φ_{RCC5} . Insgesamt sind somit je Modellpaar $|L_1||L_2|$ Relationen zu modellieren und das wiederum für beliebige Modellpaare, so dass insgesamt $\sum_{\{M_1, M_2\}, M_1 \neq M_2} |L_1||L_2|$ Relationen modelliert werden müssen, um alle symbolischen Modelle miteinander zu verknüpfen und beliebige Ziel- und Empfängergebiete vergleichbar zu machen. Die Modellierung entsprechender Relationen lässt sich ohne Geometrieinformation nur teilweise automatisieren. So können für eine semi-automatisierte Definition von Transformationsvorschriften beispielsweise die folgenden Regeln verwendet werden, die aus bereits modellierten Relationen weitere Relationen automatisch ableiten:

1. Sind zwei Lokationen $l_1 \in L_1$ und $l_2 \in L_2$ aus unterschiedlichen Modellen M_1 bzw. M_2 identisch, so lassen sich alle Relationen, die zwischen einer Lokation l aus einem beliebigen Modell M' und l_1 bestehen, auf die entsprechende Relation zwischen l und l_2 übertragen: $\forall \phi \in \Phi_{\text{RCC5}} \forall l_1 \in L_1 \forall l_2 \in L_2 \forall l \in L' : \text{EQ}(l_1, l_2) \wedge \phi(l, l_1) \rightarrow \phi(l, l_2)$
2. Durch die Transitivität⁴ der Inklusionsbeziehung lässt sich eine zwischen den Lokationen $l_1 \in L_1$ und $l_2 \in L_2$ definierte Inklusionsbeziehung auf jede Kindlokationen $l \in L'$ von l_2 übertragen: $\forall l_1 \in L_1 \forall l_2 \in L_2 \forall l \in L' : \text{PP}(l_2, l_1) \wedge \text{PP}(l, l_2) \rightarrow \text{PP}(l, l_1)$

Für die teilweise Überlappung (PO) ist allerdings ein solches semi-automatisches Herleiten alleine auf Grundlage der symbolischen Lokationsinformationen nicht möglich. Das heißt, PO-Relationen müssen vollständig manuell definiert werden. Insgesamt muss daher die Verknüpfung zweier symbolischer Systeme durch RCC5-Relationen aufgrund des notwendigen manuellen Modellierungsschritte zumindest für große Modelle oder eine große Anzahl symbolischer Modelle ohne jegliche Geometrieinformation als aufwendig betrachtet werden. Oft ist es daher einfacher, ein einheitliches integriertes symbolisches Modell für eine bestimmte Region zu erstellen, anstatt nachträglich verschiedene heterogene Modelle mit hohem Aufwand zu integrieren.

Transformation zwischen lokalen symbolischen und geometrischen Systemen

Durch die in den vorigen Abschnitten eingeführten Transformationsvorschriften ist es möglich, sowohl symbolische Ziel- und Empfängergerichtsangaben als auch geometrische Ziel- und Empfängergerichtsangaben in jeweils unterschiedlichen lokalen Modellen miteinander zu vergleichen. Zur Realisierung der durchgängigen hybriden Adressierung ist schließlich noch der Vergleich von symbolischen mit geometrischen Gebieten bezüglich unterschiedlicher lokaler Modelle zu betrachten.

Gegeben ist also eine Lokation l_{symb} eines lokalen symbolischen Modells M_{symb} , die zu einem geometrischen Gebiet l_{geo} eines lokalen geometrischen Modells M_{geo} in Bezug

⁴Die entsprechende Transitivität der Identität ist bereits in Regel 1 enthalten.

gesetzt werden soll. Bereits in Abschnitt 2.4.3.2 wurde für ein globales hybrides Lokationsmodell beschrieben, wie (globale) geometrische mit (globalen) symbolischen Lokationen durch Koordinatentransformation verglichen werden können:

- Abbildung der symbolischen Lokation auf ihre geometrische Ausdehnung und Vergleich im geometrischen Raum.
- Abbildung der geometrischen Lokation auf eine Menge von symbolischen Lokationen – diese Menge kann dabei auch aus genau einer symbolischen Lokation bestehen – und Vergleich im symbolischen Modell.

Grundsätzlich können diese Ansätze auch für lokale Modelle angewandt werden. Voraussetzung hierfür ist die Möglichkeit der Zuordnung einer geometrischen Ausdehnung zu jeder symbolischen Lokation. Nach der Abbildung der symbolischen Lokation auf ein geometrisches Gebiet bzw. der Abbildung der geometrischen Lokation auf eine Menge von symbolischen Lokationen können die in Abschnitt 2.6.0.4 bzw. 2.6.0.5 beschriebenen Ansätze zum Vergleich lokaler geometrischer bzw. lokaler symbolischer Lokationen angewandt werden.

Es bleibt somit nur die Frage nach der Abbildung symbolischer Lokationen auf geometrische Gebiete zu klären. Die Antwort auf diese Frage wurde bereits in Abschnitt 2.5.1.1 und 2.5.1.2 beschrieben. Hier wurden Ankerpunkte für die Verankerung lokaler Modelle in übergeordnete Modelle eingeführt. So wurde beispielsweise ein lokales symbolisches Modell in ein übergeordnetes geometrisches Modell eingebettet, indem für die Wurzellokation eine geometrische Ausdehnung modelliert wurde. Die Ausdehnung dieses Ankerpunkts kann – so den lokalen symbolischen Lokationen nicht bereits explizit eine geometrische Ausdehnung zugeordnet wurde – zur geometrischen Approximierung aller lokalen symbolischen Lokationen dienen. Umgekehrt dient der symbolisch definierte Ankerpunkt eines geometrischen Modells, das in ein übergeordnetes symbolisches Modell eingebettet wurde, der Approximierung der lokalen geometrischen Lokationen durch die symbolische Lokation des Ankerpunkts. Somit ist also gewährleistet, dass jeder lokalen symbolischen Lokation eine geometrische Ausdehnung und jeder lokalen geometrischen Lokationen eine symbolische Lokation zugeordnet wird, die wiederum zum Vergleich der lokalen Lokationen dienen können.

2.6.1 Mobile Zielgebiete

Das oben eingeführte hybride Lokationsmodell unterstützt sowohl symbolische als auch geometrische Lokationen bezüglich globaler und lokaler Systeme. Die hierbei zur Adressierung und Positionsbestimmung verwendeten Referenzsysteme sind stationär, das heißt, das Referenzsystem selbst und seine Lokationen sind ortsfest – zum Beispiel ein Gebäude oder ein Raum. In diesem Abschnitt soll nun schließlich die Möglichkeit zur Adressierung mobiler Zielgebiete geschaffen werden, beispielsweise, um einen bestimmten Wagen eines fahrenden Zuges zu adressieren oder ein bestimmtes Gebiet auf einem größeren Schiff.

2.6.1.1 Definition mobiler lokaler Lokationsmodelle

Wir modellieren mobile Zielgebiete bezüglich eines *mobilen lokalen Lokationsmodells*. Wie die oben beschriebenen stationären lokalen Lokationsmodelle, so besitzt auch ein mobiles lokales Lokationsmodell einen Gültigkeitsbereich entsprechend des Abdeckungsbereichs des Modells; lokale Koordinaten sind nur innerhalb dieses Bereichs gültig. Dieser Gültigkeitsbereich definiert gleichzeitig den Ankerpunkt zur Einbettung des lokalen Systems in ein übergeordnetes System. Im Gegensatz zu stationären lokalen Modellen ist dieser Ankerpunkt nun allerdings nicht mehr ortsfest, sondern ändert sich mit der relativen Bewegung des mobilen Modells relativ zum übergeordneten Modell. Analog zu stationären lokalen Modellen dient der Gültigkeitsbereich gleichzeitig zur Approximation der lokalen Lokationen durch Koordinaten des übergeordneten Systems. Durch die Bewegung des lokalen Modells ändert sich somit auch gleichzeitig die approximierte Position von Objekten innerhalb des eingebetteten Systems in Bezug zum übergeordneten System.

Zur Veranschaulichung soll hier das mobile symbolische Lokationsmodell des Zuges DB-ICE 576 betrachtet werden. Das Zugmodell soll in ein globales geometrisches Modell eingebettet werden, welches das WGS84 als Referenzsystem verwendet. Das Referenzsystem des Zuges lässt sich in XML-Notation wie folgt beschreiben:

```

<localreferencesystem>
  <scope>
    <!-- Angaben bezüglich WGS84 -->
    <referencesystem>
      <refsysid>WGS84</refsysid>
    </referencesystem>
    <area-2d_geometric mobile="yes">
      <!-- Gültigkeitsbereich relativ zur aktuellen
          Position und Ausrichtung des Zuges -->
      <polygon>
        <vertex>...</vertex> ...
      </polygon>
    </area-2d_geometric>
  </scope>
  <refsysid>
    db-ice576
  </refsysid>
</localreferencesystem>

```

Diese Beschreibung unterscheidet sich bis auf die Verwendung des Attributs `mobile="yes"` anstelle des (Standard-)Attributs `mobile="no"` nicht von der Definition eines stationären lokalen Systems. Das Attribut `mobile="yes"` signalisiert den wesentlichen Unterschied eines mobilen Lokationsmodells im Vergleich zu stationären lokalen Modellen, nämlich den mobilen Ankerpunkt, der als Referenzpunkt für die Definition des

(mobilen) Gültigkeitsbereiches dient. Der Gültigkeitsbereich ist somit relativ zur aktuellen Objektposition und -ausrichtung definiert. Für die Einbettung des beispielhaften mobilen Zug-Systems in das WGS84-basierte globale Modell ist der *aktuelle* Gültigkeitsbereich des Zugmodells in Form einer geometrischen Figur mit Koordinaten bezüglich des WGS84 zu bestimmen. Hierfür wird zunächst der Umriss des lokalen Modells durch eine geometrische Figur relativ zur aktuellen Zugposition und -ausrichtung definiert, beispielsweise ein Polygon, das die Lokationen des lokalen Modells vollständig enthält. Im Falle eines komplexen Umrisses kann es sich hierbei auch um eine stark vereinfachte Figur handeln. Der aktuelle Gültigkeitsbereich ergibt sich dann durch Transformation des Umrisses entsprechend der aktuellen Position und Ausrichtung des mobilen Objekts im übergeordneten Referenzsystem. Die aktuelle Position und Ausrichtung lässt sich dabei durch ein entsprechendes Positionierungssystem bestimmen. Im gegebenen Beispiel kann hierfür ein am Zug installiertes GPS-Gerät verwendet werden.

2.6.1.2 Adressierung und Empfängerbestimmung

Bei der Zustellung von Geocast-Nachrichten an mobile Objekte sind zwei Fälle zu unterscheiden:

Adressierte Lokation enthält das mobile Objekt: Es wird ein stationäres Gebiet adressiert, welches das mobile Objekt und somit dessen lokales mobiles Lokationsmodell enthält. Eine solche Nachricht soll auch an alle Empfänger ausgeliefert werden, die sich im mobilen Objekt und somit im adressierten umgebenden Gebiet befinden. Ein Beispiel wäre eine Nachricht an die Stadt Stuttgart, die auch an alle Fahrgäste eines Zuges ausgeliefert werden soll, der sich gerade in Stuttgart aufhält oder Stuttgart durchfährt.

Adressierte Lokation ist Teil des mobilen Objekts: Es wird ein Gebiet innerhalb des mobilen Objekts adressiert. Diese Nachricht soll nur an Objekte ausgeliefert werden, die sich im spezifizierten Gebiet innerhalb des mobilen Objekts aufhalten. Ein Beispiel hierfür wäre eine Nachricht an alle Passagiere eines Zuges, die sich gerade im Speisewagen dieses Zuges aufhalten.

Diese zwei Fälle werden im Folgenden genauer diskutiert.

2.6.1.3 Adressierte Lokation enthält mobiles Lokationsmodell

Dieser Fall benötigt aus Sicht der Adressierung keine speziellen Konzepte; das Zielgebiet wird in Form einer herkömmlichen stationären Lokation in einem stationären Lokationsmodell beschrieben – im obigen Beispiel ist dies die Lokation /de/stuttgart.

Besonderheiten ergeben sich vor allem beim Vergleich von Zielgebiet und Empfängerposition. Wird die Empfängerposition durch eine Lokation im lokalen mobilen Lokationsmodell ausgedrückt, muss diese zunächst für einen Vergleich ins stationäre Lokationsmodell transformiert werden. Durch die Mobilität des lokalen mobilen Modells relativ zum für die Adressierung verwendeten stationären Modell, kann diese Transformation nun allerdings nicht mehr durch eine statische Transformationsvorschrift beschrieben werden,

sondern die Transformation muss vielmehr die *aktuelle* Verankerung des lokalen mobilen Systems bezüglich des stationären Modells berücksichtigen.

Für diese Transformation kann die bereits oben beschriebene Approximation des Gültigkeitsbereichs des lokalen mobilen Systems eingesetzt werden. Hierfür wird die Position von Empfängern innerhalb des mobilen Objekts durch den Gültigkeitsbereich des mobilen Objekts approximiert. Dieser Gültigkeitsbereich kann wiederum durch Bestimmung der aktuellen Lage und Ausrichtung des lokalen mobilen Modells relativ zum übergeordneten stationären Modell in ein stationäres Gebiet umgerechnet werden, das sich mit den bereits beschriebenen Verfahren mit dem stationären Zielgebiet vergleichen lässt.

Im Beispiel wird eine Nachricht an die stationäre Lokation /de/stuttgart gesendet. Ein Empfänger im mobilen Objekt – dem ICE 576 – bestimmt seine lokale Lokation mit Hilfe eines im Zug installierten Positionierungssystems durch die Adresse /speisewagen. Durch das Positionierungssystem des Zuges lässt sich feststellen, dass sich dieser gerade in Stuttgart aufhält. Das heißt, der aktuelle Gültigkeitsbereich des Zuges ist ein Polygon innerhalb des Gebiets von Stuttgart. Dieses Polygon dient gleichzeitig als Approximation aller Lokationen innerhalb des lokalen mobilen Lokationsmodells, insbesondere auch der Position /speisewagen. Somit ist die Empfängerposition bezüglich eines stationären Systems, im Beispiel dem WGS84, bekannt. Das resultierende Polygon kann nach Umrechnung der Ziellokation /de/stuttgart in eine Polygon bezüglich des WGS84 mit dieser Ziellokation verglichen werden.

2.6.1.4 Adressierte Lokation ist Teil des mobilen Lokationsmodells

In diesem Fall wird eine Lokation des lokalen mobilen Lokationsmodells adressiert, zum Beispiel der oben erwähnten Speisewagen des Zuges. Bei dieser Art der Adressierung ist zu beachten, dass die aktuelle Lokation des mobilen Objekts selbst für den Sender nicht von Bedeutung ist. Wenn der Sender beispielsweise den Speisewagen eines Zuges adressieren will, dann ist dies unabhängig von der aktuellen Position des Zuges und somit der Verankerung des lokalen mobilen Systems im übergeordneten System. Die Bestimmung des lokalen mobilen Lokationsmodells sollte somit für den Sender *ortstransparent* sein, wohingegen die Adressierung innerhalb des Systems wie für Geocast typisch und analog zur Adressierung stationärer Lokationen ortsbezogen ist.

Die für die *ortstransparente* Bestimmung des lokalen mobilen Lokationsmodells notwendigen Voraussetzungen wurden bereits durch die Definition lokaler Lokationsmodell geschaffen. Jedes mobile Lokationsmodell besitzt – wie auch jedes stationäre Lokationsmodell – einen Bezeichner, der eindeutig im Gültigkeitsbereich des mobilen Modells ist. Wird dieser Gültigkeitsbereich sehr groß gewählt, im Zweifelsfall global, so kann der Sender bei der Adressierung auch einen sehr groß gewählten Gültigkeitsbereich verwenden, um das mobile Lokationsmodell eindeutig zu identifizieren. Wird der Gültigkeitsbereich global gewählt, so muss der Bezeichner des mobilen Lokationsmodells global eindeutig sein, und man hat de facto eine *ortstransparente* Bestimmung des lokalen Lokationsmodells erreicht.

Hierzu betrachten wir nochmals die Adressierung des Speisewagens des Zuges IC 576. Das mobile Lokationsmodell des Zuges hat den Bezeichner db-ice576. Wird der Gültig-

keitsbereich dieses Lokationsmodells global gewählt, so kann der Sender den Speisewagen wie folgt adressieren:

```

<targetarea>
  <area-symbolic>
    <-- Angaben bezüglich des lokalen Zugmodells. -->
    <referencesystem>
      <-- Scope des lokalen Modells. -->
      <scope>
        <everywhere/>
      </scope>
      <refsysid>db-ice576</refsysid>
    </referencesystem>
    <-- Lokale symbolische Lokationsadresse. -->
    <symbolicaddress>
      /speisewagen
    </symbolicaddress>
  </area-symbolic>
</targetarea>

```

Das Element `everywhere` bezeichnet eine Lokation maximaler – hier globaler – Größe. Der Gültigkeitsbereich ist also global. In diesem Beispiel würde allerdings auch ein auf Europa oder Deutschland eingeschränkter Gültigkeitsbereich ausreichen, da sich der Zug nur innerhalb von Deutschland bewegt und somit der entsprechende Bezeichner theoretisch außerhalb der BRD wiederverwendet werden könnte.

Der Vergleich einer Empfängerposition mit der adressierten Lokation des lokalen mobilen Modells kann direkt ohne Transformation erfolgen, wenn sowohl das Zielgebiet als auch die Empfängerposition bezüglich des lokalen mobilen Modells angegeben werden.

Theoretisch könnte die Empfängerposition auch in einem anderen Modell als dem mobilen Lokationsmodell gegeben sein, insbesondere, wenn der Empfänger kein lokales Positionierungssystem innerhalb des mobilen Objekts verwendet, sondern ein zum mobilen Objekt externes System, beispielsweise GPS oder die Ortung über ein Mobilfunksystem. In diesem Fall kann wiederum mit Hilfe des aktuellen Ankerpunkts des mobilen Systems eine Umrechnung erfolgen. Hierbei erscheint es allerdings sinnvoller anstatt der Umrechnung der Empfängerposition eine Umrechnung des Zielgebiets durchzuführen. So könnte beispielsweise bei der Adressierung des Speisewagens dieses Zielgebiet durch die aktuelle Position und Ausrichtung des Zuges approximiert werden.

2.7 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde aufbauend auf einer Klassifizierung verschiedener Grundformen der Lokationsmodellierung der Entwurf eines für die ortsbezogene Kommunikation geeigneten Lokationsmodells vorgestellt. Dieses Modell wird für die Zielgebietsdefinition ortsbezogener Nachrichten sowie für die Positionsbestimmung von Empfänger und den

Vergleich von Zielgebieten und Empfängerpositionen zum Zwecke der Bestimmung der Empfängermenge verwendet.

Das entworfene Lokationsmodell unterstützt zwei grundlegende Adressierungskonzepte: Die Adressierung durch geometrische Figuren und die Adressierung durch symbolische Ortsbezeichner. Durch die Unterstützung beider Adressierungsformen durch ein hybrides Lokationsmodell können die Vorteile beider Ansätze ausgenutzt werden. Einerseits können mit Hilfe geometrischer Figuren beliebige Gebiete beschrieben werden, woraus sich eine hohe Flexibilität bei der Zielgebietsbestimmung ergibt. Andererseits können aus Benutzersicht intuitiv verständliche Lokationen des täglichen Lebens für die Adressierung eingesetzt werden, wobei sich entsprechende symbolische Modelle durch eine vergleichsweise geringe Komplexität bei der Erstellung und Verwaltung auszeichnen. Gleichzeitig wird durch dieses Modell die Integration verschiedenster Positionierungssysteme mit geometrischer und symbolischer Ausgabe erleichtert. Schließlich bietet das vorgestellte Lokationsmodell die Möglichkeit zur Integration lokaler Modelle und zur Unterstützung mobiler Zielgebiete.

Das geometrische Modell unterstützt sowohl die zweidimensionale als auch die 2,5-dimensionale Modellierung von Lokationen und bildet somit einen Kompromiss zwischen Komplexität und Ausdrucksstärke.

Das symbolische Modell basiert auf den topologischen Relationen des Region Connection Calculus. Zusätzlich werden strukturelle Regeln für den Aufbau eines symbolischen Lokationsmodells eingeführt, die schließlich zu einem verbandsbasierten Modell führen, das im Gegensatz zu einfachen hierarchischen Modellen auch die Möglichkeit zur Definition überlappender Lokationen bietet.

Durch die verschiedenen unterstützten Adressierungskonzepte sowie die Integration lokaler und unter Umständen heterogener Modelle sind spezielle Konzepte zum Vergleich von Zielgebieten und Empfängerpositionen erforderlich, die durch entsprechende Modellinformationen unterstützt werden. Das vorgeschlagene Modell ordnet hierzu symbolischen Lokationen explizit oder implizit geometrische Ausdehnungen zu. Durch die Approximierung symbolischer Lokationen entstehen unscharfe Lokationsangaben. Der Umgang mit solchen unscharfen Positionsangaben wird durch die Einführung von Wahrscheinlichkeiten ermöglicht, die bestimmen, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich ein Empfänger innerhalb des Zielgebiets einer Nachricht befindet.

Ferner können durch Einführung von geometrischen oder symbolischen Transformationsvorschriften Koordinaten zwischen verschiedenen lokalen Systemen in ein gemeinsames System transformiert und in diesem System verglichen werden.

Insgesamt ergibt sich somit ein sehr mächtiges und flexibles hybrides Lokationsmodell, das die Grundlage für die im nächsten Kapitel vorgestellten Geocast-Vermittlungsprotokolle bildet.

Kapitel 3

Geocast-Vermittlungsverfahren

3.1 Übersicht

Im vorangehenden Kapitel wurde ein für die geographische Kommunikation geeignetes feingranulares Lokationsmodell entworfen. Auf Basis dieses Lokationsmodells geht nun dieses Kapitel im Detail auf die Vermittlung von Geocast-Nachrichten mittels entsprechender Protokolle und geeigneter Geocast-Vermittlungsnetze ein. Die Vermittlung von geometrisch adressierten Nachrichten auf Basis zweidimensionaler Koordinaten wurde dabei bereits ausführlich in den Arbeiten von Navas und Imielinski [IN99, Nav01, NT97, IN96a] behandelt (vgl. Abschnitt 3.2.2). Aufbauend auf diesen Arbeiten wurde durch Co-schurba eine Erweiterung für 2,5-dimensionale Zielgebiete in [CRD02] vorgeschlagen (siehe Abschnitt 3.2.2). Insgesamt kann somit die Vermittlung von rein geometrisch adressierten Nachrichten als sehr gut verstanden gelten.

Daher konzentriert sich diese Arbeit auf die *Vermittlung von symbolisch adressierten Nachrichten*. Des Weiteren wird neben der Vermittlung von Nachrichten an stationäre Zielgebiete auch ein Ansatz zur *Vermittlung an mobile Zielgebiete* vorgeschlagen, der beispielsweise die Weiterleitung von Nachrichten an alle Insassen eines bestimmten Wagens eines Zuges ermöglicht.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Grundlagen der Nachrichtenvermittlung und die verwandten Arbeiten behandelt, bevor anschließen auf die Vermittlungsverfahren selbst genauer eingegangen wird. In Abschnitt 3.5ff wird die Vermittlung symbolisch adressierter Nachrichten behandelt. Abschnitt 3.9 geht schließlich auf die Vermittlung an mobile Zielgebiete ein, bevor dieses Kapitel der Arbeit mit einer Bewertung der vorgeschlagenen Vermittlungsansätze in Abschnitt 3.10 abgeschlossen wird.

3.2 Grundlagen und verwandte Arbeiten

In diesem Abschnitt werden die für das Verständnis der im weiteren Laufe dieser Arbeit vorgestellten Vermittlungsansätze notwendigen Grundlagen vermittelt. Des Weiteren wird ein Überblick über die mit dieser Arbeit verwandten Arbeiten gegeben.

3.2.1 Einordnung in das OSI-Referenzmodell

Die Vermittlung von Nachrichten, die auch im Speziellen Gegenstand der hier betrachteten Geocast-Protokolle ist, ist innerhalb des OSI-Referenzmodells für Kommunikationsprotokolle [Int96] der *Vermittlungsschicht* zugeordnet. In dieser Schicht sind auch die weiter unten in Abschnitt 3.2.2.1 eingeführten IP-Multicast-Protokolle zur allgemeinen Gruppenkommunikation angesiedelt. Ferner wurde in verwandten Arbeiten die Realisierung von Geocast-Protokollen innerhalb der Vermittlungsschicht untersucht (vgl. Abschnitt 3.2.2.5).

Neben der Realisierung eines Vermittlungsprotokolls innerhalb der Vermittlungsschicht besteht allerdings auch die Möglichkeit der Implementierung innerhalb der *Anwendungsschicht* mit Hilfe eines so genannten *Overlay-Netzes*. Ein Overlay-Netz besteht aus einer Menge von Endsystemen, die untereinander ein logisches (virtuelles) Netz bilden. „Verbindungen“ sind in diesem dem IP-Netz überlagerten Netz über Transportschichtprotokolle (TCP oder UDP) realisiert. Overlay-Netze bieten dabei eine Reihe von Vorteilen:

- *Frei definierbare Netztopologie*: Die logischen Verbindungen des Overlay-Netzes können völlig frei von der Anwendung definiert werden. Im Laufe dieser Arbeit wird diese Eigenschaft zum Beispiel genutzt, um ein auf räumlichen Relationen basierendes ortsbezogenes Geocast-Overlay-Netz zu definieren.
- *Keine Standardisierung erforderlich*: Protokolle der Vermittlungsschicht müssen einen Standardisierungsprozess durchlaufen, beispielsweise durch die Internet-Engineering-Taskforce (IETF). Eine solche Standardisierung ist im Allgemeinen langwierig und aufwendig und somit kostspielig.
- *Keine Unterstützung durch Netzbetreiber erforderlich*: Außer der Bereitstellung der üblichen Internet-Transportprotokolle ist keine weitere Unterstützung durch den Netzbetreiber erforderlich.

Diese Vorteile führten dazu, dass viele neue, oft zunächst experimentelle Protokolle zunächst in Form eines Overlay-Netzes realisiert wurden (vergleiche Abschnitt 3.2.2.2). Auch für die Geocast-Protokolle dieser Arbeit stellen Overlay-Netze aufgrund der oben beschriebenen Vorteile eine attraktive Realisierungsform dar, die in dieser Arbeit im Detail betrachtet wird.

An dieser Stelle soll allerdings auch nicht verschwiegen werden, dass Overlay-Vermittlungsprotokolle auch einen wesentlichen Nachteil haben. Sie erreichen im Allgemeinen nicht die Effizienz eines Protokolls der Vermittlungsschicht. So teilen sich beispielsweise mehrere logische Verbindungen im Overlay-Netz oft eine „physische“ Verbindung im IP-Netz, die dadurch überlastet werden kann. Ein innerhalb der Vermittlungsschicht realisiertes Vermittlungsprotokoll wird dagegen nur eine Nachricht auf jedem Link versenden. Die Overlay-Netz-basierten Protokolle dieser Arbeit versuchen, diesen Nachteil zu minimieren, indem sie die Anzahl der Pakete im IP-Netz durch möglichst kurze Pfade im Overlay-Netz möglichst klein halten. Zusätzlich wird in dieser Arbeit die Integration eines IP-Multicast-Protokolls beschrieben. Dieses Protokoll dient allerdings nur

der Optimierung der Overlay-Netz-basierten Nachrichtenvermittlung und ist somit keine notwendige Voraussetzung für die Funktionstüchtigkeit des beschriebenen Ansatzes.

3.2.2 Verwandte Arbeiten

Die in diesem Kapitel der Arbeit weiter unten eingeführten Protokollen zur Vermittlung von Geocast-Nachrichten stehen in Bezug zu Arbeiten aus verschiedenen Bereichen. Zunächst sind hier Protokolle zur Gruppenkommunikation (Multicast-Protokolle) zu nennen. In diesem Abschnitt werden dabei sowohl kurz Protokolle der Vermittlungsschicht des OSI-Referenzmodells besprochen, als auch Protokolle der Anwendungsschicht, so genannte „Application-level Multicast-Protokolle“. Letztere sind, wie die Overlay-Netz-basierten Ansätze dieser Arbeit, in dem IP-Netz überlagerten Overlay-Netzen realisiert.

Neben diesen speziell auf die Gruppenkommunikation ausgerichteten Application-level Multicast-Protokollen werden in diesem Abschnitt weitere Overlay-Netze diskutiert, die zwar nicht primär der Gruppenkommunikation dienen, deren Strukturen aber Ähnlichkeiten mit den in dieser Arbeit eingeführten Overlay-Netzen zur Geocast-Kommunikation aufweisen. Zum einen sind das so genannte Peer-to-Peer-Netze, vor allem strukturierte Peer-to-Peer-Netze, die ebenfalls das Ziel verfolgen, möglichst effiziente Kommunikationspfade bereitzustellen, in diesem Fall für das rasche Auffinden von verteilt verwalteten Ressourcen, beispielweise von Dateien.

Allgemeine Peer-to-Peer-Overlay-Netze bieten dabei keine Möglichkeit zur geografischen Adressierung. Diese Möglichkeit wird durch spezielle Overlay-Netze zur verteilten Verwaltung räumlicher Informationen bereitgestellt, die ebenfalls in diesem Abschnitt diskutiert werden sollen.

Schließlich erfolgt ein Vergleich mit dedizierten Ansätzen zur Geocast-Kommunikation. Es werden dabei sowohl Ansätze für die Vermittlung geometrisch adressierter Nachrichten als auch Ansätze mit Unterstützung der symbolischen Adressierung besprochen.

Teilweise wurden die hier aufgeführten Systeme bereits in den verwandten Arbeiten der Lokationsmodellierung in Abschnitt 2.2.2 angesprochen. Dort lag der Fokus allerdings auf dem Aufbau des zugrunde liegenden Lokationsmodells. An dieser Stelle stehen dagegen die Konzepte zur Vermittlung von Nachrichten im Vordergrund.

3.2.2.1 IP-Multicast-Protokolle

Da die geographische Kommunikation als eine Art der Gruppenkommunikation betrachtet werden kann, sind in diesem Zusammenhang zunächst Arbeiten aus dem Bereich Multicast zu nennen. Verschiedene Arbeiten befassen sich mit *IP-Multicast-Protokollen* zur effizienten Vermittlung von Nachrichten an Gruppen mit mehreren Empfängern in Weitverkehrsnetzen [DC90, Moy94, DEF⁺96, BFC93].

Allen Ansätzen gemein ist die Etablierung von baumförmigen Verteilstrukturen im Netz der IP-Router. Hierbei werden sowohl quellenspezifische als auch gemeinsame Verteilbäume verwendet.

Bei *quellenspezifischen Bäumen* (engl. *source-based tree*) wird für jeden Sender (Quelle) ein eigener Verteilbaum erzeugt. Die resultierenden Bäume sind im Allgemeinen optimal für jeden einzelnen Sender, das heißt, sie verbinden den Sender auf dem jeweils kürzesten Pfad mit jedem Empfänger. Ein Nachteil ist jedoch der hohe Aufwand für die Verwaltung der Bäume in Gruppen mit vielen Sendern, da Router Vermittlungstabellen-Einträge pro Paar (Quelle, Multicast-Gruppe) verwalten müssen.

Bei *gemeinsamen Verteilbäumen* (engl. *shared tree*) wird dagegen nur ein Verteilbaum pro Gruppe eingerichtet. Das heißt, jeder Sender verwendet denselben Verteilbaum, wenn er Nachrichten an eine bestimmte Gruppe sendet. In diesem Fall ist der Aufwand für die Verwaltung deutlich geringer, da keine Vermittlungstabelleneinträge pro Paar (Sender, Gruppe) benötigt werden, sondern nur noch ein Eintrag pro Gruppe. Dafür sind die Pfade im Allgemeinen nicht für jeden Sender optimal, das heißt, im Allgemeinen länger als im Falle von quellenspezifischen Bäumen.

Die Etablierung der Bäume kann mit verschiedenen Verfahren erfolgen. Quellenspezifische Bäume können beispielsweise mit Reverse-Path-Forwarding/Broadcast oder mit Verfahren basierend auf dem Link-State-Routing-Verfahren berechnet werden.

Beim *Reverse-Path-Forwarding* (RPF) leitet jeder Router eine empfangene Multicast-Nachricht an alle ausgehenden Verbindungen außer derjenigen, von der er die Nachricht empfangen hat, weiter, wenn er die Nachricht auf dem kürzesten Pfad zum Sender (engl. *reverse path*) erhalten hat. Hierbei können allerdings mehrere Pfade zu den Zielen (Subnetzen) entstehen. *Reverse-Path-Broadcast* (RPB) optimiert dieses Prinzip, indem Nachrichten nur noch dann über eine Verbindung weitergeleitet werden, wenn diese in umgekehrter Richtung auf dem kürzesten Pfad zur Quelle liegt. Das Resultat ist ein Spannbaum der kürzesten Pfade (engl. *shortest path tree*) vom Sender zu jedem Subnetz. Dieser Spannbaum beinhaltet allerdings auch Subnetze, die gar keine Gruppenmitglieder enthalten. Daher werden in einem zweiten Schritt Äste des Spannbaums, die keine Empfänger enthalten, von den Blättern des Baumes beginnend rekursiv beschnitten (engl. *truncating* bzw. *pruning*). Durch zyklisches Wiederholen des Flutens und Beschneidens oder mit Hilfe spezieller „Grafting-Nachrichten“ können abgeschnitte Äste, in denen neue Gruppenmitglieder beigetreten sind, wieder in den Verteilbaum aufgenommen werden. RPB bzw. RPF wird beispielsweise vom Distance-Vector-Multicast-Routing-Protokoll (DVMRP [WPD98]) und Protocol-Independent-Multicast-Dense-Mode (PIM-DM [ANS05]) verwendet.

In auf so genanntem Link-State-Routing basierenden Netzen kann der komplette quellenspezifische Verteilbaum einer Gruppe lokal von jedem Router berechnet werden (wir bezeichnen das entsprechende Multicast-Verfahren aufgrund seiner Abhängigkeit zum Link-State-Routing-Verfahren im Folgenden als *Link-State-Multicast*). Beim Link-State-Routing teilt jeder Router allen anderen Routern im Netz die Kommunikationskosten zu seinen unmittelbaren Nachbarn mit. Diese Information wird mit so genannten Link-State-Advertisements (LSA) mittels Fluten (engl. *flooding*) im gesamten Netz verteilt. Jeder Router besitzt somit die komplette topologische Sicht auf das Netz. Zusätzlich werden ebenfalls über LSA-Pakete die Gruppenmitgliedschaften jedes Routers im Netz bekanntgegeben, das heißt, jeder Router weiß, welche Router lokale Empfänger in ihren Subnetzen besitzen. Empfängt ein Router nun eine Multicast-Nachricht von einem

Sender, so kann er lokal den Verteilbaum mit den kürzesten Pfaden vom Sender zu jedem Router mit Gruppenmitgliedern berechnen. Link-State-Multicast wird beispielsweise vom Multicast-Open-Shortest-Path-First-Protokoll (MOSPF [Moy94]) verwendet.

Gemeinsame Verteilbäume werden dagegen mit Hilfe von so genannten Rendezvous- oder Kern-Routern berechnet, welche die Wurzel des gemeinsamen Verteilbaumes bilden. Router mit lokalen Gruppenmitgliedern schicken dafür eine Beitrittsnachricht (engl. join) in Richtung des Kern-Routers. Alle Router auf dem Pfad zum Kern-Router werden dabei Teil des Verteilbaums und richten entsprechende Vermittlungstabelleneinträge ein. Dieses Verfahren wird z.B. von den Multicast-Protokollen Core-based-Trees (CBT [Bal97a,Bal97b]) und Protocol-Independent-Multicast-Sparse Mode (PIM-SM [FHHK06]) verwendet.

Obwohl diese Multicast-Protokolle eine effiziente Vermittlung von Nachrichten auch an große Mengen von Empfängern erlauben, so ergeben sich für die Verwendung zur Vermittlung von Geocast-Nachrichten verschiedene Probleme. Zunächst ist eine Zuordnung von geographischen Positionen und Zielgebieten – in unserem Fall insbesondere von symbolischen Lokationen – auf IP-Multicast-Gruppen-Adressen notwendig. Hierfür wird ein entsprechender Verzeichnisdienst benötigt, der im Falle eines globalen Lokationsmodells skalierbar angelegt sein muss. Bei dieser Zuordnung ergibt sich das Problem, dass insbesondere der beschränkte Adressraum von IPv4 mit seinen nur 32 bit langen Adressen zu beschränkt wäre, um in einem feingranularen globalen Lokationsmodell jeder Lokation eine eigene IP-Multicast-Gruppenadresse zuzuweisen. Dieses Problem kann allerdings durch Verwendung von IPv6 in Zukunft behoben werden. Schließlich ist für eine große Menge von Multicast-Gruppen eine effiziente Verwaltung der Gruppen bei den IP-Routern im Netz erforderlich, da jeder Lokation eine Multicast-Gruppe zugeordnet werden muss. Bei einem globalen und gleichzeitig feingranularen Lokationsmodell kann sich so leicht eine sehr große Anzahl an Multicast-Gruppen ergeben, für die herkömmliche IP-Multicast-Protokolle nicht entworfen wurden.

In Abschnitt 3.5.2 werden diese Probleme im Detail diskutiert und ein auf so genanntem *explizitem Multicast* [BFI⁺01] aufbauender Ansatz vorgeschlagen, der insbesondere auf das Problem der zahlreichen Multicast-Gruppen eingeht.

Neben der ausschließlich auf IP-Multicast basierenden Vermittlung wird außerdem in Abschnitt 3.8 eine Optimierung der vorgeschlagenen Overlay-Netz-basierten Geocast-Protokolle mit Hilfe eines so genannten *Source-Specific-Multicast-Protokolls (SSM)* [HC06] vorgestellt. Durch diese Kombination können die Vorteile beider Ansätze ausgenutzt werden. SSM unterstützt eine sehr effiziente Verteilung von Nachrichten durch optimale Verteilbäume auf der IP-Ebene, während der Overlay-Ansatz für die Etablierung der geographischen Multicast-Gruppen bei Bedarf eingesetzt wird, das heißt, sobald Nachrichten an ein Gebiet vermittelt werden sollen.

3.2.2.2 Multicast-Protokolle innerhalb der Anwendungsschicht

Bei den oben beschriebenen Multicast-Ansätze hat sich gezeigt, dass diese aus verschiedenen Gründen [CRSZ03] nur langsam in bestehende Netze integriert werden. Ein Hauptziel dieser Arbeit ist daher der Entwurf von alternativen Geocast-Protokollen in einem

Overlay-Netz der Anwendungsschicht, die keine großflächigen Modifikationen der bestehenden IP-Infrastruktur voraussetzen. Aus den gleichen Gründen wurden zahlreiche so genannte *Application-Level-Multicast-Protokolle* entwickelt (teilweise auch als *End-system* oder *Overlay Multicast* bezeichnet). Diese Protokolle operieren in einem Overlay-Netz, das der bestehenden IP-Infrastruktur überlagert ist. Somit muss diese nicht modifiziert werden, und Multicast-Routing-Mechanismen können mit vergleichsweise geringem Aufwand zur Verfügung gestellt werden. Unterschiede ergeben sich vor allem bei der Etablierung von Verteilstrukturen. Ein Teil der Protokolle, zum Beispiel [CRSZ03, Cha03, PSVW01], erstellt hierfür zunächst ein Netz bestehend aus den Overlay-Knoten. Dieser Ansatz wird daher oft als „Mesh first“ bezeichnet. Auf dieser Netztopologie können dann herkömmliche Routing-Algorithmen zur Berechnung des Verteilbaums eingesetzt werden. Andere, so genannte „Tree first“ Protokolle wie [Fra00, HJ02, JGJ⁺00, LM03] erzeugen den Verteilbaum direkt, indem die Gruppenmitglieder explizit ihren Vater-Knoten aus einer Menge bekannter Gruppenmitglieder auswählen, wobei bei dieser Auswahl Metriken wie die Latenz oder Bandbreite der Verbindung zwischen den Knoten berücksichtigen werden. Diese Ansätze unterstützen vor allem kleine Gruppen und Gruppen mittlerer Größe. Weitere Ansätze nutzen die Weiterleitungsfunktionalität strukturierter Peer-to-Peer-Overlay-Netze (siehe unten) für die Vermittlung von Multicast Nachrichten [CD-KR02, ZZJ⁺01, RHKS01].

Wie bei den IP-Multicast-Protokollen der Vermittlungsschicht des vorangehenden Abschnitts, so ergibt sich auch bei Multicast-Protokollen der Anwendungsschicht zunächst die Notwendigkeit der Abbildung von Lokationen auf Multicast-Gruppen-Adressen. Hierfür wäre zusätzlich zum Overlay-Netz, das die Verteilstrukturen bereitstellt, ein skalierbarer und somit komplexer Verzeichnisdienst erforderlich. Zusätzlich muss auch hier eine potentiell große Menge an Verteilstrukturen im (Overlay-)Netz pro Gruppe beziehungsweise Lokation etabliert werden, woraus ein entsprechend hoher Verwaltungsaufwand resultiert. In dieser Arbeit wird daher ein anderer Overlay-Netz-basierter Ansatz gewählt, der nicht auf Application-Level-Multicast-Protokollen aufbaut. Anstatt die Zuordnung der Gruppen und die anschließende Vermittlung von Nachrichten zu trennen, werden beide Schritte durch ein geographisch strukturiertes Overlay-Netz zusammengefasst. Das heißt, Geocast-Nachrichten können unmittelbar anhand ihres geographischen Zielgebiets (symbolische Lokation) weitergeleitet werden. Die natürlich gegebene hierarchische Strukturierung von symbolischen Lokationen kann dabei ausgenutzt werden, um eine *gemeinsame* hierarchische Verteilstruktur im Overlay-Netz zu bilden. Die Notwendigkeit zur aufwändigen Verwaltung vieler unterschiedlicher Strukturen – einer Gruppe pro Lokation – entfällt somit.

3.2.2.3 Peer-to-Peer-Systeme

Peer-to-Peer-Systeme werden im Allgemeinen zur gemeinsamen Nutzung von verteilten Ressourcen wie Dateien, Rechenleistung und Bandbreite durch eine Menge von so genannten Peers eingesetzt. Peers zeichnen sich dabei dadurch aus, dass sie im Gegensatz zu klassischen Client/Server-Systemen nicht nur als reine Klienten gegenüber den Ressourcen-Anbietern (Servern) auftreten, sondern gleichzeitig selbst auch den anderen

Peers Ressourcen zur Nutzung bereitstellen. Peers sind in diesem Sinne gleichberechtigte Einheiten.

Die Peers eines Peer-to-Peer-Systems bilden für den effizienten Zugriff auf die verteilten Ressourcen des Systems ein dezentral organisiertes Overlay-Netz. Ein typisches Beispiel hierfür ist ein durch ein Peer-to-Peer-Netz verteilt realisierter Index eines File-Sharing-Systems zur Ermittlung von verteilt verwalteten Dateien. Die durch das Overlay-Netz realisierte Funktionalität kann dabei auch als eine Art der Nachrichtenvermittlung interpretiert werden, bei der die Peers die Aufgabe von Routern im Sinne dieser Arbeit übernehmen. So werden beim File-Sharing zum Beispiel Suchanfragen an diejenigen Peers weitergeleitet, welche die gesuchten Dateien verwalten. Obwohl Peer-to-Peer-Systeme im Allgemeinen keine geographische Vermittlungsfunktionalität sondern eine Vermittlung aufgrund von Objekt-Identifikatoren beziehungsweise Hash-Werten (siehe unten) implementieren, so sind die allgemeinen Ziele der Nachrichtenvermittlung in Peer-to-Peer-Netzen durchaus mit den Zielen der Geocast-Netze dieser Arbeit vergleichbar. Insbesondere sollen möglichst kurze Nachrichtenpfade im Overlay-Netz erzielt werden, um somit eine effiziente Vermittlung mit einer möglichst geringen Nachrichtenlast und geringen (Such-)Latenz zu ermöglichen. Gleichzeitig soll der lokale Zustand einzelner Peers möglichst gering sein, was insbesondere bedeutet, dass Peers nur möglich wenige Nachbarn besitzen sollten, zu denen sie direkte Verbindungen im Overlay-Netz aufbauen. Der letzte Punkt ist für Peer-to-Peer-Netze von großer Bedeutung, da man hier im Allgemeinen von einer hoch dynamischen Menge von Peers ausgeht, die dem Netz jederzeit beitreten und es auch wieder verlassen können.

Die Arbeiten im Bereich der Peer-to-Peer-Systeme konzentrieren sich daher auf die Erforschung geeigneter Overlay-Netz-Strukturen und entsprechender Vermittlungsalgorithmen, welche die oben genannten Eigenschaften einer effizienten Nachrichtenvermittlung erfüllen. Interessant für diese Arbeit sind dabei insbesondere die so genannten *strukturierten Peer-to-Peer-Netze*, die im Gegensatz zu *unstrukturierten Systemen* die Netztopologie nach strikten Regeln erstellen und diese durch ständige Adaption an die dynamische Peer-Population aufrecht erhalten. Strukturierte Systeme werden dabei meist durch so genannte *verteilte Hash-Tabellen* (engl. *Distributed Hash Table (DHT)*) implementiert. Diese adressieren Inhalten mit Hilfe von Hash-Werten, welche aus den Objektnamen berechnet werden und die gleichzeitig für eine Gleichverteilung der Inhalte beziehungsweise ihrer Verweise auf die Peers sorgen sollen.

Obwohl es eine Vielzahl von unterschiedlichen DHT-basierten Peer-to-Peer-Netzen gibt (für eine Übersicht siehe [LCP⁺05, RM06]), so geht die Mehrzahl doch auf die bereits von Kleinberg untersuchten Konzepte zur effizienten Suche in solchen verteilten Systemen zurück. Das als *Kleinberg-Modell* [Kle00] bezeichnete Netz besteht dabei zunächst aus einer Menge von Knoten, die in einer regelmäßigen Struktur (Grid) angeordnet sind. In dieser Struktur besitzt jeder Knoten nur sehr wenige Verbindungen zu seinen Nachbarn im Grid – in einem zweidimensionalen Grid hätte ein Knoten somit vier Nachbarn. Die Anzahl der Nachbarn ist zunächst also sehr klein, Pfade sind allerdings relativ lang (Pfadlänge $O(\sqrt{d} \cdot \sqrt{n})$ für ein d dimensionales Grid aus n Knoten), da Nachrichten nur entlang des Grids weitergeleitet werden können. Kleinberg konnte allerdings zeigen, dass mit einer bestimmten Auswahl von k zusätzlichen zufälligen Verbindungen – so genann-

te Long-Range-Contacts – pro Knoten eine sehr einfache und gleichzeitig effiziente Suche implementierbar ist, die Inhalte mit hoher Wahrscheinlichkeit in $O(\frac{\log^2 n}{k})$ Schritten findet. Der Suchalgorithmus folgt dabei einer einfachen Greedy-Strategie, bei der Nachrichten jeweils an den Nachbarn weitergegeben werden, welcher dem Ziel am nächsten liegt. DHTs nutzen dieses Prinzip und erreichen durch die Einrichtung von $k = \log n$ Verbindungen pro Peer eine Pfadlänge von $O(\log n)$.

Für diese Arbeit ist vor allem die Auswahlstrategie der k zusätzlichen Verbindungen interessant. Kleinberg konnte zeigen, dass nur für eine bestimmte Verteilung der Längen dieser Long-Range-Contacts, eine effiziente Greedy-Suche implementierbar ist. Die Längen müssen dazu logarithmisch verteilt sein. Diese Verteilung lässt sich am Beispiel des Peer-to-Peer-Systems Chord [SMLN⁺03] sehr leicht nachvollziehen, in dem der i -te Long-Range-Contact eines Peers die Länge¹ 2^i besitzt. Es existieren also relativ viele kurze Verbindungen im Netz und wenige lange.

Ein ähnliches Konzept wird in dieser Arbeit für die Auswahl von so genannten Direktverbindungen, die mit den Long-Range-Contacts der Peer-to-Peer-Systeme vergleichbar sind, verwendet, um die Pfade in einem hierarchisch anhand der Geographie strukturierten Geocast-Netz zu verkürzen (vgl. Abschnitt 3.6.2.1). In diesem Fall werden vergleichsweise viele Verbindungen zu nahen geographischen Gebieten und wenige zu entfernten Gebieten eingerichtet. Wie die Evaluierung in Abschnitt 3.10 zeigt, kann hierdurch eine kurze Pfadlänge mit nur wenigen Verbindungen im Geocast-Overlay-Netz erreicht werden.

3.2.2.4 Verteilte Systeme zur Verwaltung räumlicher Informationen

Neben den oben beschriebenen Peer-to-Peer-Systemen zur verteilten Verwaltung von allgemeinen Informationen ohne expliziten Ortsbezug existieren verschiedene verteilte Systeme, die sich auf die Verwaltung räumlicher Informationen fokussieren und hierfür entsprechende Netzstrukturen für das effiziente Auffinden geographischer Informationen bilden. Hierbei existieren sowohl Systeme, die auf geometrischen Lokationsmodellen beruhen als auch Systeme mit Unterstützung symbolischer Lokationen.

Nexus-Lokationsdienst: Das Nexus-System wurde bereits in den verwandten Arbeiten zur Lokationsmodellierung in Kapitel 2 dieser Arbeit beschrieben (siehe Abschnitt 2.2.2). An dieser Stelle soll insbesondere der innerhalb des Nexus-Forschungsprojekts entstandene Nexus-Lokationsdienst [Leo03] zur skalierbaren Verwaltung mobiler Objekte betrachtet werden. Dieser Dienst verwaltet die durch geometrische Koordinaten definierten Positionen mobiler Objekte in einem verteilten System von so genannten *Location-Servers*. Unterstützt werden von diesem Dienst Anfragen nach der Position von mobilen Objekten, Bereichsanfragen nach allen Objekten in einem bestimmten räumlichen Gebiet und Anfragen nach den zu einer Position benachbarten Objekten.

Die verteilte Verwaltung von Objekten basiert auf einer Partitionierung des geogra-

¹Die Länge einer Verbindung ist bei Chord durch eine zugrunde liegende Ringstruktur aus 2^m Bezeichnern definiert, in die jeder Peer eingeordnet ist, indem er einen zufälligen Bezeichner aus dem Intervall $[0, 2^m - 1]$ wählt.

phischen Raumes, wie sie im Prinzip auch von den meisten der weiter unten aufgeführten Ansätzen verwendet wird. Jeder Location-Server ist dabei für die Verwaltung der mobilen Objekte in einen bestimmten Bereich der Partitionierung verantwortlich. Um die für einen bestimmten Bereich zuständigen Location-Server rasch aufzufinden, bilden die Location-Server einen verteilten räumlichen Index in Form eines Overlay-Netzes. Hierbei werden die Bereiche der Location-Server hierarchisch anhand der räumlichen Inklusionsbeziehung zwischen den Bereichen in eine Baumstruktur eingeordnet. Bereichsanfragen, die den Geocast-Vermittlungsmechanismen dieser Arbeit am ähnlichsten sind, werden dann entlang der Location-Server-Hierarchie weitergeleitet. Erhält ein Location-Server eine Bereichsanfrage, so überprüft er zunächst, ob das angefragte Gebiet seinen Bereich überlappt. Ist das Fall, so gibt er die Anfrage an alle seine Kinder weiter, deren Bereiche ebenfalls das angefragte Gebiet überlappen. Ist der angefragte Bereich nicht oder nicht vollständig im eigenen Bereich des Servers enthalten, so wird die Nachricht zusätzlich an den Vater-Server weitergeleitet. So erreicht die Anfrage schließlich alle Blatt-SERVER, deren Bereiche das angefragte Gebiet überlappen. Die Blatt-SERVER sind für die Verwaltung der eigentlichen Positionen der Objekte mit Hilfe einer hauptspeicherbasierten räumlichen Datenbank zuständig und können die Anfrage schließlich beantworten; innere Knoten des Server-Baum dienen nur der Weiterleitung der Anfrage.

In einer weiteren Arbeit wurden außerdem dedizierte lokale Indexstrukturen für symbolische Lokationsmodelle untersucht, die insbesondere eine effiziente Verarbeitung von Bereichsanfragen innerhalb eines einzelnen Location-Servers unterstützen [Dro03].

Der strikt hierarchische Weiterleitungsalgorithmus bildet die Basis sowohl von vielen der unten aufgeführten verwandten Verfahren als auch der Vermittlungsalgorithmen dieser Arbeit. In dieser Arbeit wird das Prinzip allerdings auf eine Partitionierung anhand eines symbolischen Lokationsmodells angewandt. Außerdem liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Optimierung der rein hierarchischen Vermittlung in einem Router-Baum durch zusätzliche Direktverbindungen. In einem strikt hierarchischen System besteht die Gefahr der Überlastung der (wenigen) Knoten nahe der Wurzel der Hierarchie. Dieses Problem soll in dieser Arbeit durch Direktverbindungen gelöst werden, die vor allem die kritischen Knoten nahe der Wurzel umgehen und somit entlasten können. Ferner wird in dieser Arbeit ein Vermittlungsalgorithmus für verbandsbasierte Modelle vorgeschlagen, in denen Knoten in der Overlay-Hierarchie mehr als einen Vater haben können.

RectNet: RectNet [Heu05] ist ein verteiltes System zur Verwaltung räumlicher Objekte, wobei der Ort eines Objekts geometrisch beschrieben ist. RectNet unterstützt dabei nicht nur einfache Punktkoordinaten, sondern auch Gebiete im Raum, beispielsweise Polygone. RectNet unterstützt Anfragen, die die Position des Objekts in Relation zum angefragten Gebiet setzen, beispielsweise die Ermittlung aller Objekte innerhalb eines Gebiets (Inklusion) oder alle Objekte, die ein bestimmtes Gebiet überlappen (Schnitt).

Wie der Nexus-Lokationsdienst, so basiert auch das RectNet-System auf einer Partitionierung des geometrischen Raumes. Der Raum wird hierbei in rechteckige Bereiche – daher der Name RectNet –, hier als Cluster bezeichnet, aufgeteilt, für die jeweils einzelne physische Knoten (so genannte Cluster-Heads) zuständig sind, welche die Objekte innerhalb ihres Bereichs verwalten. Im Gegensatz zum Nexus-Lokationsdienst erfolgt

diese Partitionierung dynamisch entsprechend der Auslastung der Cluster-Heads. Sobald ein Cluster-Head zum Beispiel aufgrund einer zu hohen Anfragerate an Objekte in seinem Gebiet überlastet ist, teilt er seinen Bereich in zwei Teile und übergibt diese an zwei weitere Cluster-Heads, die nun für die Verwaltung der entsprechenden Objekte in diesen Bereichen zuständig sind. Er selbst agiert als Vater dieser beiden Cluster-Heads und leitet Anfragen entsprechend der verwalteten Gebiete an seine Kinder weiter. Durch diese dynamischen Aufteilungsvorgänge ergibt sich eine baumförmige Overlay-Netz-Struktur, der so genannte *Distributed-Space-Partitioning-Tree*, wobei die inneren Knoten für die Nachrichtenweiterleitung und die Blattknoten des Baumes für die Verwaltung der Objekte verantwortlich sind. Aufgrund der Fokussierung von RectNet auf dynamische Systeme unter Berücksichtigung dynamischer Knotenpopulationen kann RectNet auch als ein Peer-to-Peer-System aufgefasst werden.

Da in einer hierarchischen Struktur die Knoten an der Spitze der Hierarchie überlastet werden können, insbesondere für nicht lokale Anfragemuster, in denen ein substantieller Anteil der Anfragen an vom Sender entfernte Gebiete gerichtet ist, führt RectNet neben einem hierarchischen Vermittlungsalgorithmus, der Anfragen entlang der Baumstruktur weiterleitet, auch ein flaches Vermittlungsverfahren ein. Die flache Vermittlung ähnelt dabei dem im Peer-to-Peer-System CAN (Content Addressable Networks [RFH⁺01]) verwendeten Algorithmus. Hierfür bilden die Blatt-Server der Hierarchie eine flache Netzstruktur. Jeder Blatt-Server baut hierzu Verbindungen zu den Servern auf, deren Bereiche zu seinem eigenen Bereich benachbart sind. Die Anzahl der hierfür notwendigen Verbindungen pro Server wird bei einer gleichmäßigen Aufteilung des Raumes wie bei CAN durch die Dimensionalität d des zugrunde liegenden geometrischen Raumes beschränkt und beträgt $O(d)$.² Die Weiterleitung zu den Servern eines angefragten Gebiets erfolgt zunächst mittels eines einfachen Greedy-Algorithmus, der die Anfrage immer an denjenigen Nachbarn weiterleitet, der dem Ziel am nächsten liegt. In der zweiten Phase wird die Anfrage im Bereich des angefragten Gebiets durch Fluten verteilt.

Wie RectNet, so verwenden auch die Ansätze dieser Arbeit eine baumförmige Grundstruktur, die allerdings anhand eines symbolischen Lokationsmodells strukturiert ist. Während RectNet hierbei eine dynamische Partitionierung und Zuteilung der Bereiche zu Servern aufgrund deren Last betrachtet, liegen adaptive Lastbalancierungsmechanismen nicht im Fokus dieser Arbeit.

Zusätzlich werden sowohl bei RectNet als auch in dieser Arbeit weitere Verbindungen zur Entlastung der Knoten an der Spitze der Hierarchie eingeführt. Allerdings unterscheidet sich der hierbei verwendete Ansatz grundsätzlich von RectNet. Während RectNet einen zusätzlichen flachen Vermittlungsalgorithmus und die dazugehörige zusätzliche flache Netzstruktur verwendet, ergänzen die Ansätze dieser Arbeit die Hierarchie durch zusätzliche Verbindungen und verwendet denselben Vermittlungsalgorithmus auf der resultierenden (nun nicht mehr baumförmigen) Netzstruktur. Durch das Einbeziehen der Verbindungen der Hierarchie in den Vermittlungsvorgang sind die resultierende

²Im Gegensatz zu CAN, das eine Gleichverteilung der Server/Peer-Bereiche mit Hilfe einer Hash-Funktion erzeugt, kann die dynamische Partitionierung des Raumes aufgrund der Lastverteilung bei RectNet allerdings zu einer ungleichmäßigen Partitionierung führen, für die die Abschätzung $O(d)$ nicht allgemein gilt.

Pfade im Allgemeinen kürzer als die Pfade der flachen Vermittlung in RectNet ($O(\log n)$)³ im Vergleich zu $O(\sqrt[4]{n})$ in RectNet). Da die inneren Knoten der Hierarchie auch bei RectNet weiterhin vorhanden sind und für die Verwaltung des Netzes benötigt werden, ist die Anzahl der Verbindungen in RectNet nicht tatsächlich geringer – im Gegensatz zum Peer-to-Peer-System CAN, das *nur* eine flache Struktur verwaltet. Allerdings muss angemerkt werden, dass bei RectNet innere Knoten von Weiterleitungsaufgaben entbunden und nur noch für Strukturverwaltungsaufgaben zuständig sind.

Neben der allgemeinen Verwaltung von räumlichen Objekten beschreibt der Autor von RectNet auch die Implementierung zusätzlicher Dienste auf Basis des RectNet-Overlay-Netzes. Zum einen wird die Implementierung eines so genannten *Trigger-Service* beschrieben. Der Trigger-Service dient der Beobachtung von räumlichen Ereignissen und kann beispielsweise Applikationen informieren, sobald ein Objekt ein bestimmtes räumliches Gebiet betritt. Zum anderen wird kurz die Realisierung eines *Geocast-Dienstes* auf Basis von RectNet skizziert. Da dieser Dienst auf RectNet basiert und sich somit die Verteilstruktur nicht von der RectNet-Server-Struktur (Distributed-Space-Partitioning-Tree) unterscheidet, wird er an dieser Stelle zusammen mit RectNet erläutert.

Um Geocast-Nachrichten zu empfangen, speichern die potentiellen Empfänger einer Nachricht so genannte Subscription-Objekte im RectNet-System ab. Ein Subscription-Objekt enthält die UDP-Adresse des mobilen Objekts und dessen Position. Eine Geocast-Nachricht wird nun zunächst wie eine Gebietsanfrage an das Zielgebiet der Nachricht weitergeleitet und somit von den zuständigen Blattknoten des Distributed-Space-Partitioning-Trees empfangen. Diese ermitteln aufgrund der verwalteten Subscriptions die mobilen Objekte im Zielgebiet und stellen die Nachricht an die in der Subscriptions hinterlegten UDP-Adressen zu. Da dieser Ansatz auf dem bereits oben beschriebenen RectNet-Overlay-Netz aufbaut, gelten die dortigen Aussagen gleichermaßen für den RectNet-Geocast-Ansatz.

Contextcast: Contextcast [Heu02] ist ein früheres System des Autors des oben beschriebenen RectNet-Systems und ähnelt daher teilweise in Grundzügen RectNet. Contextcast unterstützt zwei Funktionen. Zum einen das kontextbasierte Auffinden von Ressourcen („Contextual Resource Discovery“) – Objekte mit einer geometrischen Position – durch räumliche Bereichsanfragen und kontextbezogene Nachrichten („Contextual Messaging“). Grundsätzlich ist der Kontextraum dabei nicht auf den physischen Raum beschränkt, sondern es können weitere Attribute in einen allgemeinen n -dimensionalen Raum abgebildet und vom Contextcast-System verwaltet werden.

Ähnlich wie RectNet basiert auch Contextcast auf einer dynamischen räumlichen Partitionierung des (Kontext-)Raumes. Wiederum werden die Gebiete der Partitionierung durch die physischen Knoten des Systems (Peers) verwaltet. Die dynamische Partitionierung erfolgt im Falle von Contextcast nicht durch einen Binärbaum, sondern durch einen Quadtree. Bei Überlastung eines Peers wird sein Bereich in vier kleinere Gebiete

³Die tatsächlich Pfadlänge hängt von diversen Parametern wie zum Beispiel der Tiefe der Lokationshierarchie, der Zuordnung von Lokationen zu physischen Knoten und der Anzahl und Verteilung zusätzlicher Direktverbindungen ab. Da eine reale Lokationshierarchie aber im Allgemeinen kaum mehr als ca. 15 Ebenen besitzt, ist die maximale Pfadlänge durch diese Tiefe beschränkt.

aufgeteilt, die dann auf weitere Peers verteilt werden. Die Nachrichtenweiterleitung erfolgt entlang des so entstehenden Baumes; ein flacher Vermittlungsansatz wie bei RectNet ist nicht vorgesehen. Grundsätzlich besteht daher bei diesem Ansatz trotz dynamischer Partitionierung die Gefahr der Überlastung von Peers an der Spitze der Hierarchie in Fällen, in denen kein lokales Anfrageverhalten vorliegt.

Geocast kann als ein Sonderfall der von Contextcast unterstützten kontextbezogenen Nachrichtenvermittlung aufgefasst werden, bei dem der Kontextraum nur durch den physischen Raum definiert ist. Die Vermittlung kontextbezogener Nachrichten ist in Contextcast analog zu RectNet realisiert. Zunächst werden die Objekte im Zielgebiet ermittelt. Jedes Objekt o gibt hierfür seine Position und Kontaktadresse (UDP-Adresse) durch Subskriptionen der Form $(pos(o), addr(o))$ im System bekannt. Von den verwaltenden Knoten der Subscriptions aus erfolgt dann die Zustellung der Nachricht an die Objekte mit Hilfe der in den Subscriptions hinterlegten Kontaktadresse.

Globase.KOM: Globase.KOM [KLS07] ist ein Peer-to-Peer-System zur Verwaltung einer Menge von Peers, deren geographischen Positionen durch geometrische Punktkoordinate gegeben sind. Auf Grundlage der geographischen Positionen der Peers können verschiedene Anfrage mit Hilfe von Globase.KOM beantwortet werden. Insbesondere werden Bereichsanfragen nach den Peers in einem bestimmten Gebiet und Nachbarschaftsanfragen nach den nächstgelegenen Peers unterstützt. Ein Peer kann dabei auch für allgemeine geographische Informationen stehen, zum Beispiel die Position eines Restaurants. Im Gegensatz zum Nexus-Lokationsdienst ist Globase.KOM dabei auf stationäre Objekte ausgerichtet, wobei die Peers selbst für die Verwaltung der Objekte verantwortlich sind ohne eine zusätzliche Server-Infrastruktur.

Globase.KOM ist ein so genanntes Super-Peer-to-Peer-System. Das heißt, nur eine Teilmenge der Peers – die *Super-Peers* – sind für die Verarbeitung (Weiterleitung) von Suchanfragen verantwortlich. Normale Peers sind nur für die verteilte Verwaltung von Objekten, nicht aber für die Weiterleitung von Anfragen zuständig. Ein (normaler) Peer ist jeweils mit einem Super-Peer verbunden und nutzt das durch die Super-Peers gebildete Overlay-Netz für die Suche nach Inhalten. Die folgende Beschreibung konzentriert sich auf die durch die Super-Peers gebildete Overlay-Netz-Topologie.

Wie RectNet, so basiert auch Globase.KOM auf einer dynamischen räumlichen Partitionierung des Raumes und Zuordnung der entstehenden rechteckigen Bereiche, in Globase.KOM als Zonen bezeichnet, zu Super-Peers. Der jeweilige Super-Peer einer Zone ist für die Verwaltung der Peers in seiner Zone verantwortlich. Ist ein Super-Peer überlastet, so partitioniert er seine Zone. Als Metrik für die Last eines Super-Peers wird hierbei die Anzahl der von ihm verwalteten Peers in seiner Zone verwendet. Zur Partitionierung wird ein Cluster-Algorithmus eingesetzt. Nach der Partitionierung wird die neu entstandene Zone einem Peer aus dieser Zone zugeordnet, der damit zum Super-Peer wird. Dieser neue Super-Peer baut eine Verbindung zu demjenigen Super-Peer auf, aus dessen Zone seine Zone entstanden ist. Somit entstehen die Vater-Kind-Beziehungen eines baumförmig anhand der Inklusionsbeziehung zwischen Zonen strukturierten Overlay-Netzes.

Um die Überlastung von Peers an der Spitze der Super-Peer-Hierarchie zu vermeiden, verwendet Globase.KOM wie der Ansatz in diese Arbeit zusätzliche Direktverbindungen,

die hier als „Interconnections“ bezeichnet werden. Jeder Super-Peer verwaltet eine Liste beschränkter Größe mit den Adressen zusätzlicher Super-Peers außer seines Vaters und seiner Kinder im Baum. Die Adressen dieser zusätzlichen Super-Peers werden aus den weitergeleiteten Nachrichten gelernt. Hierdurch werden Verbindungen zu entfernten Zonen aufgebaut, deren Super-Peers sich in anderen Teilbäumen der Hierarchie befinden.

Die Einrichtung zusätzlicher Direktverbindungen in Globase.KOM ähnelt zum Teil den dynamischen Direktverbindungen dieser Arbeit, durch die ebenfalls Verbindungen zu entfernten Teilbäumen in der Geocast-Router-Hierarchie eingerichtet werden. Allerdings werden dynamische Direktverbindungen in dieser Arbeit gezielt aufgrund der Popularität von Zielgebieten ausgewählt. Zusätzlich werden die dynamischen Verbindungen durch statische Verbindungen ergänzt, wobei die Ziele der statischen Verbindungen anhand der Distanz in der Hierarchie ausgewählt werden, so dass ein bestimmte Verteilung der Länge von Direktverbindungen gewährleistet ist.

Nimbus-Plattform: Die Nimbus-Plattform ist eine verteilte realisierte Plattform zur Unterstützung ortsbezogener Anwendungen durch Bereitstellung von Lokationsinformationen und zusätzlichen auf Ortsinformationen basierenden Diensten [Rot05]. Den Kern des Systems bildet dabei die so genannte *Location-Server-Infrastructure*, eine Föderation aus untereinander vernetzten Servern zur verteilten Verwaltung der Lokationsdaten. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen auf geometrischen Lokationsmodellen basierenden Systemen unterstützt diese Infrastruktur explizit symbolische Lokationsmodelle, wobei Nimbus symbolische Lokationen als „semantische“ Lokationen bezeichnet um hervorzuheben, dass mit diesen Lokationen eine bestimmte Bedeutung in der physischen Welt verbunden ist.

Auf Basis der Location-Server-Infrastruktur implementiert Nimbus verschiedene Dienste. Der *Resolution-Service* ist beispielsweise für die Bereitstellung geometrischer und symbolischer Positionsinformationen verantwortlich („Physical“ und „Semantic Resolution“) sowie zur Ermittlung von nahegelegenen Objekten („Proximity Resolution“). Der *Trigger-Service* erlaubt die Beobachtung räumlicher Ereignisse wie beispielsweise das Betreten einer bestimmten Region. Außerdem implementiert Nimbus einen insbesondere für diese Arbeit relevanten *Semantic-Geocast-Service*, der einem symbolischen Geocast-Mechanismus im Sinne dieser Arbeit bereitstellt [Rot03]. Dieser Geocast-Dienst bedient sich im Wesentlichen der allgemeinen Location-Server-Infrastruktur des Nimbus-Systems. Aufgrund seiner allgemeineren Ausrichtung soll dieses System daher bereits an dieser Stelle beschrieben werden. Die folgende Beschreibung der Location-Server-Struktur ist direkt auf das entsprechende Nimbus-Geocast-System übertragbar.

Die Nimbus-Location-Server-Infrastruktur kann als das System bezeichnet werden, das dem Ansatz dieser Arbeit am ähnlichsten ist. Es verwendet ebenfalls eine baumförmige Basis-Netzstruktur aus physischen Knoten, die hier als Location-Server bezeichnet werden, welche den symbolischen Lokationen des Modells zugeordnet sind. Es ergibt sich somit eine baumförmige Server-Hierarchie entsprechend der räumlichen Inklusionsbeziehung der zugeordneten symbolischen Lokationen. Ähnlich der Zuteilung von virtuellen zu physischen Geocast-Routern in dieser Arbeit kann dabei ein Location-Server für mehrere Lokationen (so genannte Cluster) verantwortlich sein. Wie bereits

in den verwandten Arbeiten in Bezug auf die Lokationsmodellierung beschrieben (vgl. Abschnitt 2.2.2), verwendet Nimbus ein Lokationsmodell bestehend aus verschiedenen Hierarchien (Lokationsbäume), im Gegensatz zu dieser Arbeit, die von einer einzelnen Hierarchie beziehungsweise einem Lokationsverband ausgeht. Um eine effiziente Verarbeitung von Anfragen und Weiterleitung von Geocast-Nachrichten zwischen verschiedenen, räumlich überlappenden Hierarchien zu ermöglichen, führt Nimbus daher zusätzlich zu den bekannten Vater-Kind-Beziehungen zwischen Lokationen beziehungsweise den entsprechenden verwaltenden Servern eine weitere als „Assoziation“ bezeichnete Relation ein. Eine Assoziation verbindet dabei teilweise überlappende Lokationen.

Zusätzlich zur hierarchischen Overlay-Netz-Struktur können auch in Nimbus zusätzliche Direktverbindungen definiert werden. Im Gegensatz zu dieser Arbeit lag der Fokus bei Nimbus allerdings nicht auf der Erforschung verschiedener Strategien für die Einführung von Direktverbindungen. Vielmehr wurde ein vergleichsweise einfacher Ansatz realisiert. Informationen über Location-Server werden dabei in der Location-Server-Hierarchie propagierte, wobei sich ein einzelner Server nur Adressinformationen zu einer begrenzten Anzahl an weiteren Servern merkt. Hierbei werden Server an der Spitze der Hierarchie priorisiert, das heißt, er werden bevorzugt Direktverbindungen zu diesen übergeordneten Servern eingerichtet.⁴ Die Auswahlstrategie für statische Direktverbindungen, die in dieser Arbeit vorgeschlagen wird, richtet Direktverbindungen dagegen nach der oben beschriebenen Idee des Kleinberg-Modells ein. Das heißt, es werden wenige Direktverbindungen zu entfernten Lokationen eingerichtet und vergleichsweise viele zu nahen Lokationen. Zusätzlich werden diese statischen Direktverbindungen durch dynamische Direktverbindungen ergänzt, wobei hier Ziele priorisiert werden, die eine hohe Popularität aufweisen.

GNet: GNet ist ein Peer-to-Peer-System, das unabhängig parallel zu dieser Arbeit entwickelt wurde [WS05]. Es kann einerseits für die Verwaltung geographischer Informationen als auch für die Verteilung von Geocast-Nachrichten genutzt werden. GNet unterstützt dabei direkt symbolische Koordinaten. Wie Nimbus und diese Arbeit, so verwendet auch GNet eine hierarchische Netzstruktur entsprechend der räumlichen Inklusionsbeziehung auf symbolischen Lokationen, die durch zusätzliche Direktverbindungen ergänzt wird. Die hierbei verwendete Auswahlstrategie für Direktverbindungen ist der Auswahlstrategie für statische Direktverbindungen dieser Arbeit vergleichbar. Das heißt, auch bei GNet werden Direktverbindungen zu den Vorfahren und den Kindern der Vorfahren im Router-Baum eingerichtet. Allerdings verwendet GNet keine zusätzlichen dynamischen Direktverbindungen, wie sie in dieser Arbeit aufgrund der Popularität von Zielgebieten definiert werden. Wie die Evaluierung dieser Arbeit zeigt, erhöhen diese dynamischen Direktverbindungen insbesondere in Szenarien mit populären, vom Sender entfernten Gebieten die Skalierbarkeit signifikant.

⁴Zusätzlich werden Verbindungen zu Servern in der eigenen Hierarchie priorisiert, wobei diese Priorisierung aufgrund des unterschiedlichen Lokationsmodells keine Entsprechung in den Ansätzen dieser Arbeit hat.

3.2.2.5 Geocast-Systeme

Als verwandte Arbeiten im Bereich der infrastrukturbasierten geographischen Kommunikation sind vor allem die Arbeiten von Imielinski und Navas zu nennen, die im Rahmen des DataMan-Projekts drei verschiedene Ansätze für die geographische Kommunikation basierend auf geometrischen Koordinaten vorgeschlagen haben [IN99, Nav01]: Geographisches Routing, geographisches Multicast-Routing und den Domain-Name-Server-Ansatz.

Geographisches Routing trifft Weiterleitungsentscheidungen direkt aufgrund von geographischen Informationen (Zielgebiet der Nachricht und geographisches Abdeckungsgebiet lokaler Netze mit den Empfängern). Es wurden verschiedene geographische Vermittlungsprotokolle vorgeschlagen. Zum einen wurden existierende IP-basierte Vermittlungsprotokoll erweitert (GeoRIP, GeoOSPF, GeoBP). Zum anderen wurde ein geographisches Vermittlungsprotokoll basierend auf einem dem IP-Netz überlagerten Overlay-Netz vorgeschlagen. *Geographisches Multicast-Routing* verwendet IP-Multicast-Protokolle für die Vermittlung von Nachrichten nach der Abbildung der geographischen Zielgebietsadresse auf eine Multicast-Gruppen-Adresse. Der *Domain-Name-Server-Ansatz* ermittelt die Empfänger(netze) mit Hilfe eines Verzeichnisses, im konkreten Fall dem Domain-Name-System und stellt Nachrichten dann mittels IP-Unicast oder IP-Multicast zu. Diese Ansätze sollen im Folgenden im Detail diskutiert werden.

GeoRIP: GeoRIP [Nav01] basiert auf dem Routing Information Protocol (RIP) [Hed88]. RIP ist ein Distanzvektor-Routing-Protokoll, das zum Zwecke der geographischen Vermittlung um geographische Informationen ergänzt wurde. Beim Distanzvektorverfahren teilen Router ihren direkten Nachbarn in Form eines Distanzvektors mit, welche Ziele (Subnetze) sie mit welchen Kosten (Vermittlungsschritte, engl. hops) erreichen können. Ein Router kann mit den Informationen seiner direkten Nachbarn seine eigene Vermittlungstabelle berechnen, indem er die Distanz zum jeweiligen Nachbarn und die in dessen Distanzvektor vermerkten Kosten summiert und jeweils den kürzesten Weg zu jedem Ziel wählt.

Mit GeoRIP teilen Router nun nicht nur die Subnetze mit, die über sie erreichbar sind, sondern auch die geographische Abdeckungen dieser Netze. Zusätzlich werden Nachrichten um die geographische Zielgebietsinformation ergänzt. Ein GeoRIP-Router bestimmt beim Empfang einer Geocast-Nachricht zunächst alle Subnetze, deren Gebiet das Zielgebiet schneidet und dann mit Hilfe der Vermittlungstabelle die Nachbarn auf den kürzesten Pfaden zu diesen Zielen. Zu beachten ist, dass ein Zugangs-Router eine Nachricht unter Umständen mehrfach erhält. Unnötige Äste können allerdings beschnitten werden.

GeoOSPF: GeoOSPF [Nav01] basiert auf dem Vermittlungsprotokoll Open Shortest Path First (OSPF) [Moy98], dessen Funktion bereits in Abschnitt 3.2.2.1 beschrieben wurde.

GeoOSPF verteilt zusätzlich zu Topologieinformationen auch die geographische Abdeckung der Subnetze mit Hilfe von Link-State-Advertisement-Paketen (LSA) im gesamten⁵ Netz. Beim Empfang einer Geocast-Nachricht bestimmt der Router zunächst die

⁵Um die Netzlast zu verringern, verwendet OSPF eine hierarchische Netzstruktur bestehend aus verschiedenen Bereichen (engl. area). Das Fluten von LSA-Paketen bleibt damit auf einen Bereich beschränkt.

Subnetze, deren Gebiete das Zielgebiet schneiden. Dann berechnet er einen Baum der kürzesten Pfade zu diesen Zielen mit dem Sender als Wurzel und leitet die Nachricht an diejenigen Nachbarn weiter, die auf dem kürzesten Pfad zu einem Subnetz im Zielgebiet liegen. Dieses Verfahren gleicht somit stark dem Vorgehen des entsprechenden Multicast-Routing-Protokolls Multicast Open Shortest Path First (MOSPF) [Moy94], mit dem einzigen Unterschied, dass die Zielsubnetze aufgrund ihrer geographischen Abdeckung bestimmt werden, anstatt auf der Gruppenzugehörigkeit von Empfängern im entsprechenden Subnetz.

GeoBP: GeoBP [Nav01] basiert auf einem Broadcast&Pruning-Verfahren und ähnelt damit sehr stark dem Distance-Vector-Multicast-Routing-Protokoll (DVMRP) [WPD98] oder Protocol-Independent-Multicast-Dense-Mode (PIM-DM) [ANS05]. Zunächst wird hierbei die Geocast-Nachricht im gesamten Netz mittels Reverse-Path-Forwarding bzw. Broadcast verteilt (vgl. Abschnitt 3.2.2.1). Die Nachricht erreicht somit alle Router im Netz. Im zweiten Schritt wird der Verteilbaum um die Äste beschnitten, die nicht zu Subnetzen im Zielgebiet der Geocast-Nachricht führen.

Offensichtlich besitzen die oben vorgestellten Protokolle GeoRIP, GeoOSPF und GeoBP starke Abhängigkeiten zu den eingesetzten IP-Routing-Protokollen und sind somit auf die Verwendung innerhalb der Vermittlungsschicht (im IP-Netz) ausgelegt. Das Ziel dieser Arbeit ist dagegen die Realisierung eines Protokolls, das ohne aufwändige Modifikationen des IP-Netzes realisiert werden kann.

Geographisches Routing im Overlay-Netz: Navas schlägt neben den oben genannten geographischen Vermittlungsverfahren basierend auf erweiterten IP-Routing-Protokollen auch ein Overlay-Netz-basiertes Verfahren vor [NT97]. Das Overlay-Netz besteht dabei aus einer Menge von *Geocast-Routern*, die für die Nachrichtenvermittlung zwischen Zugangsnetzen verantwortlich sind. Jedem Zugangsnetz ist ein so genannter *GeoNode* zugeordnet, der Geocast-Nachrichten in seinem Zugangsnetz an die Empfänger, genannt *GeoHosts*, verteilt.

Das Overlay-Netz aus Geocast-Routern ist hierarchisch strukturiert und ähnelt stark den oben beschriebenen Ansätzen zur Verwaltung von geographischen Informationen mit Hilfe von Overlay-Netzen. Die Grundlage bildet wiederum eine räumliche Partitionierung der physischen Raumes in Bereiche, die den Geocast-Routern zugeordnet sind. Die Geocast-Router werden in einer baumförmigen Overlay-Netztopologie entsprechend ihrer Dienstgebiet angeordnet. Die Nachrichtenweiterleitung erfolgt entlang des Router-Baumes mit den bereits erwähnten Nachteilen der möglichen Überlastung von Routern an der Spitze der Hierarchie.

Geographisches Multicast-Routing: Im Gegensatz zu den oben beschriebenen geographischen Vermittlungsverfahren treffen Multicast-basierte Verfahren Weiterleitungsentscheidungen nicht unmittelbar auf Grundlage geographischer Informationen. Vielmehr erfolgt zunächst eine Abbildung des geographischen Zielgebiets auf eine Multicast-Gruppen-Adresse. Hierzu werden geographischen Gebieten Multicast-Gruppen zugeordnet. Die Empfänger in den Zugangsnetzen treten den Gruppen bei, deren geographisches Gebiet ihre Position abdeckt. Für die Weiterleitung wird dann ein IP-Multicast-Protokoll

eingesetzt.

Navas schlägt eine geographische Aufteilung der Welt in so genannte Atome und Partitionen vor [IN96b]. Atome sind dabei die kleinsten adressierbaren Gebiete mit eigener Multicast-Adresse. Partitionen sind größere Gebiete, die weitere Partitionen oder Atome enthalten und ebenfalls eine eigene Multicast-Adresse besitzen. Für die automatische Bestimmung der Multicast-Gruppen einer geographischen Position kann dabei eine Berechnungsvorschrift eingesetzt werden. Die GeoNodes der Zugangsnetze treten nun jedem Atom und jeder Partition bei, deren Bereiche das Abdeckungsgebiet der Zugangsnetze des GeoNodes schneiden.

Für die Nachrichtenvermittlung schlägt Navas die Verwendung des Multicast-Protokolls Protocol-Independent-Multicast-Sparse-Mode (PIM-SM) vor. PIM-SM erzeugt für jede Multicast-Gruppe (in diesem Fall für jedes Atom und jede Partition) einen eigenen Verteilbaum (Shared Tree; vgl. Abschnitt 3.2.2.1). Hierfür wird für jede Gruppe ein so genannter Rendezvous-Router benötigt, der die Wurzel des gemeinsamen Verteilbaumes markiert. PIM-SM verteilt Informationen über die Rendezvous-Router mittels Fluten im gesamten Netz. Hierdurch entsteht für eine große Menge an Multicast-Gruppen, wie sie für Geocast benötigt werden, ein hoher Aufwand. Navas schlägt daher eine Optimierung vor, bei der nur Informationen über Gruppen großer Gebiete weit im Netz propagiert werden; kleine Gruppen werden dagegen nur lokal bekanntgegeben. Mit Hilfe einer hierarchischen Kodierung von Multicast-Adressen und einer Weiterleitung anhand des längsten Präfixes wird trotzdem eine globale Verfügbarkeit der Gruppen ermöglicht.

In dieser Arbeit wird ebenfalls die Verwendung eines Multicast-Protokolls zur effizienten Vermittlung von Geocast-Nachrichten – hier für symbolisch adressierte Nachrichten – vorgeschlagen. Dieser Ansatz verwendet allerdings ein spezielles, so genanntes *explizites Multicast-Protokoll* [BFI⁺01], um mit der großen Menge an Multicast-Gruppen umzugehen. Der eigentliche Fokus dieser Arbeit liegt allerdings auf Overlay-Netz-basierten Ansätzen zur Vermittlung symbolisch adressierter Geocast-Nachrichten, die IP-Multicast nur als zusätzliche Optimierung nicht aber als notwendige Voraussetzung ansehen. In diesem Sinne schlägt diese Arbeit die Integration eines leichtgewichtigen Multicast-Protokoll (Source-specific Multicast) in das vorgeschlagene Overlay-Netz-basierte Geocast-Protokoll vor.

Domain-Name-Server-Ansatz: Der von Navas vorgeschlagene Domain-Namer-Server-Ansatz teilt die Zustellung von Geocast-Nachrichten in zwei Phasen [IN99]. In der ersten Phase werden mit Hilfe eines Verzeichnisses die GeoNodes ermittelt, deren Zugangsnetze das Zielgebiet der Nachricht schneiden. Im der zweiten Phase sendet der Sender die Nachricht mit Hilfe herkömmlicher Internet-Transportprotokolle an die ermittelten GeoNodes.

Offensichtlich ist für die Sicherstellung der Skalierbarkeit dieses Ansatzes zunächst ein leistungsfähiger Verzeichnisdienst erforderlich. Navas schlägt hierfür die Verwendung und Erweiterung des Domain-Name-Systems (DNS) vor. Insbesondere muss das DNS hierfür um die Funktionalität zur Auflösung geographischer Adressen auf die IP-Adressen der entsprechenden GeoNodes erweitert werden. Diese Erweiterung wird nicht ausführlich diskutiert. Da diese Funktionalität allerdings stark an die Ausführung von Bereichs-

anfragen erinnert, wie sie von den in Abschnitt 3.2.2.4 aufgeführten Systemen implementiert wird, ist damit zu rechnen, dass ein skalierbarer Verzeichnisdienst eine ähnliche Komplexität aufweist und somit die Erweiterung keine triviale Aufgabe darstellt. Insbesondere ist das DNS bisher nicht geographisch sondern nach administrativen Domänen strukturiert – nur die Top-Level-Länder-Domänen spiegeln einen geographischen Bezug wieder, da die Vergabe von DNS-Namen innerhalb einer Länderdomäne von nationalen Einrichtungen koordiniert wird. Es ist daher damit zu rechnen, dass sich ein großer Teil der Komplexität in die Implementierung des skalierbaren Verzeichnisdienstes verlagert.

Aber selbst unter der Annahme, dass ein solcher skalierbarer Verzeichnisdienst zur Verfügung stünde, wäre die effiziente Realisierung der zweiten Phase, das heißt, der skalierbaren Nachrichtenvermittlung, ein offenes Problem. Bei großen Gebieten mit vielen Empfängern ist eine Nachrichtenzustellung mit mehreren Unicast-Nachrichten nicht effizient. Die Verwendung eines IP-Multicast-Verfahrens setzt entweder ein geographisches Multicast-Protokoll voraus. Oder es muss ein effizienter Mechanismus zur Etablierung einer temporären Multicast-Gruppe zur Verfügung stehen, welcher den Empfängern signalisiert, dass sie einer bestimmten (temporären) Gruppe für den Empfang der folgenden Nachricht beitreten sollen. Lösungen für beide Probleme werden im Kontext der Vermittlung symbolisch adressierter Nachrichten in dieser Arbeit diskutiert.

DataSpace: Das DataSpace-System ist ein ebenfalls innerhalb des DataMan-Projekts entwickeltes System zur effizienten Ermittlung ortsbezogener Informationen [IG99, GI99]. Obwohl es von der Funktionalität des Dienstes eher den verteilten Systemen zur Datenverwaltung als den Geocast-Protokollen zuzuordnen ist, so ist die Realisierung auf Grundlage eines speziell angepassten Multicast-Verfahrens doch klar netzwerkzentrisch und mit den oben eingeführten geographischen Multicast-Ansätzen von Navas vergleichbar. Daher soll es an dieser Stelle unter den Geocast-Ansätzen diskutiert werden.

Der DataSpace ist ein Teil des physischen Raumes, der sich 100 km über und bis zu 10km unter die Oberfläche der Erde erstreckt. Innerhalb des Dataspace befinden sich Informationsobjekte, die eine geographische Position besitzen, (ortsbezogene) Daten generieren und speichern und diese Daten zur Abfrage bereitstellen. Objekte eines bestimmten Typs bilden so genannte „Dataflocks“ und können selektiv abgefragt werden.

Zur Abfrage bestimmter Dataflocks wird ein geographisches Multicast-Verfahren eingesetzt. Hierfür wird der Dataspace hierarchisch in dreidimensionale Würfel, so genannte „Datacubes“, partitioniert. Jeder Datacube hat eine Adresse genannt „Space-Handle“. Diese Adresse ist dabei hierarchisch strukturiert, das heißt, der Space-Handle eines umgebenden Datacubes ist ein Präfix der eingeschlossenen Datacubes. Space-Handles bilden zusammen mit einem zusätzlichen „Subject-Code“ so genannte „Spacecast-Adressen“, die als geographische Multicast-Adresse interpretiert werden können.

Mit Hilfe des Spacecast-Protokolls, eines speziellen Multicast-Protokolls, können Anfragen an die entsprechenden Dataflocks vermittelt werden. Das Spacecast-Protokoll ist dabei speziell auf die große Anzahl an resultierenden Multicast-Gruppen ausgerichtet. Hierfür wird das Konzept der *Fat-Shared-Trees* vorgeschlagen. Ein Fat-Shared-Tree fasst mehrere Shared-Trees mit gleichem Adresspräfix zusammen. Die Zustellung der Nachricht wird dadurch unpräziser, da auch Teilnehmer (Objekte) unter Umständen eine

Nachricht an Gruppen bekommen, denen sie eigentlich nicht angehören. Andererseits müssen die Router deutlich weniger Zustandsinformationen in Form von Vermittlungstabelleneinträgen verwalten. Um einen Kompromiss zwischen präziser Zustellung und geringer Zustandsinformation zu erzielen, können Fat-Shared-Trees dynamisch in mehrere Bäume geteilt werden, sobald die Präzision der Zustellung zu stark unter der Zusammenfassung leidet.

Wie bereits oben angesprochen, wird in dieser Arbeit ebenfalls ein Multicast-basierter Ansatz, allerdings hier basierend auf *explizitem Multicast* vorgeschlagen, der in der Lage ist, mit einer großen Anzahl an Gruppen umzugehen. Wie ebenfalls bereits oben erwähnt liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit allerdings auf Overlay-Netz-basierten Ansätzen und der Verwendung von IP-Multicast als optionale Optimierung.

Symbolische Geocast-Protokolle: Neben den bisher besprochenen Geocast-Protokollen für geometrische Lokationsmodelle, existieren auch verschiedene Geocast-Verfahren mit Unterstützung symbolisch adressierte Nachrichten. Zwei dieser Verfahren, die auf allgemeinen Plattformen für ortsbezogene Dienste beruhen, wurden bereits in Abschnitt 3.2.2.4 besprochen (vgl. Nimbus und GNet in Abschnitt 3.2.2.4). Für eine Diskussion dieser Ansätze wird daher auf diesen Abschnitt verwiesen.

Als Vorläufer dieser Arbeit wurde von Coschurba [CRD02] ebenfalls innerhalb des Nexus-Projekts ein weiterer Geocast-Ansatz entwickelt, der eine Unterstützung für symbolisch adressierte Nachrichten bietet. Dieser Ansatz unterstützt neben symbolischen Adressen auch geometrisch adressierte Nachrichten, sowohl in Form zweidimensionaler Figuren als auch 2,5-dimensionale geometrische Adressen.

Die Grundlage des Vermittlungsalgorithmus bildet ein geometrisches Geocast-Vermittlungsprotokoll nach Navas (vgl. geographische Routing-Verfahren oben). Da dieses Protokolle ursprünglich allerdings nur für die Weiterleitung aufgrund zweidimensionaler geometrischer Adressen eingesetzt werden können, führt Coschurba zusätzlich den so genannten *Scope* einer Geocast-Adresse ein. Der Scope ist eine Vereinfachung der Originaladresse und wird nur für die Nachrichtenvermittlung eingesetzt. Der Scope ist immer eine zweidimensionale geometrische Figur, die zum geometrischen Geocast-Vermittlungsprotokoll nach Navas kompatibel ist. Die Grundidee der Vermittlung besteht darin, die Originaladresse zunächst auf den zweidimensionale Scope abzubilden, die Nachricht dann mittels des geometrischen Geocast-Protokolls nach Navas zuzustellen und beim Empfänger eine Nachfilterung aufgrund der ebenfalls in der Nachricht enthaltenen Originaladresse vorzunehmen.

Die Bestimmung des Scopes ist im Falle geometrischer Adressen relativ einfach. Eine zweidimensionale Adresse kann direkt oder in vereinfachter Form übernommen werden. Bei einer 2,5-dimensionalen Adresse kann der Scope aus der zweidimensionale Grundfigur bestimmt werden. Die Bestimmung des Scopes einer symbolischen Adresse erfordert allerdings ein hybrides Lokationsmodell, das den symbolischen Lokationen zumindest approximierte geometrische Beschreibungen zuordnet. Dies ist mit dem von Coschurba beschriebenen Ansatz oder dem in Kapitel 2 dieser Arbeit beschriebenen Lokationsmodell möglich.

Im Gegensatz zum Ansatz nach Coschurba setzen die symbolischen Vermittlungspro-

tokolle dieser Arbeit explizit kein Wissen über die Geometrie von Lokationen voraus. Die geographische Vermittlung erfolgt rein auf Grundlage symbolischer Adressen. Hierdurch können im Vergleich zu hybriden Lokationsmodellen vergleichsweise einfache, rein symbolische Lokationsmodelle eingesetzt werden.

Schließlich unterstützt das nach dieser Arbeit entstandene und in einer gemeinsamen Publikation mit dem Autor dieser Arbeit beschriebene Peer-to-Peer-System Symstry [SWKD07b] die Vermittlung von symbolisch adressierten Nachrichten. Grundsätzlich verwendet auch Symstry ein präfixbasiertes Vermittlungsprotokoll auf symbolischen Adressen,bettet die notwendigen Verteilstrukturen allerdings in ein Peer-to-Peer-System ein. An dieser Stelle ist es sinnvoll, darauf hinzuweisen, dass in dieser Arbeit kein Peer-to-Peer-System entworfen werden soll, dessen Verwaltungsmechanismen typischerweise auf eine hoch dynamische Menge von Peers ausgelegt sind. Zwar soll auch das Geocast-System dieser Arbeit eine gewisse Robustheit gegenüber Knotenfehlern aufweisen und in der Lage sein, eine funktionstüchtige Verteilstruktur auch nach dem Ausfall einzelner Knoten wieder herzustellen. Allerdings wird hier ein weit geringerer Grad an Dynamik angenommen, als das typischerweise in einem Peer-to-Peer-System der Fall ist; in einem solchen System ist die dynamische Veränderung der Knotenpopulation vielmehr die Regel als die Ausnahme.

Ad-hoc-Geocast-Protokolle: Innerhalb dieser Arbeit stehen Geocast-Verfahren für infrastrukturbasierte Systeme bestehend aus einer Menge dedizierter Geocast-Router, die über eine feste Kommunikationsinfrastruktur wie dem Internet verbunden sind im Vordergrund. Neben den oben beschriebenen Ansätzen für solche infrastrukturbasierten Systeme existiert auch eine Reihe von Geocast-Protokollen für mobile Ad-hoc-Netze (MANET). Diese Ansätze sollen hier allerdings aufgrund ihrer fundamentalen Unterschiede in Bezug auf das zugrunde liegende Systemmodell nur kurz skizziert werden. Für eine ausführliche Beschreibung wird auf den Übersichtsartikel [Mai04] verwiesen.

Für die Geocast-Nachrichtenvermittlung in MANETs wurden verschiedene Strategien vorgeschlagen. Beim *gerichteten Fluten* werden aufgrund der Senderposition und des Zielgebiets so genannte „Weiterleitungszonen“ definiert. Nur Knoten innerhalb dieser Zone leiten die Nachricht weiter, indem sie die Nachricht an alle Nachbarn in Funkreichweite senden [KV99]. Diese Strategie wurde in verschiedenen Arbeiten optimiert, zum Beispiel durch die Einführung dynamischer Weiterleitungszonen [CCT01, BB02], die beispielsweise Knotengeschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen berücksichtigen. In [SRL01] wird ein auf Voronoi-Diagrammen basierenden Ansatz beschrieben. In [BCT01] wird gerichtetes Fluten für die Etablierung redundanter Pfade vom Sender zum Zielgebiet verwendet. Ein weiterer Ansatz [Lia00] verringert den durch das Fluten der Weiterleitungszone entstehenden Aufwand durch Partitionierung des Netzes in Zellen. Nur dedizierte Knoten innerhalb der Zellen leiten hierbei die Nachricht weiter.

Die zweite Routing-Strategie verwendet ein Unicast-Protokoll für die Weiterleitung der Nachricht vom Sender zu einem Knoten im Zielgebiet. Innerhalb des Zielgebiets wird die Nachricht durch Fluten verteilt [MFE03, KV00]. Grundsätzlich kann für die erste Phase dabei jedes der zahlreichen Unicast-Protokoll für infrastrukturlose Netze verwendet werden. Allerdings bieten sich vor allem so genannte positionsbasierte Routing-

Protokolle an [MH01]. Teilweise verwenden diese Protokolle selbst wieder gerichtetes Fluten [BCSW98, KV98]. Andere Protokolle wie zum Beispiel [KSU99, KK00], verwenden so genanntes *Greedy Forwarding*, um Nachrichten an jeweils einen Nachbarknoten weiterzuleiten, der vereinfacht ausgedrückt näher zum Ziel liegt. Greedy Forwarding wird dabei oft mit so genanntem „Face“ oder „Perimeter Routing“ auf planaren Graphen kombiniert, um dadurch auch eine Weiterleitung in Situationen zu ermöglichen, in denen kein dem Ziel näher liegender Knoten ermittelt werden kann [KK00, KWZZ03].

Wie aus dieser kurzen Beschreibung ersichtlich wird, liegt das Hauptaugenmerk dieser Ansätze auf dem effizienten Umgang mit den hoch dynamischen Eigenschaften eines mobilen Ad-hoc-Netzes, in denen sich insbesondere die Konnektivität zwischen den mobilen Knoten ständig ändert. Die Verwendung von Positionsinformationen für die Vermittlung von Nachrichten bietet Vorteile, da sie nicht unmittelbar auf umfassenden dynamischen Netztopologie beruht, sondern anhand von geographischen Informationen lokale Entscheidungen über die Weiterleitungsrichtung ermöglicht. In einem infrastrukturbasierten Systemmodell, wie dem in dieser Arbeit betrachteten, können dagegen komplexere (Overlay-)Netz-Strukturen etabliert und aufrechterhalten werden. Die gegebene Problemstellung dieser Arbeit ist somit fundamental unterschiedlich zu den Problemen, die in MANETs zu lösen sind.

3.3 Systemmodell und Anforderungen

In diesem Abschnitt wird das Systemmodell vorgestellt, das die Kernkomponenten der im Folgenden vorgestellten Vermittlungsansätze einführt. Ferner werden die Anforderungen an das zu realisierende Geocast-System spezifiziert. Schließlich beinhaltet dieser Abschnitt eine Übersicht über mögliche Vermittlungsansätze, die in den folgenden Abschnitten im Detail weiter verfolgt werden sollen.

3.3.1 Systemmodell

Das in dieser Arbeit verwendete Geocast-System besteht ähnlich dem Systemmodell von Navas und Imielinski [NT97] im Wesentlichen aus vier Komponenten:

- Geocast-Applikation
- Geocast-Host
- Geocast-Message-Server
- Geocast-Router

Einen Überblick über die Komponenten und ihre Verbindungen gibt Abbildung 3.1; eine detaillierte Erläuterung erfolgt in den folgenden Abschnitten.

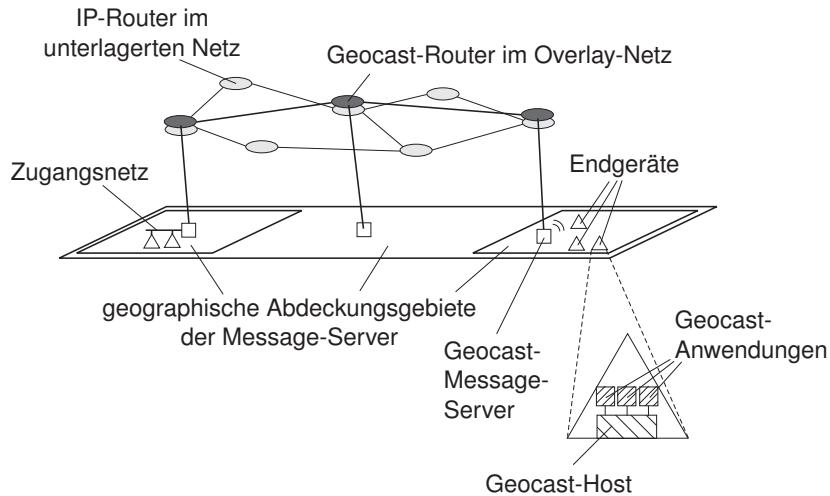


Abbildung 3.1: Systemmodell

3.3.1.1 Geocast-Applikationen

Eine Geocast-Applikation wird für das Versenden von Geocast-Nachrichten und den Empfang von Geocast-Nachrichten verwendet. Sie wird auf einem mobilen oder statio-nären Endgerät mit bekannter Position ausgeführt. Pro Endgerät können dabei mehrere Geocast-Applikationen ausgeführt werden.

Aufgrund des breiten Anwendungsbereichs der ortsbezogenen Kommunikation, das von ortsbezogenen Warnmeldungen, über Werbenachrichten bis hin zu persönlichen Kommunikationsdiensten wie einem ortsbezogenem Chat (Instant Messaging) reicht, ergibt sich die Notwendigkeit zur Unterscheidung von verschiedenen Geocast-Applikationen und den entsprechenden Nachrichten. Hierzu werden *Applikationsbezeichner* für die Kennzeichnung verschiedener *Applikationsklassen* eingeführt. Eine Geocast-Nachricht wird an alle Anwendungen einer bestimmten Applikationsklasse in einem bestimmten Gebiet adressiert. Auf dem Endgerät eingehende Nachrichten werden an alle auf dem Endgerät ausgeführten Applikationen der adressierten Klasse weitergeleitet (siehe Geocast-Host; Abschnitt 3.3.1.2). Applikationsklassen werden dabei nur lo-kal auf dem Endgerät interpretiert; die Nachrichtenvermittlung erfolgt rein aufgrund des Zielgebiets der Nachricht.

3.3.1.2 Geocast-Hosts

Ein Geocast-Host ist eine auf dem Endgerät eines Benutzers ausgeführte Softwarekom-ponente. Der Geocast-Hosts leitet eingehende Geocast-Nachrichten entsprechend der adressierten Applikationsklasse an die lokal auf dem Endgerät ausgeführten Applikatio-nen weiter. Hierzu registrieren sich Geocast-Anwendungen mit ihrem Applikationsbe-zeichner beim lokalen Geocast-Host.

Bevor ein Host eingehende Geocast-Nachrichten an lokale Applikationen zustellt, stellt er durch den Vergleich der geographischen Position seines Endgeräts und des adres-

sierten Zielgebiets sicher, dass sich das Endgerät tatsächlich im Zielgebiet der Nachricht befindet (lokale Filterung, siehe unten). Hierzu muss dem Geocast-Hosts die aktuelle Position seines Endgeräts bekannt sein. Hosts können dabei sowohl auf stationären Geräten, beispielsweise auf herkömmliche PCs, oder auf mobilen Geräten, zum Beispiel Personal Digital Assistants (PDAs) oder Notebooks ausgeführt werden. Um ortsbezogene Nachrichten empfangen zu können, muss die Position des Endgeräts dem Geocast-Host in Form einer symbolischen Lokation entsprechend des zugrunde liegenden symbolischen Lokationsmodells bekannt sein (für detaillierte Anforderungen an die zu unterstützenden Modelle siehe Abschnitt 3.4). Stationäre Geräte können dabei manuell positioniert werden, indem ihre fixe Position in der Konfiguration des Hosts angegeben wird. Mobile Hosts benötigen dagegen ein oder auch mehrere Positionierungssysteme, die Lokationen entsprechend dem zugrunde liegenden Lokationsmodell ermitteln.

In der entgegengesetzten Richtung übergeben Geocast-Anwendungen zu versickende Nachrichten an den lokalen Geocast-Host auf dem Endgerät der Anwendung einschließlich der notwendigen Adressinformation, das heißt, dem Zielgebiet der Nachricht und der adressierten Applikationsklasse. Der Host leitet diese Nachrichten an einen Geocast-Router zu Vermittlung weiter.

3.3.1.3 Geocast-Message-Server

Ein Geocast-Message-Server ist für die Verteilung von Nachrichten innerhalb eines bestimmten Zugangsnetzes verantwortlich, beispielsweise innerhalb eines lokalen Netzes (LAN); die Vermittlung von Nachrichten zwischen verschiedenen Zugangsnetzen ist dagegen Aufgabe der Geocast-Router (siehe Abschnitt 3.3.1.4). Hieraus ergibt sich ein dreischrittiger Prozess der Nachrichtenzustellung an Geocast-Hosts:

1. Übergabe der Nachricht von der Geocast-Applikation an den Geocast-Host auf dem Endgerät der Applikation und von dort an den lokalen Message-Server im Zugangsnetz des Senders. Dieser Message-Server übergibt die Nachricht an einen beliebigen Geocast-Router zur globalen Vermittlung – im Allgemeinen ist dies ein Geocast-Router, der bezüglich der Netztopologie nahe zum Message-Server liegt und in der Konfiguration des Message-Servers angegeben wird.
2. *Globale Vermittlung* der Geocast-Nachricht durch die Geocast-Router an alle Geocast-Message-Server, deren Zugangsnetze das Zielgebiet der Nachricht schneiden.
3. *Lokale Vermittlung* der Nachricht an die Geocast-Hosts innerhalb des Zugangsnetzes durch die entsprechenden Message-Server.

Um im zweiten Schritt feststellen zu können, an welche Message-Server eine Nachricht vermittelt werden muss, wird jedem Message-Server ein *Abdeckungsgebiet* zugeordnet. Dieses Gebiet wird in Form einer Lokation des zugrunde liegenden Lokationsmodells definiert und entspricht dem geographischen Abdeckungsgebiet des Zugangsnetzes

des Message-Servers. Hierbei ist zu beachten, dass sich die Dienstgebiete von Message-Servers durchaus überlappen können, nämlich dann, wenn ein Gebiet durch mehrere Zugangsnetze abgedeckt wird.

Durch diese Trennung können je nach Zugangsnetztechnologie optimale lokale Vermittlungsmechanismen verwendet werden. So kann beispielsweise die lokale Zustellung optimiert werden, wenn im Zugangsnetz ein Multicast-Protokoll die selektive Zustellung an Gruppen von Empfängern ermöglicht. Bei drahtlosen Kommunikationstechnologien ist aufgrund der Rundsendeeigenschaft des Funkmediums dagegen ein einfaches Rundsenden der empfangenen Nachrichten zusammen mit der lokalen Filterung bei den Geocast-Hosts sinnvoll.

3.3.1.4 Geocast-Router

Die Aufgabe der Geocast-Router ist die globale Vermittlung von Geocast-Nachrichten an alle Message-Server, deren Abdeckungsgebiete das Zielgebiet der vermittelten Nachricht schneiden. Hierzu bilden die Geocast-Router ein dem IP-Netz überlagertes *Overlay-Netz*.

Um Geocast-Nachrichten untereinander weiterleiten zu können, verwenden die Geocast-Router das UDP-Transportprotokoll. Dabei wird eine *Geocast-Nachricht* als eine zusammengehörige endliche Menge von Nutzdaten angesehen – das heißt, es werden keine Nachrichtenströme betrachtet. Die Nachrichtengröße ist dabei grundsätzlich nicht beschränkt, insbesondere nicht auf die maximale Größe eines UDP-Datagramms (65507 Bytes Nutzdaten). Hierbei ist zu beachten, dass ein UDP-Datagramm nicht nur die Nutzdaten der Geocast-Nachricht, sondern auch Kopfinformationen des Geocast-Protokolls wie das Zielgebiet der Nachricht transportieren muss. Ist eine Geocast-Nachricht größer als die maximale Nutzdatengröße des UDP-Datagramms abzüglich der Geocast-Protokollkopfinformationen, so muss die Nachricht in mehrere Datagramme fragmentiert werden. Diese Fragmentierung ist Aufgabe des Geocast-Hosts des Senders. Das heißt, der Geocast-Host zerlegt die Nachricht in Fragmente, die jeweils in einem UDP-Datagramm transportiert werden können, versieht jedes Fragment mit entsprechenden Kopfinformationen einschließlich der Zielgebietsadresse, einer global eindeutigen Nachrichtenkennung und der Fragmentnummer der Nachricht und sendet jedes Fragment einzeln an den lokalen Geocast-Message-Server. Dieser leitet die Datagramme an einen beliebigen Geocast-Router weiter. Die Geocast-Router führen aufgrund der Zieladresse im Geocast-Kopf der Fragmente die Vermittlung an die Message-Server im Zielgebiet durch. Die Message-Server im Zielgebiet verteilen die Fragmente an die Geocast-Hosts im Zielgebiet, und die Geocast-Hosts führen dann die Defragmentierung der Nachricht durch, bevor sie die Nachricht an die adressierten Applikationen auf dem Endgerät übergeben. Für eine einfache Beschreibung wird im Folgenden wo nicht zwingend erforderlich bei der Beschreibung der Vermittlung keine Unterscheidung von Geocast-Nachrichten und Fragmenten einer Nachricht vorgenommen. Die Beschreibungen gelten sinngemäß aber auch für die Vermittlung von Fragmenten von großen Nachrichten.

3.4 Anforderungen

Bevor auf die eigentlichen Lösungsansätze zur ortsbezogenen Nachrichtenvermittlung eingegangen wird, sollen an dieser Stelle die konkreten Anforderungen an die zu entwerfenden Protokolle definiert werden.

Adressierungskonzept und Lokationsmodell: Die zu entwerfenden Geocast-Vermittlungsprotokolle sollen der Vermittlung rein symbolisch adressierter Nachrichten dienen. Die zugrunde liegenden Lokationsmodelle sind dabei hierarchische symbolische Modelle – sowohl *baumförmige* als auch *verbandsbasierte Modelle* –, wie sie im Detail in den Abschnitten 2.4.2.2 bzw. 2.4.2.2 eingeführt wurden.

Zusätzlich soll die Vermittlung von Nachrichten an *mobile Zielgebiete* wie Lokationen innerhalb eines Schiffe oder Zuges ermöglicht werden.

Unterstützung der globalen Vermittlung: Der Fokus dieser Arbeit liegt ferner explizit auf der globalen Vermittlung von Geocast-Nachrichten zwischen Zugangsnetzen mit Hilfe einer Geocast-Router Infrastruktur. Die lokale Vermittlung innerhalb der Zugangsnetze durch die Message-Server ist dagegen nicht gesonderter Gegenstand dieser Arbeit. Vielmehr gehen wir davon aus, dass innerhalb eines Zugangsnetzes technologiespezifische Verteilmechanismen Anwendung finden. So kann beispielsweise in einer Funkzelle die Zustellung einer Nachricht vom Message-Server an die Geocast-Hosts per lokalem Rundsenden erfolgen. Unterstützt das lokale Netz IP-Multicast, so ist ebenfalls eine Zustellung über das Senden an eine bestimmte Multicast-Gruppe vorstellbar. In größeren Zugangsnetzen können dabei einzelnen Lokationen auch dedizierte Multicast-Gruppen zugewiesen werden – aufgrund der Beschränkung auf einzelne lokale Zugangsnetze sind die aus einer großen Anzahl an globalen Multicast-Gruppen entstehenden Nachteile bei der globalen Vermittlung nicht relevant.

Skalierbarkeit: Die Ansätze sollen für globale und feingranulare Lokationsmodelle mit einer großen Anzahl von Empfängern und Sendern mit den entsprechend resultierenden hohen Nachrichtenraten ausgelegt sein. Insbesondere soll darauf geachtet werden, einzelne Komponenten, insbesondere Geocast-Router, nicht zu überlasten und das resultierende Nachrichtenaufkommen zu minimieren.

Robustheit: Ziel ist die Realisierung eines so genannten Best-Effort-Service, der insbesondere keine Garantien zur Zustellung von Nachrichten gibt. Die zuverlässige Geocast-Kommunikation ist aufgrund der hohen Komplexität, die den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, nicht Gegenstand der Betrachtungen.

Trotzdem sollen Mechanismen integriert werden, die nach einem Router- oder Verbindungsausfall möglichst rasch wieder ein funktionstüchtiges Netz herstellen. Bis zum Wiedererreichen dieses korrekten Zustandes können allerdings Nachrichten bzw. Nachrichtenfragmente verlorengehen.

Geht ein Fragment einer Nachricht während der Vermittlung verloren, so kann die Nachricht somit nicht mehr vollständig zugestellt werden. Der Geocast-Host des Empfängers sorgt aber dafür, dass nur vollständige Nachrichten an die Applikation weiterge-

leitet werden. Die Gesamtgröße jeder Nachricht ist dabei in den Kopfinformationen des Geocast-Protokolls vermerkt. Der Geocast-Host puffert eingehende Fragmente, bis die gesamte Nachricht empfangen wurde und leitet diese dann komplett an die Anwendung weiter. Um bei verlorengegangenen Fragmenten Pufferplatz nicht unendlich zu blockieren, verwirft der Geocast-Host nicht komplett empfangene Nachrichten, wenn er noch ausstehende Fragmente nicht innerhalb einer definierten Zeitspanne erhält.

Installation auf Grundlage der bestehenden IP-basierten Kommunikationsinfrastruktur: In dieser Arbeit sollen explizit nur Ansätze betrachtet werden, welche keine Modifikation der IP-Router-Infrastruktur erfordern, sondern auf Standard-IP-Protokollen aufbauen. Insbesondere sollen aufgrund der in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Vorteile Overlay-Netz-basierte Ansätze zur Vermittlung von Geocast-Nachrichten untersucht werden.

Wir gehen davon aus, dass hierfür eine dedizierte Infrastruktur von mit dem Internet verbundenen Rechnern zur Verfügung steht, welche die Geocast-Router-Funktionalität übernehmen (vgl. Abschnitt 3.3.1.4). Ein Peer-to-Peer-basierter Ansatz, der mit einer hoch dynamischen Menge an Peers umgehen kann, ist dabei explizit kein Ziel dieser Arbeit. Trotzdem soll es ermöglicht werden, neue Rechner relativ einfach in das System zu integrieren. Hierfür muss das System seine Struktur entsprechend adaptieren.

3.5 Verzeichnisbasierte Ansätze

Als erster Klasse von Vermittlungsansätzen werden in diesem Abschnitt verzeichnisbasierte Ansätze untersucht. Diese Ansätze kommen völlig ohne dedizierte Geocast-Vermittlungsinfrastruktur (Geocast-Router) aus, indem sie zur globalen Vermittlung nur die existierende UDP/IP-Vermittlungsinfrastruktur des Internet verwendet. Mit Hilfe eines Verzeichnisses werden zunächst symbolische Lokationen auf UDP-Adressen der Vermittlungsschicht abgebildet. Hierzu verwaltet das Verzeichnis die Zuordnung von symbolischen Lokationen zu Zugangsnetzen bzw. deren Message-Server, welche die entsprechenden Lokationen abdecken. Im zweiten Schritt werden Nachrichten an die Zugangsnetze im Zielgebiet durch Nachrichten an die ermittelten UDP-Adressen vermittelt. Entsprechend des verwendeten Vermittlungsverfahrens auf der Transportschicht können zwei Varianten des verzeichnisbasierten Ansatzes unterschieden werden, nämlich verzeichnisbasierte Ansätze mit *Unicast-basierte Vermittlung* und mit *Multicast-basierte Vermittlung*. Diese Ansätze werden im Detail im Folgenden beschrieben.

3.5.1 Unicast-basierte Vermittlung

Eine einfache Lösung für die Zustellung von Geocast-Nachrichten basiert auf einem Verzeichnis, das die geographischen Abdeckungen der beteiligten Zugangsnetze sowie die UDP-Adressen der jeweils für die entsprechenden Zugangsnetze zuständigen Message-Server enthält. Im Detail bildet das Verzeichnis symbolische Adressen, die potentielle Zielgebiete definieren, auf die UDP-Adressen der entsprechenden Geocast-Message-Server ab, deren Dienstgebiete das entsprechende Zielgebiet schneiden – an diesen

Message-Servern sind potentielle Empfänger (Geocast-Hosts) im Zielgebiet registriert, die sich in den jeweiligen Zugangsnetzen aufhalten.

Nach diesem ersten Schritt der Ermittlung der UDP-Adressen der zuständigen Message-Server, wird in einem zweiten Schritt die Nachricht an diese Message-Server vermittelt. Hierzu ist bei diesem Ansatz keine dedizierte Geocast-Vermittlungsinfrastruktur notwendig, das heißt, die Geocast-Router-Komponente ist bei diesem Ansatz nicht vorhanden, und das System besteht nur aus Geocast-Applikationen, -Hosts und -Message-Servern. Durch den Wegfall der Geocast-Router vereinfacht sich der in Abschnitt 3.3.1.3 beschriebene Vermittlungsablauf. Anstatt die zu vermittelnde Nachricht in Schritt 2 über die Geocast-Router-Infrastruktur an die Message-Server im Zielgebiet zu vermitteln, erfolgt nun eine Vermittlung mittels der UDP/IP-Infrastruktur. Das heißt, der Message-Server im Zugangsnetz des Senders sendet die Nachricht direkt mittels UDP an die ermittelten Message-Server im Zielgebiet. Im einfachsten Fall werden Nachrichten mittels IP-Unicast vermittelt, das heißt, pro Message-Server im Zielgebiet wird eine Nachrichtenkopie vom Message-Server des Senders an die jeweiligen Message-Server der Empfänger gesendet; der nächste Abschnitt beschreibt außerdem die Verwendung von IP-Multicast für die Vermittlung.

Offensichtlich hat dieser Ansatz den wesentlichen Vorteil, kein gesonderte Infrastruktur für den Transport von Nachrichten zu benötigen. Somit reduziert sich der Aufwand für die Einrichtung des Geocast-Systems. Hierdurch verlagert sich allerdings ein wesentlicher Teil der Komplexität vom Transport der Nachricht in den Verzeichnisdienst zur Feststellung der Empfängeradressen. An diesen Dienst werden vor allem bei einem global eingesetzten Geocast-Dienst mit großer Nutzerzahl und hohem Nachrichtenaufkommen hohe Anforderungen bezüglich Leistungsfähigkeit und Skalierbarkeit gestellt. Für ein weltweit einsetzbares Geocast-System muss das Verzeichnis eine große Anzahl an symbolischen Lokationen und Abbildungen auf die entsprechenden Message-Server verwalten, angefangen von vergleichsweise großen Funkzellen eines Mobilfunksystems bis hin zu zahllosen lokalen Netzen beispielsweise auf WLAN-Basis.

Um einen hoch skalierbaren Verzeichnisdienst für die Verwaltung von potentiell Millionen von Teilnehmern zu erhalten, ist die verteilte Realisierung dieses Dienstes zweckmäßig. Innerhalb dieser Arbeit wird nicht näher auf die Realisierung eines solchen Dienstes eingegangen. Vielmehr werden bereits in der Literatur verteilte Dienste zur Verwaltung allgemeiner räumlicher Objekte beschrieben (siehe Abschnitt 3.2.2.4). Im Folgenden soll exemplarisch der entsprechende Dienst des Nexus-Projekts an der Universität Stuttgart, in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist, betrachtet werden [NGSV01]. Das Nexus-Projekt entwirft Konzepte zur Realisierung eines Dienstes zur Verwaltung beliebiger räumlicher Objekte, das heißt, von physischen oder virtuellen Objekten mit räumlichen Positionen und Ausdehnungen. Im Wesentlichen können im Falle von Geocast Zugangsnetze als räumliche Objekte angesehen werden. Der Abdeckungsbereich des Zugangsnetzes entspricht dabei der räumlichen Ausdehnung des Objekts „Zugangsnetz“. Das Nexus-Modell verfolgt hierbei einen objektorientierten Modellierungsansatz, der es dem Modellierer ermöglicht, räumlichen Objekten Attribute zuzuordnen. Ein spezielles Attribut könnte der Message-Server des Zugangsnetzes einschließlich dessen UDP-Adresse sein. Durch die vom Nexus-System unterstützten räumlichen Bereichsanfragen

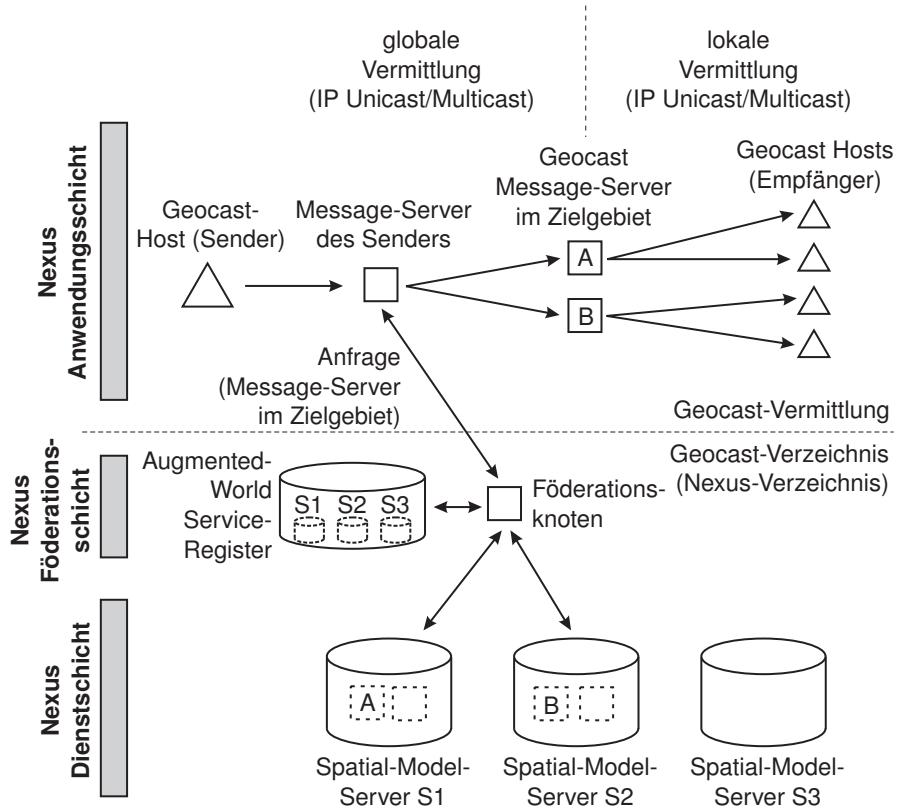


Abbildung 3.2: Integration des verzeichnisbasierten Geocast-Systems in die Nexus-Plattform zur Verwaltung räumlicher Informationen.

kann der Messager-Server des Senders somit die UDP-Adressen der Message-Server im Zielgebiet der Geocast-Nachricht ermitteln und im zweiten Schritt die Zustellung wie oben beschrieben mittels UDP durchführen.

Die notwendige Skalierbarkeit wird durch die Verteilung der Objekte auf verschiedene physische *Spatial-Model-Server* erzielt (siehe Abbildung 3.2). Jeder Server hat dabei ein bestimmtes räumliches Dienstgebiet. Das heißt, die Verteilung erfolgt entsprechend einer räumlichen Partitionierung. Spatial-Model-Server verwalten nur Objekte mit Positionen innerhalb ihres Dienstgebiets. In Falle von Geocast bedeutet das, die Zugangsnetze in einem gegebenen räumlichen Gebiet werden von bestimmten Spatial-Model-Servern verwaltet, deren Dienstgebiet das entsprechende Abdeckungsgebiet des Zugangsnetzes enthält.

Durch das Hinzufügen weiterer Server kann bei Bedarf die für die Verwaltung einer großen Menge an Message-Servern notwendige Kapazität des Systems erhöht werden. Für die Anwendungen ist die räumliche Verteilung durch die Verwendung einer Föderationsschicht transparent. Der Geocast-Host stellt die Anfrage nach den Message-Servern im Zielgebiet an einen beliebigen Föderationsknoten, ohne über die Verteilung der Daten Kenntnis zu haben; es ist Aufgabe der Föderationsschicht, die relevanten Spatial Model Server zu ermitteln, sie abzufragen und das Ergebnis an den Geocast-Host zurückzugeben.

ben.

Zunächst hat sich somit das gegebene Problem, der Ermittlung der relevanten Message-Server nur auf ein verwandtes Problem, nämlich die Ermittlung der relevanten Spatial-Model-Server, verlagert. In beiden Fällen muss eine räumliche Ausdehnung – Dienstgebiet der Spatial-Model-Server beziehungsweise Abdeckungsgebiet der Zugangsnetze – auf eine Menge von Servern – Spatial-Model-Server beziehungsweise Geocast-Message-Server – abgebildet werden. Zur Ermittlung der relevanten Spatial-Model-Server existiert im aktuellen Nexus-System eine dedizierte Komponente: Das *Augmented World Service Register (ASR)*. Hierbei handelt es sich um ein Verzeichnis, das die Dienstgebiete der Spatial-Model-Server auf die Adressen dieser Server abbildet. In der aktuellen Realisierung des Nexus-Systems handelt es sich dabei um eine zentrale Komponente. Die durch die Verteilung resultierende Komplexität wurde somit zunächst weitestgehend ausgeklammert. Gerade hierbei handelt es sich aber um eine der Kernkomplexitäten des Geocast-Systems. Außerdem ist das ASR auf geometrische Koordinaten beschränkt und unterstützt keine symbolischen Lokationsinformationen.

Somit kann zusammenfassend gesagt werden, dass von der Problematik der Ermittlung der zuständigen Message-Server durch die Verwendung des Nexus-Systems zwar abstrahiert wurde, aber das zugrunde liegende Problem noch nicht endgültig gelöst ist. Diese notwendige Funktionalität soll in aktuellen Arbeiten des Nexus-Projekts durch den Entwurf eines so genannten *Kontext-Brokers* ergänzt werden. Die hierzu notwendigen Konzepte – beispielsweise die Verwendung eines räumlich strukturierter Overlay-Netzes und somit die verteilte Realisierung des Kontext-Brokers – können dabei aufgrund der teilweise ähnlichen Fragestellungen von den hier vorgeschlagenen Geocast-Vermittlungsansätzen profitieren. Anstatt an dieser Stelle ein geeignetes räumliches Verzeichnis zu erarbeiten, verweisen wir auf die folgenden Abschnitte, welche die Ermittlung der Message-Server und die Nachrichtenvermittlung *integriert* betrachten.

Aber selbst ein skalierbarer Verzeichnisdienst löst noch nicht ein weiteres Kernproblem, nämlich die effiziente Vermittlung von Nachrichten. Die explizite Adressierung der Message-Server und die entsprechende Nachrichtenweiterleitung durch mehrere Unicast-Nachrichten ruft eine erhöhte Netzlast hervor. Insbesondere die Adressierung großer und dicht mit Zugangsnetzen abgedeckter Gebiete und somit einer großen Anzahl an Message-Servern – pro Message-Server wird eine Unicast-Nachricht versendet – stellt daher mit diesem Ansatz ein wesentliches Problem dar. Dieses Problem steht im Fokus des folgenden Abschnitts, der eine effiziente Vermittlung mit Hilfe von Multicast-Protokollen realisiert.

3.5.2 Multicast-basierte Vermittlung

Dieser Ansatz ist eine Variante des im vorigen Abschnitt vorgestellten verzeichnisbasierten Ansatzes. Anstatt die Message-Server eines bestimmten Zielgebiets durch mehrere Unicast-Nachrichten zu adressieren, wird für die Zustellung von Nachrichten an Message-Server ein IP-Multicast-Vermittlungsprotokoll verwendet.

Hierdurch wird dem Hauptproblem der Unicast-basierten Vermittlung begegnet, nämlich der ineffizienten Nachrichtenvermittlung durch redundante Nachrichtenkopien

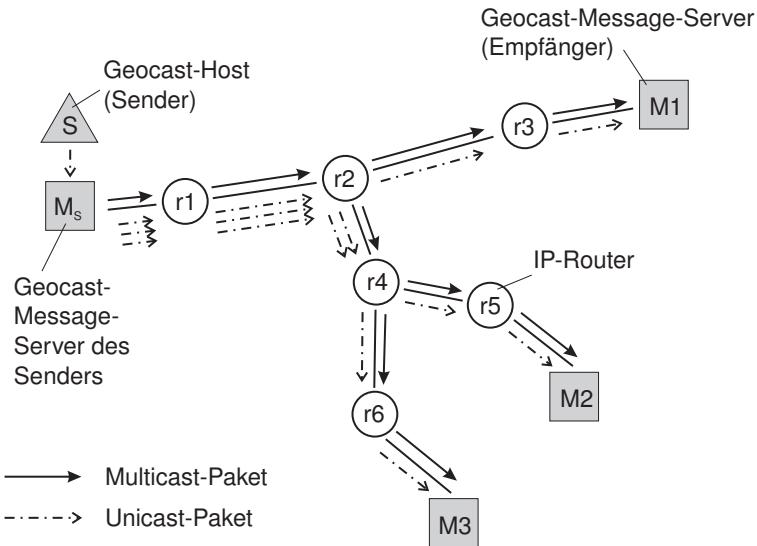


Abbildung 3.3: Paketanzahl bei Unicast-basierter und Multicast-basierter Vermittlung

auf physischen Verbindungen zwischen Routern. Durch das Versenden von Nachrichten mittels Unicast müssen unter Umständen mehrere Nachrichtenkopien derselben Nachricht über einzelne physische Verbindungen übermittelt werden, da auf der Vermittlungsschicht Pakete derselben Geocast-Nachricht nicht unterschieden werden können (vgl. Abbildung 3.3). Die Verwendung von IP-Multicast für die Nachrichtenvermittlung erfüllt dagegen die Forderung nach einer effizienten Vermittlung, da auf den physischen Verbindungen zwischen IP-Routern keine redundanten Pakete versendet werden (vgl. Abbildung 3.3).

3.5.2.1 Probleme der Multicast-basierten Vermittlung

Theoretisch kommt für die Vermittlung von Geocast-Nachrichten jedes IP-Multicast-Protokoll in Frage, beispielsweise Multicast Open Shortest Path First (MOSPF) [Moy94], das Distance Vector Multicast Routing Protokoll (DVMRP) [WPD98], Protocol Independent Multicast (PIM) [FHHK06, ANS05] oder Core-based Trees [Bal97a, Bal97b] (vgl. Abschnitt 3.2.2.1). Allerdings ist der Einsatz eines solchen Multicast-Protokolls für die Vermittlung von Geocast-Nachrichten nicht unproblematisch, wie im Folgenden diskutiert werden soll.

Um mit Hilfe eines dieser IP-basierten Multicast-Protokolls eine Vermittlung von Geocast-Nachrichten vornehmen zu können, muss zunächst jeder symbolischen Lokation eine Multicast-Gruppe (Klasse D IP-Adresse) zugeordnet werden. Hierfür ist zunächst eine große Anzahl von Multicast-Adressen notwendig, die für Geocast reserviert werden müssen, um jeder Lokation, weltweit eine eindeutige Gruppe zuzuordnen. Die durchgängige Verfügbarkeit von IPv6 wäre hierfür eine zwingende Voraussetzung. Die Installation von IPv6 geht in der Praxis zwar nur schleppend voran; trotzdem ist damit zu rechnen, dass eine entsprechende IPv6-Infrastruktur mittelfristig zur Verfügung stehen wird.

Schwerer wiegt daher das Problem der Verwaltung einer großen Menge von Multicast-Gruppen durch die Multicast-Router. Dieses allgemeine Problem äußert sich in unterschiedlichen Formen für die verschiedenen konkreten Multicast-Verfahren. So müssen beispielsweise Shared-Tree-Protokolle wie CBT [Bal97a, Bal97b] oder PIM-SM [FHHK06] eine entsprechend große Anzahl von Kern-Routern bzw. Rendezvous-Routern vorhalten und im Netz bekannt machen. Auf Reverse-Path-Forwarding/Broadcast basierende Verfahren wie DVMRP [WPD98] oder PIM-DM [ANS05] erzeugen durch das zyklische Fluten des Netzes für jede Gruppe einen hohen Kommunikationsaufwand. Bei Link-State-Multicast (MOSPF [Moy94]) müssen Gruppenzugehörigkeiten jedem Router innerhalb eines Gebiets bekanntgemacht werden, wofür entsprechende LSA-Pakete im Netz geflutet werden. Allen Protokollen gemein ist das Problem anwachsender Vermittlungstabellen. Aufgrund der flachen Struktur von IP-Multicast-Adressen muss für jede aktive Gruppe ein separater Eintrag angelegt werden. Bei quellspezifischen Protokollen sind diese Einträge zusätzlich individuell für jeden Sender, mit einer entsprechenden Steigerung der Anzahl der Einträge.

Die Einführung hierarchischer Multicast-Adressen, wie beispielsweise in [IN96b] vorgeschlagen würde eine Modifikation der bestehenden Multicast-Protokolle bedeuten und widerspricht somit den gestellten Anforderungen, die unterlagerten IP-Protokolle nicht zu verändern. Außerdem lösen hierarchische Gruppenadressen das Problem nur teilweise. So könnte ein Router beispielsweise mit Hilfe hierarchischer Gruppen die Vermittlungstabelleneinträge $g_1 \rightarrow N_1$ bzw. $g_2 \rightarrow N_2$ zweier Gruppen g_1 und g_2 zusammenfassen (aggregieren), wenn der Router Nachrichten an diese Gruppen jeweils an dieselben Menge von Nachbarn $N_1 = N_2$ weiterleitet. Ändert sich allerdings die Menge einer Gruppe und gilt somit $N_1 \neq N_2$, dann muss der aggregierte Eintrag wieder in individuelle Einträge aufgeteilt (deaggregiert) werden. Hierfür muss der Router die ursprünglichen Informationen jeder Gruppe speichern, so dass insgesamt keine Verringerung des Speicherbedarfs gegeben ist – d.h. es lassen sich zwar die Zustandsinformation in den Vermittlungstabellen reduzieren, nicht aber gleichzeitig die notwendigen Kontrollinformationen.

Aufgrund dieser Probleme schlagen wir im folgenden Abschnitt die Verwendung eines alternativen Multicast-Verfahrens vor, das keine Abbildung auf Multicast-Gruppenadressen voraussetzt und somit die geschilderten Probleme vermeidet.

3.5.2.2 Geocast-Nachrichtenvermittlung mit Explizitem Multicast

Die im vorigen Abschnitt beschriebenen IP-Multicast-Protokolle ermöglichen einen effizienten Nachrichtenvermittlung auch an größere Empfängergruppen, sind aber aufgrund der geschilderten Nachteile nicht auf eine große Anzahl von Multicast-Gruppen ausgelegt, wie sie für die Abbildung einer großen Menge an Lokationen notwendig wären. So genanntes *explizites Multicast* [BFI⁺01, BC05, STE00] – im Folgenden kurz als Xcast bezeichnet – adressiert dagegen genau solche Szenarien mit einer großen Anzahl an Multicast-Gruppen. Im Folgenden wird daher die Verwendung von explizitem Multicast zur Realisierung des verzeichnisbasierten Ansatzes betrachtet.

Erstellung der Verteilbäume und Nachrichtenvermittlung

Xcast adressiert die Empfänger einer Multicast-Gruppe unter Verwendung der Unicast-Adressen der Empfänger, das heißt, anstatt Empfänger *implizit* über die IP-Multicast-Adressen ihre Gruppen zu adressieren, werden sie nun *explizit* durch ihre IP-Unicast-Adresse adressiert. Im Gegensatz zur reinen Unicast-Kommunikation, bei der mehrere individuelle Pakete an jeden einzelnen Empfänger geschickt werden, werden allerdings redundante Pakete vermieden, indem nur ein Paket pro Gruppe verschickt wird, das die IP-Unicast-Adressen aller Empfänger enthält – Xcast wird daher teilweise auch als Multi-Unicast bezeichnet [BFI⁺01]. Multicast-Router leiten daher über jede Verbindung nur maximal *ein* Paket weiter, nämlich genau dann, wenn sich in der entsprechenden Richtung Empfänger befindet. Weiterleitungsentscheidungen werden aufgrund der IP-Unicast-Adressen der Empfänger und der lokalen Unicast-Vermittlungstabellen getroffen.

Die Vermittlung einer Geocast-Nachricht soll im Folgenden anhand eines Beispiels dargestellt werden (vgl. Abbildung 3.4). Zunächst müssen hierfür mit Hilfe des oben eingeführten Verzeichnisses die Unicast-IP-Adressen der Geocast-Message-Server im Zielgebiet ermittelt werden. Im Beispiel soll die Nachricht an die Server M_1 , M_2 , M_3 im Zielgebiet gesendet werden. Für die Xcast-Vermittlung werden die IP-Adressen, bezeichnet durch A_1 , A_2 , A_3 , dieser drei Message-Server durch den Message-Server auf der Senderseite in den Kopf der Xcast-Nachricht eingefügt, und die Nachricht wird an einen beliebigen – im Allgemeinen den lokalen – Xcast-Router übergeben (im Beispiel Router R_1). Jeder Xcast-Router inspiziert nun die Liste der Empfängeradressen und bestimmt mit Hilfe seiner IP-Unicast-Vermittlungstabelle die nächsten Router auf dem Weg zu den adressierten Message-Servern; eine separate Multicast-Vermittlungstabelle ist nicht notwendig! Hierbei kann zwischen Routern unterschieden werden, welche die Nachricht nur an einen Router weiterleiten und solchen, welche die Nachricht an mehrere weiterleiten. Letztere stellen *Verzweigungs-Router* (engl. *branching router*) dar. Ein Verzweigungs-Router partitioniert die Adressliste entsprechend der Empfängerteilmenge, die über den entsprechenden Zweig im Verteilbaum erreichbar ist. So leitet im Beispiel Router R_2 die Nachricht an R_4 mit der Adressliste A_2 , A_3 weiter, da die entsprechenden Message-Server über diesen Router erreichbar sind, während M_1 über Router R_3 erreichbar ist.

Da Xcast die Empfängermenge explizit adressiert, werden keine Multicast-Gruppenadressen benötigt. Alle damit verbundenen Probleme entfallen somit, insbesondere die Problematik der globalen Zuteilung und Verwaltung von eigenständigen Multicast-Gruppenadressen und ein unter Umständen beschränkter Adressraum. Ein Verzeichnis wird allerdings weiterhin benötigt, um die Zielgebietsadresse auf die Menge der Geocast-Message-Server im Zielgebiet und deren IP-Unicast-Adressen abzubilden.

Ebenso werden Multicast-Router nun von der unter Umständen aufwendigen Verwaltung von Multicast-Gruppen entbunden. Zur Vermittlung ist die bereits vorhandene Unicast-Vermittlungstabellen ausreichend.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, Xcast inkrementell in die Vermittlungsinfrastruktur zu integrieren. Selbst wenn nur ein Teil der IP-Router oder gar nur die Geocast-Message-Server selbst Xcast implementieren, können Nachrichten weitergeleitet werden, wenn auch unter Umständen mit geringerer Effizienz. Vereinfacht beschrieben wird hier-

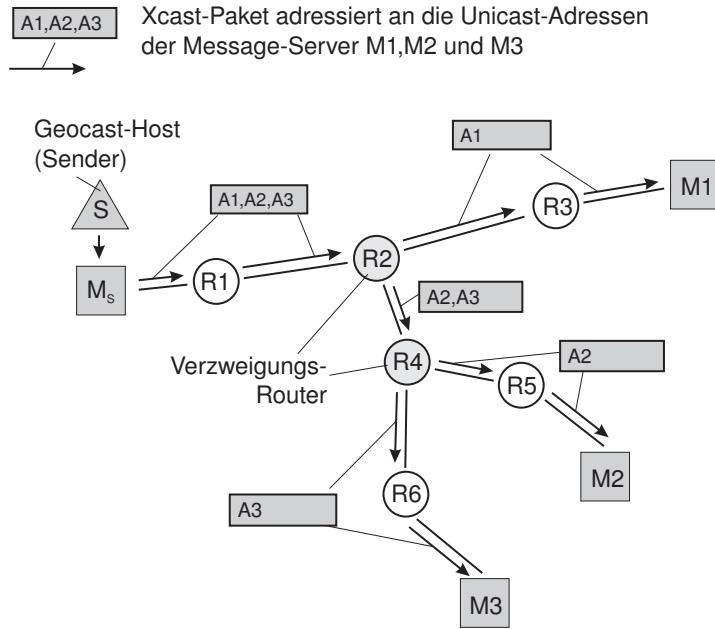


Abbildung 3.4: Explizite Multicast-Vermittlung einer Gecast-Nachricht an eine Menge von Message-Servers.

zu einer der Message-Server-IP-Adresse in das Empfängerfeld des IP-Kopfes des weiterzuleitenden Pakets aufgenommen. Die IP-Adressen aller adressierten Message-Server werden außerdem als optionaler Teil des IP-Kopfes in jedes Paket aufgenommen. Diese Xcast-IP-Option wird von allen Xcast-fähigen Routern einschließlich der Message-Server interpretiert. Diese führen eine Partitionierung der Empfängermenge und eine Weiterleitung wie oben beschrieben durch. Alle anderen nicht Xcast-fähigen Router leiten die Nachricht rein auf Grundlage der einzelnen IP-Adresse im Empfängerfeld des IP-Kopfes weiter. Da zumindest die Geocast-Message-Server Xcast implementieren, können spätestens die Message-Server eine Weiterleitung an die noch verbleibenden Message-Server anstoßen. Im Extremfall wenn nur die Message-Server Xcast implementieren, entartet die Weiterleitung zu einer linearen Kette, bei der die Nachrichten mittels Unicast von Message-Server zu Message-Server weitergeleitet werden. Abbildung 3.5 zeigt ein Beispiel mit nur einem Xcast-fähigen Router (R₄). In diesem Beispiel führen nur R₄ und der Message-Server M₁ Verzweigungen durch. Die restlichen Router leiten die Nachricht an die einzelne Unicast-IP-Adresse im IP-Kopf der Nachricht weiter.

Als ein wesentlicher Nachteil von Xcast ist das Problem der Adressierung großer Empfängergruppen aufgrund der expliziten Empfängeradressenkodierung in jedem IP-Paket zu nennen – erweiterte Verfahren wie [STE00, BC05] reduzieren zwar die Anzahl der Adressen pro Paket, indem sie nur die Adressen der Verzweigungs-Router auflisten, müssen dazu aber zunächst den Verteilbaum ermitteln. Außerdem verbleibt für jeden verzeichnisbasierten Ansatz das Problem der Message-Server-Ermittlung vor dem eigentlichen Vermitteln der Nachrichten. Hierfür ist ein skalierbares Verzeichnis notwendig.

Anstatt den Geocast-Vermittlungsprozess durch ein zweischrittiges Verfahren (ge-

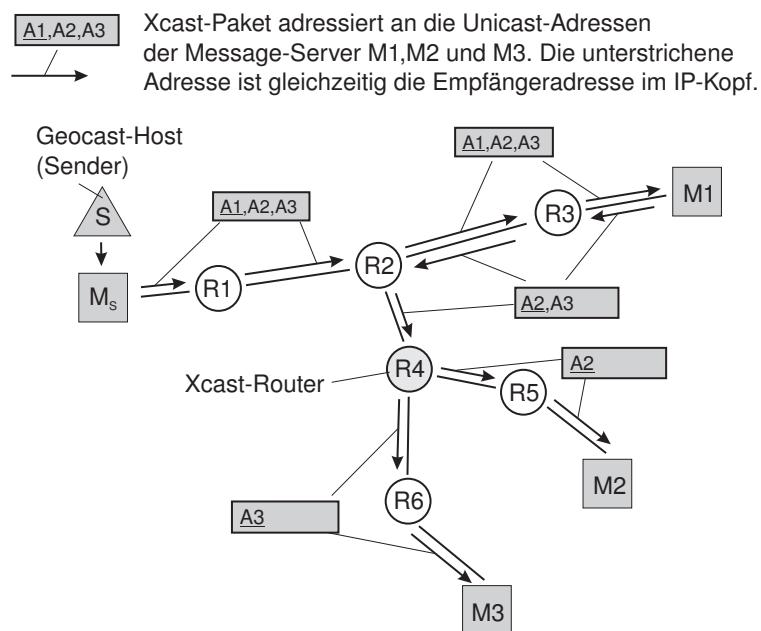


Abbildung 3.5: Xcast-basierte Vermittlung mit nur einem Xcast-fähigen Router (R_4).

trennte Empfängerermittlung und Nachrichtenvermittlung) zu realisieren, werden im Folgenden Verfahren betrachtet, die beide Schritte integrieren. Hierzu werden spezielle Geocast-Overlay-Netze entworfen, die sowohl die Ermittlung der relevanten Message-Server als auch die effiziente Nachrichtenvermittlung implementieren und Nachrichten direkt anhand der adressierten Lokation weiterleiten können.

3.6 Vermittlung in vermaschten Overlay-Netzen

In diesem und dem folgenden Abschnitt werden Geocast-Vermittlungsverfahren für symbolisch adressierte Nachrichten basierend auf speziellen Overlay-Netzstrukturen beschrieben. Die Grundidee ist die Verwendung eines der Internet-Infrastruktur überlagerten und anhand von Lokationsinformationen strukturierten Overlay-Netzes, das somit in der Lage ist, Weiterleitungsentscheidungen auf Grundlage von Lokationsinformationen zu treffen, anstatt für die Vermittlung herkömmliche (IP-basierte) Vermittlungsprotokolle wie im vorigen Abschnitt beschrieben einzusetzen.

Verwandte Arbeiten beschreiben bereits diverse Vermittlungsverfahren für geometrisch adressierte Geocast-Nachrichten (vgl. Abschnitt 3.2.2), basierend entweder auf Overlay-Vermittlungsnetzen oder Modifikationen der Vermittlungsprotokolle der Vermittlungsschicht und somit der IP-Infrastruktur. Anstatt für symbolisch adressierte Nachrichten eigene Overlay-Netze einzurichten, wäre es ein denkbarer Ansatz, symbolische Lokationen zunächst auf geometrische Figuren abzubilden, und dann eines dieser geometrischen Geocast-Vermittlungsprotokolle zu verwenden. Für eine Vermittlung rein symbolischer Nachrichten ist dieser Ansatz allerdings nicht attraktiv. Zum einen wäre

wiederum ein Verzeichnis notwendig, das durch Verwendung eines hybriden Lokationsmodells die Abbildung von symbolischen auf geometrische Lokationen ermöglicht. Allerdings ist die Erstellung eines solchen hybriden Modells, das sowohl geometrische als auch symbolische Informationen enthält, vor allem für die feingranulare ortsbasierte Adressierung ein Problem, da jede symbolisch adressierbare Lokation des Modells mit geometrischen Koordinaten versehen werden müsste. Insbesondere im Innenraumbereich erfordert dies einen hohen Modellierungsaufwand, da hier im Allgemeinen 3D- oder zumindest 2,5D-Modelle verwendet werden müssten, um zum Beispiel zwischen verschiedenen Stockwerken unterscheiden zu können. Ein rein symbolisches Modell hingegen kann vergleichsweise einfach erstellt werden.

Des Weiteren ist für die Verwaltung eines weltweiten hybriden Modells ein sehr leistungsfähiger und skalierbarer Verzeichnisdienst erforderlich. Somit würde sich wie bereits bei den verzeichnisbasierten Ansätzen des vorigen Abschnitts ein wesentlicher Teil der Komplexität von der Overlay-Netz-Infrastruktur für die integrierte Empfängerermittlung und Nachrichtenvermittlung in die effiziente Realisierung des Verzeichnisdienstes verschieben.

Schließlich ist die Weiterleitung auf Grundlage geometrischer Koordinaten aufgrund der Komplexität geometrischer Operationen ein weiterer Nachteil dieses Ansatzes. Um Weiterleitungsentscheidungen zu treffen, müssten nun geometrische Zielgebiet und Abdeckungsgebiete von Geocast-Message-Servern mit Hilfe geometrischer Operationen, zum Beispiel durch Polygonverschneidungen, verglichen werden. Im Vergleich zu Operationen auf symbolischen Koordinaten – zum Beispiel Präfixvergleiche symbolischer Adressen – sind diese geometrischen Operationen als komplex anzusehen. Geocast-Router, die auf geometrischen Koordinaten operieren, können somit leichter überlastet werden als Router, die Weiterleitungsentscheidungen auf Grundlage von symbolischen Lokationen treffen.

Aufgrund dieser Nachteile stellt sich daher die Frage, wie Overlay-Netz-basierte Geocast-Vermittlungsverfahren aussehen, die keinerlei geometrische Information benötigen. Entsprechenden Ansätzen widmet sich dieser Abschnitt. Die im Folgenden beschriebene Geocast-Overlay-Netze sind für die Vermittlung von rein symbolisch adressierten Nachrichten ohne jegliche Geometrieinformation geeignet. Ein solches Geocast-Overlay-Netz integriert zwei Funktionalitäten: Zum einen dient es der Ermittlung der Geocast-Message-Server im Zielgebiet. Zum anderen dient es der Vermittlung von Nachrichten an diese Server. Im Gegensatz zu den verzeichnisbasierten Ansätzen, welche diese Funktionalitäten strikt voneinander trennen und nacheinander ausführen, werden beide Schritte nun im Overlay-Netz integriert implementiert. Erreicht wird dies durch ein Overlay-Netz, das die Vermittlung direkt auf symbolischen Lokationen vornimmt, anstatt zunächst eine Übersetzung von symbolischen Lokationen in Adressen der Vermittlungsschicht vorzunehmen.

Diese *ortsbezogene Vermittlung auf symbolischen Lokationen* ähnelt vom Prinzip somit der Vermittlung auf geometrischen Figuren, wie sie in verwandten Arbeiten beschrieben wird. Allerdings unterscheidet sich das Vermittlungsverfahren aufgrund der grundsätzlich unterschiedlichen Ortsinformationen wesentlich von der geometrischen Vermittlung und erfordert speziell angepasste Overlay-Netzstrukturen, die vom zugrund-

de liegenden Lokationsmodell beeinflusst werden. In dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche Overlay-Netz-Strukturen vorgestellt: In diesem Abschnitt ein vermaschtes Overlay-Netz für baumförmige Lokationsmodelle und in Abschnitt 3.7 ein verbandsbasiertes Overlay-Netz für symbolische Lokationsmodelle basierend auf einem mathematischen Verband.

3.6.1 Basis-Overlay-Netz

Das vermaschte Overlay-Netz für baumförmige Lokationsmodelle wird durch eine Menge von speziellen Geocast-Routern gebildet, die jeweils für die Nachrichtenweiterleitung an bestimmte geographische Gebiete verantwortlich sind. Die Netztopologie besteht aus einer baumförmigen Basistopologie, die durch zusätzliche Verbindungen zu einem vermaschten Netz ausgebaut und somit hinsichtlich ihrer Effizienz optimiert wird.

In diesem Abschnitt wird zunächst die baumförmige Basistopologie sowie ihre Verwaltung beschrieben [DR06].

3.6.1.1 Physische und virtuelle Geocast-Router

Bevor die Netztopologie näher beschrieben wird, werden hier zunächst zwei Klassen von Geocast-Routern eingeführt: virtuelle und physischen Geocast-Router. Diese Unterscheidung wird im weiteren Verlauf der Arbeit eine einfachere Beschreibung auf Grundlage der logischen Netzstruktur ermöglichen.

Ein *virtueller Geocast-Router*, bezeichnet durch r , ist eine logische Vermittlungsinstanz, welche für die Weiterleitung von Nachrichten an genau eine Lokation $l \in L$ des symbolischen Lokationsmodells bestehend aus einer Menge L an Lokationen (vgl. Abschnitt 2.4.2) verantwortlich ist. Formal ordnet die Funktion $s : R \rightarrow L$ jedem virtuellen Router aus der Gesamtmenge R der virtuellen Router genau eine Lokation, sein so genanntes *Dienstgebiet*, zu. s ist dabei eine Bijektion, das heißt, einerseits ist die Abbildung eindeutig:

$$\forall r_1 \in R \forall r_2 \in R : s(r_1) = s(r_2) \Rightarrow r_1 = r_2 \quad (3.1)$$

Umgekehrt wird jeder Lokation ein virtueller Router zugeordnet:

$$\forall l \in L \exists r \in R : s(r) = l \quad (3.2)$$

Aufgrund des angestrebten feingranularen Lokationsmodells mit seiner großen Anzahl an modellierten Lokationen ist es allerdings unrealistisch anzunehmen, dass alle virtuellen Geocast-Router auf separaten physischen Maschinen ausgeführt werden. Es wird daher der Begriff des *physischen Geocast-Router* eingeführt, definiert als eine Menge von virtuellen Geocast-Routern, die auf derselben physischen Maschine ausgeführt werden. Anders ausgedrückt kann ein physischer Geocast-Router verantwortlich für die Weiterleitung von Nachrichten an verschiedene Lokationen sein und hierfür mehrere virtuelle Geocast-Router implementieren. Formal beschreibt die Relation $\mathcal{M} \subset \tilde{R} \times R$ die Zuordnung von physischen zu virtuellen Routern. \tilde{R} bezeichnet die Gesamtmenge der physischen Router; \tilde{r} bezeichnet einen physischen Router aus \tilde{R} . Um Nachrichten an alle Loka-

tionen weiterleiten zu können, muss sichergestellt sein, dass die Gesamtmenge der physischen Router für jede symbolische Lokation $l \in L$ einen virtuellen Router implementiert. Das heißt, \mathcal{M} ist surjektiv, und es gilt somit:

$$\forall r \in R \exists \tilde{r} \in \tilde{R} : (\tilde{r}, r) \in \mathcal{M} \quad (3.3)$$

\tilde{r} ist der *designierte Router* der Lokation $s(r) = l$, genau dann wenn $(\tilde{r}, r) \in \mathcal{M}$ gilt.

Aufgrund der großen Menge an Lokationen ist eine durchgängig manuelle und explizite Zuordnung von virtuellen zu physischen Routern für eine praktische Umsetzung zu aufwendig. Vielmehr gehen wird davon aus, dass der Betreiber des Systems zunächst nur für bestimmte Lokationen jeweils *explizit* einen physischen Router \tilde{r} aufsetzt und diesem manuell genau eine symbolische Lokation l des Lokationsmodells als Dienstgebiet $s(\tilde{r}) = l$ zuordnet. Im Allgemeinen wird durch diese manuelle Zuordnung noch nicht die in Gleichung 3.3 geforderte Eigenschaft erfüllt, dass jeder virtuelle Router durch einen physischen Router implementiert werden muss. Werden insgesamt n physische Router aufgesetzt, so gilt daher im Allgemeinen:

$$\bigcup_{i=1}^n s(\tilde{r}_i) \subseteq L \quad (3.4)$$

Diese physischen Router implementieren *implizit* für die verbleibenden nicht zugeordneten Lokationen virtuelle Router, so dass diese Forderung der vollständigen Zuordnung erfüllt wird. Wurden beispielsweise durch den Betreiber nur für Länder und Städte explizit physische Router konfiguriert, so implementieren diese implizit virtuelle Geocast-Router für Stadtteile, Gebäude, Stockwerke, usw. Hierfür wird die oben eingeführte Relation \mathcal{M} zur Zuordnung von virtuellen zu physischen Routern wie folgt definiert:

$$(\tilde{r}, r) \in \mathcal{M} \Leftrightarrow \exists \tilde{r}' \in \tilde{R} : s(r) \leq s(\tilde{r}') < s(\tilde{r}) \quad (3.5)$$

Informell ausgedrückt bedeutet dies, dass jeder physische Router zunächst der designierte Router der (explizit) zugeordneten Lokation $s(\tilde{r})$ ist. Außerdem ist er (implizit) der designierte Router der Nachfahren von $s(\tilde{r})$ in der Lokationshierarchie, so lange kein anderer physischer Router mit einem kleineren Dienstgebiet innerhalb seines eigenen Dienstgebiets dieser Lokation (explizit oder implizit) zugeordnet wurde. Ein physischer Stadt-Router hat beispielsweise gleichzeitig die Rolle eines virtuellen Gebäude-Routers eines Gebäudes in dieser Stadt, so lange kein eigenständiger physischer Gebäude-Router für diesen Gebäude oder Stadtteil-Router für den Stadtteil, in dem sich das Gebäude befindet, installiert wurden. Abbildung 3.6 veranschaulicht dieses Prinzip.

Für eine einfachere Beschreibung bezeichnet der allgemeine Begriff „Geocast-Router“ im Folgenden einen virtuellen Router, wenn nicht ausdrücklich anders beschrieben.

3.6.1.2 Topologie des Basis-Overlay-Netzes

Für die Vermittlung von Geocast-Nachrichten werden Geocast-Router zu einem Netz verbunden. Da es sich hierbei um ein Overlay-Netz auf dem UDP/IP-basierten Netz handelt,

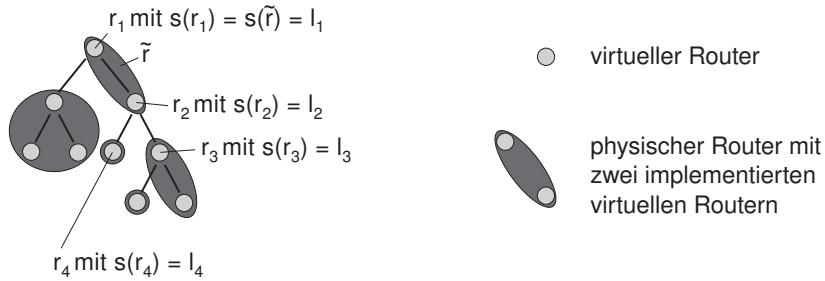


Abbildung 3.6: Virtuelle und physische Geocast-Router. Der physische Geocast-Router \tilde{r} implementiert zwei virtuelle Geocast-Router, r_1 und r_2 . Hierzu wird \tilde{r} explizit mit dem Dienstgebiet $s(\tilde{r}) = l_1$ konfiguriert. \tilde{r} ist dann ebenfalls designierter Router der Lokation $l_2 < s(\tilde{r}) = l_1$. \tilde{r} ist dagegen nicht designierter Router der Lokationen $l_3 < s(\tilde{r})$ und $l_4 < s(\tilde{r})$, da für diese Lokationen jeweils eigenständige physische Router konfiguriert wurden.

kann theoretisch jeder Geocast-Router mit jedem anderen kommunizieren. Praktisch hat ein solches vollvermaschtes Overlay-Netz allerdings den Nachteil, dass jeder Geocast-Router die Adresse und das Dienstgebiet jedes anderen Geocast-Routers kennen müsste, was besonders in großen Overlay-Netzen, wie sie für einen weltweiten Geocast-Dienst notwendig sind, einen hohen Aufwand zur Verwaltung des Overlay-Netzes selbst bedeuten würde. Daher sind nur bestimmte Geocast-Router im Overlay-Netz direkt miteinander verbunden, das heißt, ein Geocast-Router kennt nur die UDP-Adressen und Dienstgebiete einer Teilmenge aller installierten Geocast-Router. Diese Router bezeichnen wir als die *Nachbarn* des Routers. Bei der Wahl der Nachbarn muss gewährleistet sein, dass ein Nachrichtenpfad zu jedem potentiellen Zielgebiet existiert. Die im Folgenden beschriebene Topologie gewährleistet dies.

Wir unterscheiden wie bereits angedeutet zwischen dem Basis-Overlay-Netz und dem optimierten vermaschten Overlay-Netz. Das *Basis-Overlay-Netz* stellt bereits ein vollständig funktionsfähiges Geocast-Overlay-Netz dar. So ist insbesondere garantiert, dass zu jedem potentiellen Zielgebiet ein Pfad existiert. Durch das Hinzufügen weiterer *Direktverbindungen* (engl. *shortcut*) zwischen Geocast-Routern wird die Nachbarschaftsbeziehung erweitert und so die Basistopologie zu einem *vermaschten Overlay-Netz* ausgebaut, das einen effizienteren Vermittlungsprozess – insbesondere kürze Nachrichtenpfade – ermöglicht. Das Basisnetz wird hierbei benötigt, um diese optimierten Direktverbindungen einzurichten und zu verwalten. Man kann sich daher das Basisnetz als eine Art Rückgrat (engl. *backbone*) innerhalb des optimierten Netzes vorstellen. Das Basisnetz muss durch spezielle Mechanismen robust gegenüber Router- und Verbindungsaufläufen gehalten werden, um die Funktionsfähigkeit des Overlay-Netzes sicherzustellen. Die Robustheit der Direktverbindungen des optimierten Netzes ist dagegen nur für eine gesteigerte Effizienz notwendig. Wir beschreiben hier zunächst die Topologie und die Mechanismen des Basisnetzes für die Netzverwaltung und Nachrichtenvermittlung; das optimierte Overlay-Netz wird in Abschnitt 3.6.2 beschrieben.

Die grundlegende Topologie des Overlay-Netzes ist eine hierarchische Struktur entsprechend der räumlichen Inklusionsbeziehung zwischen den Dienstgebieten der vir-

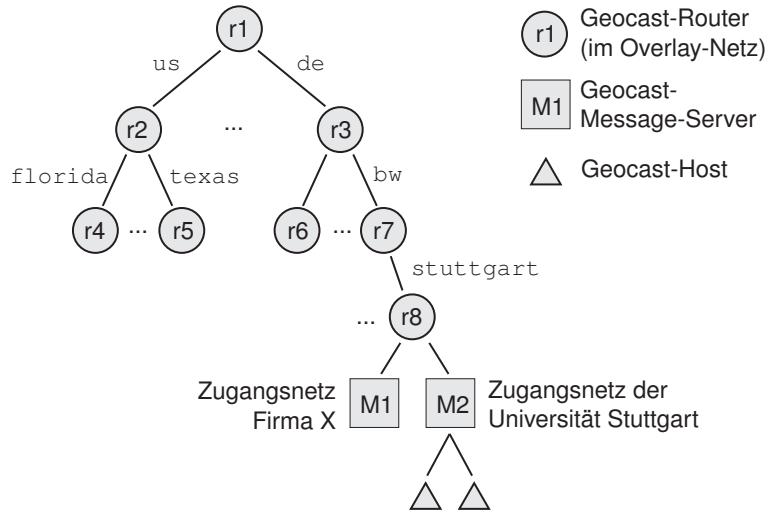


Abbildung 3.7: Ausschnitt aus einer beispielhaften Router-Hierarchie.

tuellen Geocast-Router. Hierdurch ergibt sich eine baumförmige Overlay-Netztopologie entsprechend des Lokationenbaums des Lokationsmodells, in der jeder virtuelle Router r direkte Verbindungen zu den folgenden virtuellen Routern der Menge $R_{\text{tree},r}$ besitzt:

$$R_{\text{tree},r} = \{r' \in R \mid s(r') = \text{parent}(s(r)) \vee s(r') \in \text{children}(s(r))\} \quad (3.6)$$

r besitzt also direkte Verbindungen zu den virtuellen Routern der Vater- und Kindlokationen seines Dienstgebiets. Eine direkte Verbindung ist dadurch charakterisiert, dass r den physischen Router – genauer seine UDP-Adresse – des entsprechenden virtuellen Routers kennt. Formal ausgedrückt kennt r eine Teilmenge \mathcal{M}_r der Relation \mathcal{M} , welche die Zuordnung von physischen zu virtuellen Routern definiert:

$$\mathcal{M}_r = \{(\tilde{r}', r') \in \mathcal{M} \mid r' \in R_{\text{tree},r}\} \quad (3.7)$$

Beispielsweise sind Länder-Router mit Bundesland-Routern verbunden, Bundesland-Router mit Stadt-Routern, usw. Abbildung 3.7 zeigt einen Ausschnitt aus einer beispielhaften Router-Hierarchie. Die weitergehende Optimierung dieser grundlegenden baumförmigen Struktur durch zusätzliche Verbindungen zwischen Routern ist Gegenstand der Abschnitte 3.6.2.1 und 3.6.2.2.

Geocast-Message-Server registrieren sich bei bestimmten Geocast-Routern des Overlay-Netzes, um diejenigen Nachrichten von diesen zu empfangen, deren Zielgebiete Teile der Abdeckungsgebiete der Message-Server enthält. Vereinfacht ausgedrückt registriert sich ein Message-Server hierfür bei den Geocast-Routern, deren Dienstgebiete das Abdeckungsgebiet des Message-Servers schneidet. Erreicht eine Nachricht einen Router, dessen Dienstgebiet im Zielgebiet der Nachricht liegt, so kann dieser die Nachricht an die bei ihm registrierten Message-Server weiterleiten. In Abschnitt 3.6.1.4 wird im Detail beschrieben, bei welchen Routern sich ein Message-Server zu registrieren hat, so dass eine effiziente Nachrichtenzustellung möglich wird.

3.6.1.3 Verwaltung des Basis-Overlay-Netzes

Das baumförmige Basis-Overlay-Netz stellt sicher, dass zwischen je zwei Lokationen ein Pfad existiert. Es wird neben der Nachrichtenauslieferung auch zur Einrichtung zusätzlicher direkt Verbindungen eingesetzt. Das baumförmige Basis-Overlay-Netz ist somit eine Art Backbone im vermaschten Overlay-Netz. Dieser Abschnitt widmet sich der Frage, wie dieses Basisnetz verwaltet werden kann. Wie schon oben beschrieben, wird davon ausgegangen, dass der Betreiber des Overlay-Netzes für bestimmte Lokationen physische Geocast-Router installiert. Hierbei ist davon auszugehen, dass die Menge der physischen Geocast-Router nicht unveränderlich ist. Vielmehr wird ein Betreiber das Overlay-Netz im Falle geänderter Anforderungen im Laufe der Zeit entsprechend anpassen wollen, insbesondere durch Hinzufügen von Geocast-Routern zu stark frequentierten Gebieten und unter Umständen auch durch Wegnahme von Routern in wenig adressierten Gebieten.

Um sicherzustellen, dass zwischen je zwei Lokationen ein Pfad existiert, muss die Overlay-Struktur beim Beitritt und Austritt einer physischen Routers, sei es fehlerbedingt oder geplant, aktualisiert werden. Als nächstes werden die hierfür notwendigen Mechanismen zur Verwaltung des Overlay-Netzes beschrieben.

Beitritt eines Geocast-Routers

Initial besteht das Overlay-Netz aus einem einzelnen physischen Geocast-Router, nämlich dem Router der Wurzellokation mit der symbolischen Dienstgebietsadresse „/“. Dieser physische Router implementiert zunächst virtuelle Router für alle Lokationen des Lokationsmodells.

Durch die Installation weiterer physischer Geocast-Router für bestimmte Gebiete durch den Betreiber wird das Overlay-Netz erweitert. Informell beschrieben tritt ein neuer physischer Geocast-Router, im Folgenden mit \tilde{r}_{new} bezeichnet, dem Overlay-Netz bei, indem er sich beim designierten Geocast-Router der Vaterlokation seines Dienstgebiets registriert. Der Vater-Router, der bis zum Beitritt von \tilde{r}_{new} auch der designierte Router des Dienstgebiets $s(\tilde{r}_{\text{new}}) = l$ des neuen Routers war, übergibt während des Registrierungsprozesses die Verantwortung für dieses Gebiet an \tilde{r}_{new} . Das heißt, \tilde{r}_{new} wird zum neuen designierten Router der Lokation l . Hierbei übergibt der Vater-Router auch implizit die Verantwortung für die Nachfolgelokationen von l an \tilde{r}_{new} , so er bisher ebenfalls der designierte Router dieser Lokationen war.

Im Einzelnen werden die folgenden Schritte beim Beitritt eines neuen physischen Geocast-Routers zum Overlay-Netz ausgeführt.

1. \tilde{r}_{new} sendet eine ParentRouterSolicited-Nachricht an einen beliebigen Geocast-Router, der bereits Teil des Overlay-Netzes ist (vgl. Abbildung 3.8(a), ①). Dieser initiale Router wird mit $\tilde{r}_{\text{bootstrap}}$ bezeichnet. Die ParentRouterSolicited-Nachricht enthält die UDP-Adresse von \tilde{r}_{new} sowie dessen symbolische Dienstgebietsadresse und ist mittels symbolischer Addressierung an den designierten Geocast-Router der Vaterlokation von \tilde{r}_{new} 's Dienstgebiet adressiert – die symbolische Adresse dieses Routers kann \tilde{r}_{new} einfach durch Weglassen der letzten Komponente seiner Dienstgebietsadresse ermitteln.

$\tilde{r}_{\text{bootstrap}}$ wird entweder manuell in der Konfiguration von \tilde{r}_{new} festgelegt. So kann beispielsweise angenommen werden, dass Länder-Router wohlbekannt sind.

Alternativ kann \tilde{r}_{new} durch Kommunikationsmechanismen wie Anycast (Adressierung eines, im Allgemeinen beliebigen, einzelnen Empfängers aus einer Empfängergruppe) oder eine expandierende Ringsuche (engl. expanding ring search) ermittelt werden. Zur Verwendung von *Anycast* treten alle Geocast-Router einer Anycast-Gruppe bei, an welche die ParentRouterSolicited-Nachricht geschickt wird. Der Anycast-Vermittlungsalgorithmus leitet diese Nachricht an genau einen, typischerweise den im IP-Netz topologisch nächstgelegenen Geocast-Router weiter.

Zur Verwendung einer *expandierenden Ringsuche* treten alle Geocast-Router einer bestimmten Multicast-Gruppe bei. \tilde{r}_{new} sendet die ParentRouterSolicited-Nachricht zunächst an alle Mitglieder dieser Gruppe, die direkt – das heißt, ohne Traversierung eines IP-Routers – erreichbar sind. Hierzu wird die Verbreitung von Multicast-Paketen durch entsprechendes Setzen des Time-to-Live-Werts (TTL) auf einen zunächst kleinen Suchradius begrenzt. Findet r_{new} kein solches Mitglied, so erweitert \tilde{r}_{new} den Suchradius sukzessive durch Inkrementieren des TTL, indem es Mitglieder der Gruppe sucht, die über einen, zwei, drei, usw. IP-Router erreichbar sind. \tilde{r}_{new} bricht die Suche ab, sobald (mindestens) ein Geocast-Router den Empfang der ParentRouterSolicited-Nachricht bestätigt hat.

Sowohl die Verwendung von Anycast als auch einer expandierenden Ringsuche setzen die Unterstützung dieser Mechanismen durch die unterlagerte IP-Netzinfrastruktur voraus. Es sind allerdings weitere Mechanismen ohne solche Modifikationen denkbar, beispielsweise die Verbreitung von Bootstrap-Knoten-Adressen über Web-Server mittels eines Kommunikationsprotokolls, das selbst nicht Teil des Geocast-Protokolls ist.

2. Im nächsten Schritt wird die ParentRouterSolicited-Nachricht mittels des in Abschnitt 3.6.1.4 beschriebenen geographischen Vermittlungsalgorithmus (Phase 1) an den Vater-Router von \tilde{r}_{new} weitergeleitet (Abbildung 3.8, ②). Dieser Vater-Router entspricht dem designierten Router der Vaterlokation von \tilde{r}_{new} 's Dienstgebiet.
3. Der Vater-Router, im Folgenden durch $\tilde{r}_{\text{parent}}$ bezeichnet, nimmt den neuen Router als Kind-Router auf, indem er folgenden Eintrag seiner Routing-Tabelle hinzufügt: $[s(\tilde{r}_{\text{new}}) \rightarrow \text{UDP Adresse von } \tilde{r}_{\text{new}}]$. $\tilde{r}_{\text{parent}}$ ist somit nicht mehr designierter Router der Lokation $s(\tilde{r}_{\text{new}})$ oder einer in der Lokationshierarchie darunter liegenden Lokation $l < s(\tilde{r}_{\text{new}})$. Aus Sicht der virtuellen Router-Hierarchie erzeugt der von $\tilde{r}_{\text{parent}}$ implementierte virtuelle Router r_{parent} mit dem Dienstgebiet $s(r_{\text{parent}}) = \text{parent}(s(\tilde{r}_{\text{new}}))$ einen (zunächst unidirektionalen) Link zum von \tilde{r}_{new} implementierten virtuellen Router r_{new} mit dem Dienstgebiet $s(r_{\text{new}}) = s(\tilde{r}_{\text{new}})$.
4. $\tilde{r}_{\text{parent}}$ sendet seine UDP-Adresse an \tilde{r}_{new} . (vgl. Abbildung 3.8(b), ③)
5. \tilde{r}_{new} nimmt r_{parent} als Vater-Router auf, indem er seiner Routing-Tabelle den Eintrag $[\text{parent}(s(r_{\text{new}})) \rightarrow \text{UDP-Adresse von } \tilde{r}_{\text{parent}}]$ hinzufügt. Aus Sicht von \tilde{r}_{new} ist $\tilde{r}_{\text{parent}}$

somit der neue designierte Router der Vaterlokation seines Dienstgebiets $s(\tilde{r}_{\text{new}})$. Aus Sicht der virtuellen Router-Hierarchie wird hierdurch der vormals unidirektionale Link zwischen \tilde{r}_{new} und $\tilde{r}_{\text{parent}}$ zu einem bidirektionalen Link erweitert. (vgl. Hierarchie in Abbildung 3.8(b))

Dieser Ablauf erzeugt nur die bidirektionale Vater-Kind-Verbindung zwischen dem neuen Router und seinem Vater-Router wie in Abbildung 3.8(b) dargestellt. Um eine konsistente virtuelle Router-Hierarchie zu erzeugen, müssen noch Verbindungen zwischen dem neuen Router und seinen Kind-Routern, die unter Umständen bereits dem Overlay-Netz vor dem neuen Router beigetreten sind, etabliert werden. Das bedeutet, wenn zum Zeitpunkt des Beitritts von \tilde{r}_{new} bereits ein physischer Router \tilde{r}_{child} mit $s(\tilde{r}_{\text{child}}) < s(\tilde{r}_{\text{new}}) < s(\tilde{r}_{\text{parent}})$ Teil des Overlay-Netzes ist, so muss die bisherige Verbindung zwischen $\tilde{r}_{\text{parent}}$ und \tilde{r}_{child} durch einen Verbindung zwischen \tilde{r}_{new} und \tilde{r}_{child} ersetzt werden. Beispielsweise könnte der physische Bundesland-Router von Baden-Württemberg dem Overlay-Netz nach dem physischen Stadt-Router von Stuttgart beitreten. Bis zum Beitritt des Baden-Württemberg-Routers übernimmt der physische Deutschland-Router wie oben beschrieben auch die Rolle des Baden-Württemberg-Routers, das heißt, der physische Deutschland-Router implementiert sowohl einen virtuellen Deutschland- als auch einen virtuellen Baden-Württemberg-Router, der eine Verbindung zum Stuttgart-Router besitzt. Nachdem der physische Baden-Württemberg-Router dem Overlay-Netz beitritt, muss daher die Verbindung zwischen dem physischen Deutschland- und Stuttgart-Router durch eine Verbindung zwischen dem physischen Baden-Württemberg- und Stuttgart-Router ersetzt werden.

Hierzu stellt der in Schritt 2 kontaktierte Vater-Router $\tilde{r}_{\text{parent}}$ beim Empfang der ParentRouterSolicited-Nachricht fest, ob sich bei ihm bereits ein Kind-Router \tilde{r}_{child} mit $s(\tilde{r}_{\text{child}}) < s(\tilde{r}_{\text{new}})$ registriert hat – Dienstgebiete und UDP-Adressen sind $\tilde{r}_{\text{parent}}$ durch den Registrierungsprozess bekannt. Ist dies der Fall, sendet $\tilde{r}_{\text{parent}}$ eine Parent-Router-Changed-Nachricht an \tilde{r}_{child} , welche die UDP-Adresse und symbolische Dienstgebietsadresse von \tilde{r}_{new} enthält (vgl. Abbildung 3.8(b), ④). Beim Empfang der Nachricht trägt \tilde{r}_{child} \tilde{r}_{new} als seinen neuen Vater-Router ein. \tilde{r}_{child} sendet außerdem seinerseits eine ParentRouterSolicited-Nachricht an \tilde{r}_{new} (Abbildung 3.8(b), ⑤) und etabliert nach Empfang der Antwort (Abbildung 3.8(b), ⑥) mit dem oben beschriebenen Verfahren eine bidirektionale Vater-Kind-Verbindung zwischen \tilde{r}_{new} und \tilde{r}_{child} . Die alte Verbindung zwischen $\tilde{r}_{\text{parent}}$ und \tilde{r}_{child} kann durch Löschen der entsprechenden Routing-Tabelleneinträge bei $\tilde{r}_{\text{parent}}$ und \tilde{r}_{child} entfernt werden. Aus Sicht der virtuellen Router-Hierarchie betrachtet, wird \tilde{r}_{new} designierter Router jeder Lokationen l mit $s(\tilde{r}_{\text{new}}) > l > s(\tilde{r}_{\text{child}})$. Bis zum Zeitpunkt des Beitritts von \tilde{r}_{new} wurde diese Rolle durch $\tilde{r}_{\text{parent}}$ übernommen. Die finale physische Router-Hierarchie ist in Abbildung 3.8(c) dargestellt.

Stabilisierung der Router-Hierarchie

Das oben beschriebene Protokoll zum Beitritt eines neuen Geocast-Routers führt bei sequentiellen Knotenbeitritten und unter der Annahme, dass keine Router das Overlay-Netz verlassen, zu einer korrekten Router-Hierarchie. Im praktischen Einsatz können Knoten allerdings das Overlay-Netz gewollt oder ungewollt verlassen, und parallele Knotenbei-

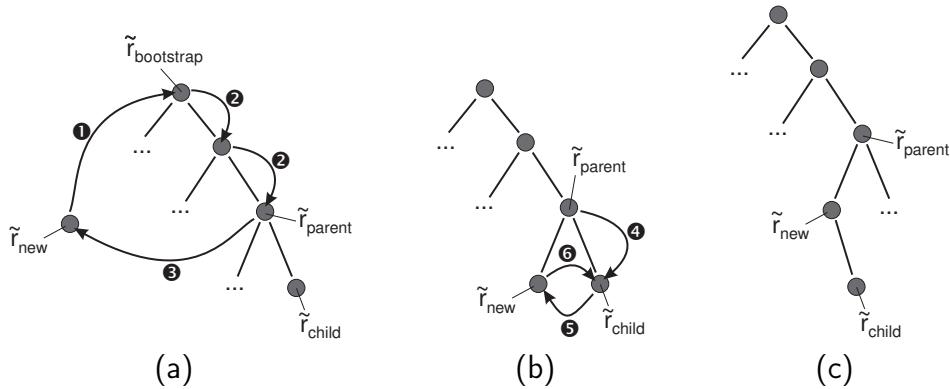


Abbildung 3.8: Aufnahme eines neuen Geocast-Routers in das hierarchische Geocast-Overlay-Netz. (Dargestellt sind in diesem Beispiel nur die physischen Router, die selbst wieder mehrere virtuelle Router implementieren können.)

ritte können nicht ausgeschlossen werden. Da eine korrekte Router-Hierarchie von essentieller Bedeutung für ein korrektes Weiterleiten und ebenso Grundlage für die Verwaltung optimierender Direktverbindungen ist, muss daher die Robustheit der Hierarchie auch unter diesen Bedingungen sichergestellt werden. In diesem Abschnitt wird daher ein *Stabilisierungsalgorithmus* eingeführt, der sicherstellt, dass die Korrektheit der Router-Hierarchie auch bei parallelen Beitritten und Knotenausfällen gewährleistet ist.

Zunächst wird hierzu der Wegfall eines Routers aus dem Router-Baum betrachtet. Sobald ein physischer Geocast-Router das Overlay-Netz verlässt und somit nicht mehr verfügbar ist, entweder fehlerbedingt oder geplant, muss die virtuelle Router-Hierarchie wieder hergestellt werden, indem ein anderer physischer Router die Rolle des nicht mehr verfügbaren Routers – genauer dessen virtuellen Routers – übernimmt. Hierdurch wird sichergestellt, dass nach dem Ausscheiden wieder ein Zustand erreicht wird, in dem zu jedem Zielgebiet wieder ein Pfad im Overlay-Netz besteht. Bis die virtuellen Router des nicht mehr verfügbaren physischen Routers von einem anderen physischen Router übernommen wurden, können allerdings Nachrichten verloren gehen, das heißt, das System realisiert keinen zuverlässigen, wohl aber einen bezüglich Router-Ausfällen robusten Dienst, der schließlich in einen konsistenten Zustand konvergiert, sobald keine Veränderung der Knotenpopulation mehr stattfindet.

Sobald ein physischer Geocast-Router das Overlay-Netz verlässt, löst dies bei seinen benachbarten Router, das heißt, bei seinem Vater-Router und seinen Kind-Routern, ein entsprechendes Ereignis aus (Algorithmus 3.1, Zeilen 41 und 47). Wenn ein physischer Geocast-Router das Overlay-Netz geplant verlässt, dann teilt er dies seinen Nachbarn in der Router-Hierarchie durch eine explizite Router-Leaving-Nachricht mit. Sollte ein physischer Geocast-Router fehlerbedingt aus dem Overlay-Netz ausscheiden, so kann er dies unter Umständen nicht mehr selbstständig seinem Vater- und seinen Kind-Routern mitteilen. Daher überwacht jeder Geocast-Router seine Nachbarn in der Hierarchie. Hierfür sendet jeder Geocast-Router seinen Nachbarn in regelmäßigen Abständen spezielle Herzschlag-Nachrichten (engl. heartbeat) (Algorithmus 3.1, Zeile 1). Empfängt

ein Geocast-Router von einen bestimmten Nachbarn für eine gewisse Zeit keine dieser Nachrichten, so nimmt er an, dass dieser nicht mehr verfügbar ist und leitet kompensierende Maßnahmen ein (Algorithmus 3.1, Zeilen 6 und 11).

Die Reaktion eines physischen Routers auf das Ausscheiden eines anderen physischen Geocast-Routers unterscheidet sich je nachdem ob es sich um den Vater-Router oder einen Kind-Router des nicht mehr verfügbaren Routers handelt.

Der Vater-Router $\tilde{r}_{\text{parent}}$ übernimmt beim Ausscheiden eines seiner Kind-Router $\tilde{r}_{\text{failed}}$ dessen Rolle (Algorithmus 3.1, Zeile 43). Das heißt, aus Sicht von $\tilde{r}_{\text{parent}}$ ist nun $\tilde{r}_{\text{parent}}$ der designierte Router jeder Lokation l mit $l < s(\tilde{r}_{\text{failed}})$ und ersetzt diesen somit. Hierbei ist zu beachten, dass $\tilde{r}_{\text{parent}}$ designierter Router für den kompletten Teilbaum von $\tilde{r}_{\text{failed}}$ wird. Insbesondere kennt $\tilde{r}_{\text{parent}}$ die Kind-Router von $\tilde{r}_{\text{failed}}$ (bisher) nicht. Sollte $\tilde{r}_{\text{failed}}$ kein Blatt-Router der Router-Hierarchie sein, so tritt hierdurch ein Zustand ein, in dem für einzelne Lokationen nun zwei designierte Router in unterschiedlichen Partitionen des nach dem Ausscheiden von $\tilde{r}_{\text{failed}}$ zerfallenen Overlay-Netzes zuständig sind (vgl. Abbildung 3.9(b)). Dieser inkonsistente Zustand wird durch die als nächstes beschriebene Reaktion der Kind-Router von $\tilde{r}_{\text{failed}}$ wieder in eine konsistente virtuelle Router-Hierarchie überführt, indem sich die Kind-Router von $\tilde{r}_{\text{failed}}$ bei $\tilde{r}_{\text{parent}}$ registrieren.

Ein Kind-Router, der feststellt, dass sein Vater-Router nicht mehr Teil des Overlay-Netzes ist, registriert sich bei demjenigen physischen Router $\tilde{r}_{\text{parent}}$, der die Rolle des ausgeschiedenen physischen Routers $\tilde{r}_{\text{failed}}$ übernommen hat (Algorithmus 3.1, Zeile 50). Sobald ein Kind-Router \tilde{r}_{child} durch fehlende Heartbeat-Nachrichten des Vaters oder durch eine explizite Hinweisnachricht des Vaters den Wegfalls des Vater registriert hat, startet \tilde{r}_{child} hierzu denselben Beitrittsprozess, den er auch bei seinem initialen Beitritt zum Overlay-Netz ausgeführt hat (siehe Abschnitt 3.6.1.3). Hierdurch wird die Partitionierung des Overlay-Netzes aufgehoben und wieder ein konsistenter Zustand hergestellt, indem $\tilde{r}_{\text{parent}}$ die Zuständigkeit für die Unterbäume seiner Kinder wieder an diese übergibt. Die notwendigen Umstrukturierungen der Router-Hierarchie bleiben dabei auf die Stelle des weggefallenen Routers beschränkt, insbesondere bleiben Kind-Router von \tilde{r}_{child} von der Umstrukturierung unberührt.

Schließlich stellt der Stabilisierungsalgorithmus auch die Konsistenz der Router-Hierarchie im Sinne korrekter Vater-Kind-Verbindungen sicher. Wird ein Router von zwei Routern \tilde{r}_1 und \tilde{r}_2 für deren Vater-Router gehalten, obwohl tatsächlich $s(\tilde{r}_2) < s(\tilde{r}_1)$ gilt, so ist die Router-Hierarchie offensichtlich nicht korrekt. In diesem Fall müsste \tilde{r}_1 der Vater-Router von \tilde{r}_2 und nicht sein Geschwister-Router sein. Obwohl dieser Fall bereits durch das Beitrittsprotokoll aus Abschnitt 3.6.1.3 behandelt wird, kann diese Situation im Fehlerfall zum Beispiel bei Verlust der Parent-Router-Changed-Nachricht noch immer auftreten. Dieses Problem kann allerdings von $\tilde{r}_{\text{parent}}$ leicht durch Überprüfung seiner Routing-Tabellen-Einträge beim Erhalt einer Heartbeat-Nachricht erkannt werden (Algorithmus 3.1, Zeile 23). Der Konflikt wird vergleichbar zum Beitrittsprozess dadurch aufgelöst, dass $\tilde{r}_{\text{parent}}$ eine Parent-Router-Changed-Nachricht an \tilde{r}_2 sendet, um ihm mitzuteilen, dass \tilde{r}_1 sein korrekter Vater-Router ist. \tilde{r}_2 registriert sich daraufhin beim Empfang dieser Nachricht bei seinem (korrekten) Vater-Router, im Beispiel beim Router \tilde{r}_1 .

- 1 **On timer T_1 do**
send heartbeat to parent and child routers

```

3  od

5  On timer  $T_2$  do
6    if no heartbeat indicator set for  $\tilde{r}_{\text{parent}}$ 
7      // Vater-Router ausgefallen
8      fire event parent router  $\tilde{r}_{\text{parent}}$  leaving overlay network
9    fi
10   foreach child router  $\tilde{r}_{\text{child}}$  do
11     if no heartbeat indicator set for  $\tilde{r}_{\text{child}}$  then
12       // Kind-Router ausgefallen
13       fire event child router  $\tilde{r}_{\text{child}}$  leaving overlay network
14     fi
15   reset heartbeat indicator of parent and child routers
16   od
17
18   On receiving heartbeat message from router  $\tilde{r}'$  do
19     set heartbeat indicator of  $\tilde{r}'$ 
20     // Überprüfung auf korrekte Vater-Kind-Beziehung
21     if  $\tilde{r}'$  is child router of  $\tilde{r}$ 
22       foreach child router  $\tilde{r}_{\text{child}} \neq \tilde{r}'$  do
23         if  $s(\tilde{r}') < s(\tilde{r}_{\text{child}})$ 
24           remove  $\tilde{r}'$  from routing table
25         send parent router changed message with  $\tilde{r}_{\text{child}}$  to  $\tilde{r}'$ 
26       fi
27     od
28   fi
29   od

30
31   On receiving router leaving message from  $\tilde{r}_{\text{leaving}}$ 
32     if  $\tilde{r}_{\text{leaving}}$  is child router then
33       // Kind-Router verlässt Netz geplant
34       fire event child router  $\tilde{r}_{\text{leaving}}$  leaving overlay network
35     else
36       // Vater-Router verlässt Netz geplant.
37       fire event parent router  $\tilde{r}_{\text{leaving}}$  leaving overlay network
38     fi
39   do

40
41   On child router  $\tilde{r}_{\text{child}}$  leaving overlay network do
42     // Router übernimmt kompletten Teilbaum des ausgefallenen Kind-Routers
43      $\tilde{r}$  becomes designated router of each location  $l \leq s(\tilde{r}_{\text{child}})$ 
44     by deleting  $\tilde{r}_{\text{child}}$  from routing table
45   od

```

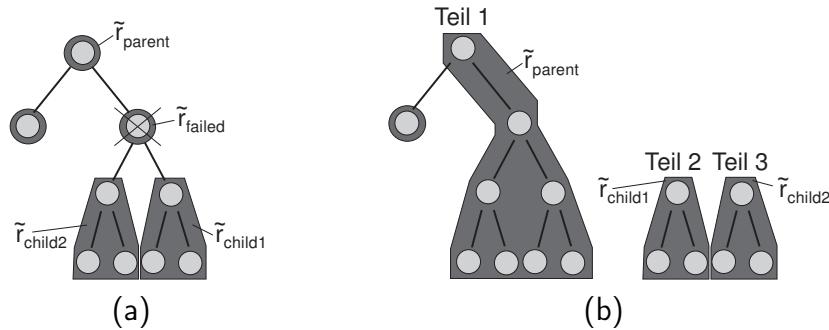


Abbildung 3.9: Inkonsistente Router-Hierarchie nach Ausfall des Routers \tilde{r}_{failed} und anschließender Übernahme des entsprechenden Teilbaumes durch den Vater-Router \tilde{r}_{parent} . (a) Unmittelbar nach dem Ausfall von \tilde{r}_{failed} . (b) Nach Übernahme des Ausgefaltenen Routers durch \tilde{r}_{parent} und vor Aufhebung der resultierenden Partitionierung.

```

47 On parent router  $\tilde{r}_{parent}$  leaving overlay network do
    remove  $\tilde{r}_{parent}$  from routing table
49    // Wiederbeitritt beim neuen Vater-Router
    register  $\tilde{r}$  with new parent by executing bootstrap process
51 od

53 On receiving parent changed message with new parent router  $\tilde{r}_{parent}$ 
    register  $\tilde{r}$  with correct parent  $\tilde{r}_{parent}$ 
55 od

```

Algorithmus 3.1: Stabilisierungsalgorithmus zur Wiederherstellung der virtuellen Router-Hierarchie, ausgeführt vom Router \tilde{r}

3.6.1.4 Vermittlungsalgorithmus

Im Folgenden wird der Vermittlungsalgorithmus zur Weiterleitung von Nachrichten vom sendenden Geocast-Host zu den Geocast-Hosts im Zielgebiet der Nachricht beschrieben. Dieser Vermittlungsprozess ist nicht nur im Basis-Overlay-Netz anwendbar, sondern kann unverändert auch für das weiter unten beschriebene optimierte vermaschte Overlay-Netz mit zusätzlichen Direktverbindungen eingesetzt werden. Zum Zwecke einer einfacheren Beschreibung wird dieser Prozess aus Sicht der virtuellen Router der virtuellen Router-Hierarchie beschrieben. Nachrichten müssen hierbei tatsächlich nur zwischen virtuellen Routern über das unterlagerte IP-Netz übermittelt werden, wenn der jeweils sendende und empfangende virtuelle Router von jeweils verschiedenen physischen Routern implementiert wird.

Die Weiterleitung einer Nachricht vom Sender an die Geocast-Hosts im Zielgebiet der Nachricht erfolgt in mehreren Schritten:

1. Der Geocast-Host des Senders übergibt die Nachricht zunächst an den lokalen Message-Server seines Zugangsnetzes.

2. Dieser Message-Server leitet die Nachricht an einen beliebigen Geocast-Router weiter.
3. Von diesem Geocast-Router aus wird die Nachricht durch das Overlay-Netz zu allen Geoacast-Routern geleitet, deren Dienstgebiete Teile des Zielgebiets abdecken.
4. Die Geocast-Router mit Dienstgebieten im Zielgebiet geben die Nachricht an die Message-Server weiter, deren Zugangsnetze Teile des Zielgebiets abdecken.
5. Diese Message-Server leiten die Nachricht schließlich an die Hosts im Zielgebiet weiter.

Im Folgenden wird zunächst der Prozess der Weiterleitung durch die Geocast-Router (Schritt 3) im Detail beschrieben. Anschließend erfolgt eine detaillierte Erläuterung der Weiterleitung an die Message-Server (Schritt 4).

Die Nachrichtenweiterleitung durch die Geocast-Router erfolgt in zwei Phasen: In *Phase 1* wird die Nachricht zu demjenigen Geocast-Router weitergeleitet, dessen Dienstgebiet dem Zielgebiet der Nachricht entspricht. Das heißt, eine Nachricht an die Stadt Stuttgart wird beispielweise an den Stadt-Geocast-Router von Stuttgart weitergeleitet. In der anschließenden *Phase 2* wird die Nachricht an alle Router verteilt, deren Dienstgebiete im Zielgebiet liegen, das heißt, beispielsweise an alle Stadtteil- und Gebäude-Router in Stuttgart. Die Nachricht traversiert somit die Router-Hierarchie.

Algorithmus 3.2 beschreibt im Detail den Vermittlungsalgorithmus, den ein Router, bezeichnet durch r , beim Empfang einer Nachricht m ausführt. Zunächst stellt der Router fest, in welcher Phase sich die Nachrichtenweiterleitung aktuell befindet (Algorithmus 3.2, Zeile 2). Hierfür enthält die Geocast-Nachricht im Kopf ein Feld ($\text{phase}(m)$), das mit einem Bit die aktuelle Phase anzeigt; dieses Feld wird von den Routern während der Weiterleitung entsprechend gesetzt.

In Phase 1 leitet jeder Router r die Nachricht an einen Geocast-Router weiter, der bezüglich der topologischen Distanz in der Router-Hierarchie näher zum Geocast-Router des Zielgebiets liegt als er selbst. Hierfür versucht r , einen benachbarten Router zu ermitteln, dessen symbolische Dienstgebietsadresse ein längeres Präfix der Zielgebietsadresse ist als seine eigene Dienstgebietsadresse. r bestimmt zunächst den ihm lokal bekannten Router, dessen symbolische Dienstgebietsadresse das längste Prefix der Zielgebietsadresse darstellt (Algorithmus 3.2, Zeile 3). T_{FwdTable} bezeichnet dabei die Menge der lokal bekannten symbolischen Dienstgebietsadressen aus r 's Vermittlungstabelle, das heißt, die Dienstgebietsadressen seiner Nachbar-Router. Für die Basis-Topologie sind das der Vater- und der Kind-Router von r sowie r 's eigene Dienstgebietsadresse. Für diesen Vorgang können bekannte und sehr effiziente Präfix-Vergleichsalgorithmen eingesetzt werden, so dass der Aufwand vor allem im Vergleich zu geometrischen Operationen geometrischer Vermittlungsverfahren sehr als gering angesehen werden kann.

Wenn r 's Dienstgebietsadresse das längste Präfix bildet (Algorithmus 3.2, Zeile 4), so ist r selbst für das Zielgebiet verantwortlich, das heißt, r kann keinen anderen dem Zielgebiet näher liegenden Router als sich selbst ermitteln. r beginnt somit mit Phase 2 und setzt das entsprechende Bit im Kopf der Geocast-Nachricht (Algorithmus 3.2, Zeile 7).

Konnte kein Router gefunden werden, dessen Dienstgebietsadresse ein Präfix der Zielgebietsadresse bildet (Algorithmus 3.2, Zeile 10), so übergibt r die Nachricht zur Weiterleitung an seinen Vater-Router (Algorithmus 3.2, Zeile 11). Spätestens die Dienstgebietsadresse des Wurzel-Routers der Hierarchie ist ein Präfix der Zielgebietsadresse, und dieser kann dann die Nachricht an einen seiner Kinder-Router mit längerem Präfix weiterleiten.

Konnte ein anderer Router mir längerem Adresspräfix von r ermittelt werden, so wird die Nachricht an diesen weitergeleitet (Algorithmus 3.2, Zeile 13).

In Phase 2 (Algorithmus 3.2, Zeile 17) wird die Nachricht entlang der Vater-Kind-Verbindungen beginnend beim Router des Zielgebiets weitergegeben. Das heißt, die Nachricht wird in der Sub-Hierarchie des Zielgebiets-Routers nach unten weitergereicht (Algorithmus 3.2, Zeile 19).

```

1  On receiving message  $m$  with target area  $\tau_m$  do
2      if  $\text{phase}(m) = 1$  then
3           $r_{\text{next}} \leftarrow \text{longest\_prefix\_match}(\tau_m, T_{\text{FwdTable}})$ 
4          if  $r_{\text{next}} = r$  then
5              //  $r$  ist der designierte Router des Zielgebiets.
6              //  $r$  startet Phase 2.
7               $\text{phase}(m) \leftarrow 2$ 
8          else
9              // Phase 1: Weiterleitung zum Zielgebiet.
10             if  $r_{\text{next}} = \text{undef}$  then
11                 forward  $m$  to parent router of  $r$ 
12             else
13                 forward  $m$  to router  $r_{\text{next}}$ 
14             fi
15         fi
16     fi
17     if  $\text{phase}(m) = 2$  then
18         // Phase 2: Verteilung im Zielgebiet.
19         forward  $m$  to each child router  $r_c$ 
20         forward  $m$  to each message server  $M$  with  $\text{s}(r) = \text{s}(M) \cap \tau_m$ 
21     fi
22 od

```

Algorithmus 3.2: Vermittlungsalgorithmus, ausgeführt von Geocast-Router r

Abbildung 3.10 veranschaulicht den Weiterleitungsprozess anhand eines einfachen Beispiels. In diesem Beispiel wird eine Nachricht von einem Gebäude in Miami, Florida, USA an das Zielgebiet /de/bw/stuttgart/ gesendet. Der Sender, der sich in einem Gebäude in Miami befindet, übergibt die Nachricht zunächst an seinen lokalen Message-Server M_s , der die Nachricht an den lokalen Router des Gebäudes X übergibt. Im Folgenden steigt die Nachricht zunächst in der Hierarchie bis zur Wurzel auf, da keiner der Router in den USA einen Nachbar-Router besitzt, dessen Dienstgebietsadresse ein Präfix der Zielgebietsadresse darstellt. Der Wurzel-Router gibt die Nachricht an den benachbarten Deutschland-Router weiter, da dies der ihm lokal bekannte Nachbar-Router mit

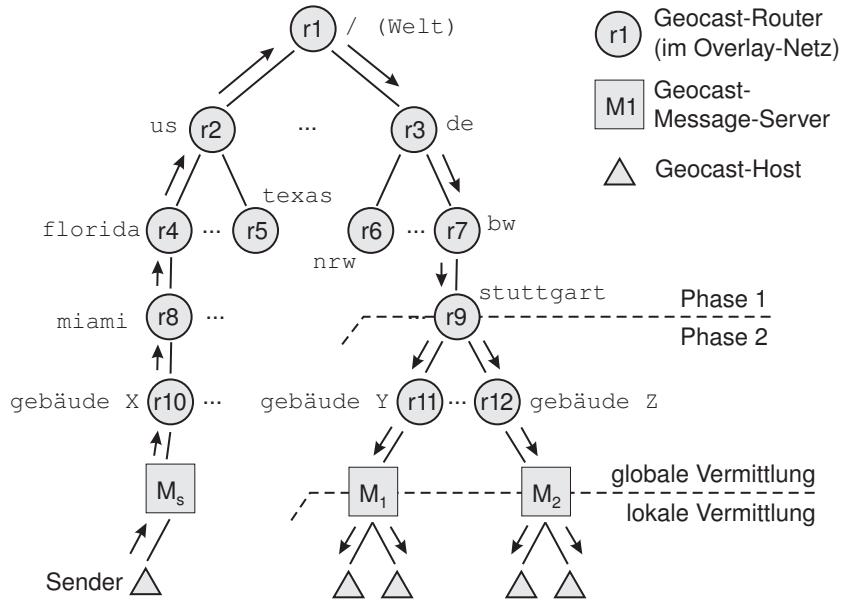


Abbildung 3.10: Vermittlung einer Geocast-Nachricht in der Router-Hierarchie.

dem längsten passenden Präfix (/de) ist. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis die Nachricht beim Stuttgart-Router ankommt, dessen Dienstgebietsadresse der Zielgebietsadresse entspricht. Dieser Router startet somit Phase 2 und gibt die Nachricht entlang der Hierarchie an seine Kind-Router (im Beispiel zwei Gebäude-Router⁶) weiter.

In Phase 2 wird die Nachricht außerdem an die Geocast-Message-Server weitergeleitet, deren Abdeckungsgebiete das Zielgebiet der Nachricht schneiden. Um eine bandbreiteneffiziente Zustellung zu erreichen, sollte eine Nachricht dabei nicht mehrmals an einen Message-Server zugestellt werden. Wie bereits oben angedeutet, registrieren sich die Message-Servers, um Nachrichten zu empfangen bei bestimmten Geocast-Routern. Allerdings erweist sich der Prozess der Registrierung und Nachrichtenzustellung an Message-Servers als nicht trivial, wenn Message-Servers auch größere Gebiete abdecken können und trotzdem jede Nachricht nur einmal empfangen sollen. Die Problematik und Lösung soll anhand eines Beispiels veranschaulicht werden. Hierzu wird ein Message-Server M betrachtet, der einen Stadtteil abdeckt. Die Router-Hierarchie soll im Beispiel aus Länder-, Bundesland-, Städte-, Stadtteil- und Gebäude-Routern bestehen.

Ein einfacher Ansatz zur Registrierung von Message-Servers bei Geocast-Routern der Hierarchie wäre die ausschließliche Registrierung bei Blatt-Routern der Router-Hierarchie. Im Beispiel müsste M sich bei jedem Gebäude-Router in seinem abgedeckten Stadtteil registrieren um sicherzustellen, dass er auch Nachrichten zugestellt bekommt, die an einzelne Gebäude adressiert sind. Das bedeutet aber auch, dass Nachrichten an den gesamten Stadtteil oder eine darüber liegende Ziellokation mehrfach an M zugestellt würden, da zwischen verschiedenen Gebäude-Routern keine Koordination der Aus-

⁶Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf weitere Hierarchieebenen verzichtet. Vorstellbar wären zum Beispiel weitere Stadtteil- oder Straßen-Router.

lieferung an Message-Server stattfindet. M bekäme in diesem Fall eine Nachrichtenkopie pro Gebäude-Router, bei dem er sich registriert hat. Daraus würden viele unnötige Nachrichten resultieren, welche die Effizienz des Vermittlungsverfahrens negativ beeinflussen würden.

Ein zweiter naheliegender Ansatz wäre die ausschließliche Registrierung bei dem einzelnen Geocast-Router, der für das Abdeckungsgebiet des Message-Servers zuständig ist. Im Beispiel müsste sich M , dessen lokale Netze einen ganzen Stadtteil abdecken, folglich beim entsprechenden Stadtteil-Router registrieren. In diesem Fall wäre aber mit obigem Vermittlungsalgorithmus nicht mehr sichergestellt, dass Nachrichten an kleine Gebiete innerhalb des Stadtteils – beispielsweise an ein Gebäude – an M zugestellt würden, da diese Nachrichten nicht notwendiger Weise den Stadtteil-Router traversieren, zum Beispiel wenn eine Nachricht von einem Sender in einem Gebäude an genau dieses Gebäude geschickt wird; diese Nachricht würde nur bis zum Gebäude-Router in der Hierarchie aufsteigen, nicht aber bis zum Stadtteil-Router.

Die oben beschriebenen naheliegenden Ansätze sind somit nicht optimal. Der folgende Ansatz zur Registrierung von Message-Servers vermeidet die oben geschilderten Probleme: Ein Message-Server registriert sich bei *allen* Geocast-Routern, deren Dienstgebiet im Abdeckungsgebiet des Message-Servers liegen ($s(r) \leq s(M)$). Die Registrierung kann durch eine Geocast-Nachricht gerichtet an das Abdeckungsgebiet des Message-Servers erfolgen, die wie eine gewöhnliche Geocast-Nachricht entsprechend dem oben aufgeführten Vermittlungsalgorithmus weitergeleitet und an genau diese Router in Phase 2 verteilt wird. Im Beispiel registriert sich M sowohl beim Stadtteil-Router als auch bei allen Gebäude-Routern in diesem Stadtteil (vgl. Abbildung 3.11). Eine Nachricht m mit Zielgebiet τ_m wird allerdings ausschließlich von demjenigen Router r an M zugestellt, der für den Schnitt des Abdeckungsgebiets von M und τ_m zuständig ist (Algorithmus 3.2, Zeile 20). Da für jede Lokation – also auch für die Schnittlokation $s(M) \cap \tau_m$ – genau ein Router zuständig ist, wird die Nachricht nur ein einziges Mal an den Message-Server zugestellt. Außerdem ist sichergestellt, dass der Router, der für diese Schnittlokation zuständig ist, in Phase 2 von jeder Nachricht erreicht wird, die das Dienstgebiet von M schneidet, da $s(M) \cap \tau_m$ ein Teilgebiet des Zielgebiets τ_m ist. Solche Teilgebiete sind entsprechend der Konstruktion des Vermittlungsalgorithmus Dienstgebiete von Routern in Phase 2. Der Schnitt von M und τ_m kann ferner einfach über deren symbolische Adressen ermittelt werden. Die längere der beiden Adressen bezeichnet die Schnittlokation und somit die Dienstgebietsadresse des für die Zustellung an M zuständigen Routers.

Wird im obigen Beispiel eine Nachricht an eine Gebäude geschickt, dann liefert der Schnitt des Abdeckungsgebiets und des Zielgebiets die symbolische Adresse des Gebäudes. In diesem Fall leitet also nur der entsprechende Gebäude-Router die Nachricht an M weiter (in Abbildung 3.11 Router r_6 für eine Nachricht an Gebäude X). Wird eine Nachricht dagegen an die gesamte Stadt geschickt, so liefert der Schnitt der Abdeckungsgebiets des Message-Servers (Stadtteil) und des Zielgebiets (Stadt) die Adresse des Stadtteils. Das heißt, der Stadtteil-Router wird in diesem Fall die Nachricht an M zustellen (in Abbildung 3.11 Router r_5 für eine Nachricht an Stadt).

Auf den ersten Blick erscheint bei diesem Ansatz die Anzahl der Message-Server, die sich bei einem Geocast-Router registrieren, groß. In der Tat ist die Anzahl aber durch die

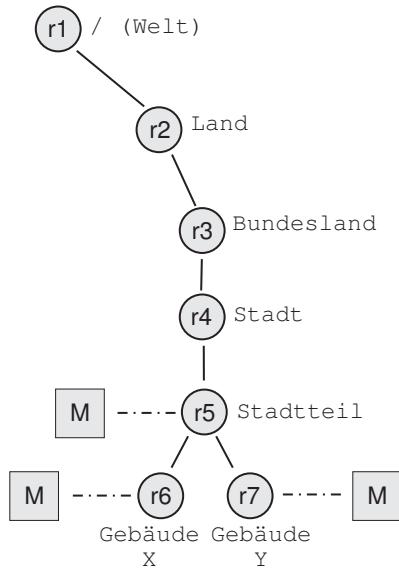


Abbildung 3.11: Registrierung eines Stadtteil-Message-Servers M bei den Geocast-Routern mit $s(r) \leq s(M)$.

Anzahl der Zugangsnetze beschränkt, die eine bestimmte Lokation *vollständig* abdecken. Das heißt, bei einem Stadtteil-Router registrieren sich beispielsweise nur Message-Server, deren Zugangsnetze den kompletten Stadtteil abdecken. Die Anzahl der Zugangsnetze, die Gebiete solcher Größe abdecken, wird im Allgemeinen sehr beschränkt sein. Auf der anderen Seite registrieren sich bei einem Gebäude-Router ebenfalls nur die Message-Server, deren Zugangsnetze das Gebäude vollständig abdecken. Neben wenigen Netzen mit großer Abdeckung, beispielsweise wenigen Funkzellen verschiedener Mobilfunknetze, wird dies nur eine ebenfalls stark beschränkte Anzahl lokaler Netze des Gebäudes selbst sein. Die Anzahl der Message-Server pro Router wird in der Praxis daher selten größer als zehn sein.

3.6.2 Optimiertes Overlay-Netz

Das im vorigen Abschnitt beschriebene baumförmige Basis-Overlay-Netz stellt bereits eine funktionstüchtige Vermittlungsinfrastruktur für symbolisch adressierte Geocast-Nachrichten dar. Allerdings führt ein solches hierarchisches Vermittlungsverfahren auch zu Nachteilen.

Da Nachrichten entlang der Router-Hierarchie weitergeleitet werden, sind die resultierenden Nachrichtenpfade teilweise lang, vor allem, wenn vom Sender entfernte Gebiete adressiert werden. In diesem Fall muss die Nachricht zunächst in der Hierarchie weit nach oben und dann wieder nach unten in Richtung des Zielgebietes-Routers geleitet werden.

Lange Nachrichtenpfade im Overlay-Netz führen gleichzeitig zu mehr UDP-Paketen, die zwischen den Routern ausgetauscht werden müssen und somit zu einer geringeren Bandbreiteneffizienz und erhöhten Belastung des unterlagerten IP-Netzes. Gleichzeitig

steigt durch lange Nachrichtenpfade die Verzögerung, die eine Nachricht bis zum Ein-treffen bei den Empfängern erfährt.

Ein hierarchisches Vermittlungsverfahren kann unter bestimmten Umständen auch zu einer Überlast einzelner Overlay-Router, vor allem nahe der Wurzel der Hierarchie führen. Dieser Bereich der Hierarchie ist aufgrund der im Vergleich zu tieferen Schichten der Hierarchie geringen Anzahl an Overlay-Routern anfällig für Überlastungen. Traversieren viele Nachrichten diesen Bereich der Hierarchie, so müssen die Router unter Umständen Nachrichten verwerfen, die nicht schnell genug weitergeleitet werden können. Außerdem kann es zu einer Überlastung des unterlagerten Netzes nahe der stark frequentierten Overlay-Router kommen, was ebenfalls zum Verlust von Geocast-Nachrichten durch verlorene UDP-Pakete führt.

Um diese Probleme zu vermeiden, soll das Overlay-Netz im Folgenden durch zusätzliche *Direktverbindungen* (engl. *Shortcut*) zwischen den Geocast-Routern ergänzt werden. Eine solche Direktverbindung ist durch die folgenden Bestandteile definiert:

Quell-Router: Der Ausgangspunkt der Direktverbindung. Der Quell-Router verwaltet für jede Direktverbindung einen zusätzlichen Eintrag in seiner Vermittlungstabelle.

Ziellokation: Die Lokation, zu der eine Direktverbindung eingerichtet werden soll.

Ziel-Router: Die UDP-Adresse des designierten Routers der Ziellokation.

Bei einer Direktverbindung handelt es sich um eine gerichtete, unidirektionale Verbindung; nur der Quell-Router kennt den Ziel-Router durch einen entsprechenden Eintrag in seiner Vermittlungstabelle. Es wurden unidirektionale anstatt von bidirektionalen Verbindungen ausgewählt, da im Allgemeinen der Nachrichtenfluss von Geocast-Nachrichten keinen symmetrischen Charakter besitzt. Wenn beispielsweise viele Nachrichten aus der Schweiz an die Stadt New York gesendet werden, so bedeutet das nicht notwendigerweise, dass in der umgekehrten Richtung viele Nachrichten von New York an Ziele in der Schweiz gesendet werden. Durch die Verwendung von unidirektionalen Verbindungen können viele Direktverbindungen auf einen Ziel-Router verweisen, ohne dass daraus ein zusätzlicher Aufwand im Sinne von zusätzlichen Vermittlungstabelleneinträgen beim Ziel-Router resultiert.

Durch Direktverbindungen wird die Router-Hierarchie zu einem vermaschten Overlay-Netz erweitert, in dem zwischen zwei Geocast-Routern verschiedene Pfade existieren können. Wie bereits oben erwähnt, kann in einem dem IP-Netz überlagerten Overlay-Netz theoretisch jeder Overlay-Router mit jedem anderen Overlay-Router kommunizieren, solange er die UDP-Adressen und Dienstgebiete dieser Router kennt. Durch das Einführen von zusätzlichen Direktverbindungen zwischen Geocast-Routern sind somit kürzere Nachrichtenpfade und daraus resultierend eine geringere Belastung der Geocast-Router des Overlay-Netzes sowie der Router des unterlagerten Netzes möglich. Insgesamt wird hierdurch also die Skalierbarkeit des Overlay-Netzes gesteigert.

Zu beachten ist allerdings, dass die Einführung zusätzlicher Verbindung nicht nur Vorteile sondern auch einen zusätzlichen Aufwand bedeutet. Zum einen wachsen hierdurch die Vermittlungstabellen der Geocast-Router des Overlay-Netzes, in denen die Ziellokationen und Adressen der Ziel-Router durch zusätzliche Einträge verwaltet werden. Somit

wächst sowohl der Bedarf an Speicherplatz als auch die Zeit, um Weiterleitungsentscheidungen zu treffen, da hierzu größere Vermittlungstabellen durchsucht werden müssen.

Zum anderen müssen die Ziel-Router einer Direktverbindung, genauer deren UDP-Adressen, zunächst ermittelt und aktuell gehalten werden, woraus ein zusätzlicher Kommunikationsaufwand resultiert.

Um insgesamt eine Effizienzsteigerung zu erzielen, darf daher der zusätzliche Aufwand durch die Einführung von Direktverbindungen nicht deren Nutzen übersteigen. Das bedeutet, zusätzliche direkte Verbindungen müssen sorgfältig ausgewählt werden, um ein möglichst optimales Resultat zu erzielen.

Um Nachrichten über Direktverbindungen zu vermitteln, ist keine Anpassung des Vermittlungsalgorithmus (Algorithmus 3.2, Abschnitt 3.6.1.4) notwendig. Zusätzliche Verbindungen zu weiteren Routern werden von diesem Algorithmus in Phase 1 automatisch berücksichtigt, indem die Präfixvergleichsoperation denjenigen Router auswählt, dessen Dienstgebietadresse das längste Präfix der Zielgebietadresse darstellt. Das heißt, die Nachricht wird in Phase 1 an denjenigen Router vermittelt, der aus Sicht des vermittelnden Routers im Overlay-Netz topologisch am nächsten zum designierten Router des Zielgebietes liegt.

Im Folgenden werden zwei Strategien zur Einrichtung von Direktverbindungen vorgestellt:

Statische Direktverbindungen: Hierfür wird für jeden Geocast-Router eine fixe Menge an Ziellokationen vorgeben, zu denen der Router direkte Verbindungen einrichten soll. Diese Menge an Ziellokationen wird danach nicht mehr angepasst oder verändert. Die Wahl der Ziele von Direktverbindungen erfolgt entsprechend eines angenommenen Nachrichtenmusters. Das heißt, man geht davon aus, dass bestimmte Ziele an bestimmten Orten eine höhere Relevanz als andere Ziele aufweisen und richten zu diesen Zielen direkte Verbindungen ein [DR06].

Adaptive Direktverbindungen: Hierbei wird im Gegensatz zu statischen Direktverbindungen keine fixe Menge an Direktverbindungszielen vorgegeben. Vielmehr bestimmen die Geocast-Router zu Laufzeit selbst, welche Gebiete relevante Direktverbindungslokationen sind und richten entsprechende Verbindungen ein. Die Auswahl der Ziele wird dabei ständig der aktuellen Situation, zum Beispiel der aktuellen Popularität einzelner Zielgebiete, angepasst. Adaptive Direktverbindungen sind somit nicht auf ein bestimmtes Nachrichtenmuster zugeschnitten, sondern passen sich an verschiedene Situationen an [DR08].

Die folgenden Abschnitte beschreiben im Detail diese beiden Strategien für die Einrichtung von Direktverbindungen.

3.6.2.1 Statische Direktverbindungen

Die Einrichtung einer Direktverbindung besteht immer aus zwei Schritten:

1. Auswahl der Ziellokationen

2. Ermittlung und Verwaltung der UDP-Adressen der Ziel-Router

Die Auswahl der Ziellokationen erfolgt dabei für jeden Router individuell. Das heißt, verschiedene Router können unterschiedliche Direktverbindungen zu verschiedenen Ziellokationen einrichten.

Statische Direktverbindungen zeichnen sich dabei dadurch aus, dass die Ziellokationen der Direktverbindungen im Schritt 1 vor der Installation eines Routers manuell einmal festgelegt und danach im Betrieb nicht mehr angepasst werden. (Theoretisch können auch statische Direktverbindungen im laufenden Betrieb noch verändert werden, wenn sich zum Beispiel ein bestimmtes Ziel über die Zeit als sehr relevant erweist. Allerdings erfordert dies den manuellen Eingriff des Betreibers, der vor allem bei größeren Systemen sehr aufwendig und daher selten ist.) Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts werden eine Heuristik für die statische Auswahl von Direktverbindungsziellokationen (Schritt 1) sowie die Mechanismen zur Einrichtung und Verwaltung dieser Direktverbindungen (Schritt 2) vorgestellt.

Heuristik zur Auswahl statischer Direktverbindungsziele

Die Grundlage zur Definition von Direktverbindungsziellokationen bildet ein durch den Betreiber angenommenes Kommunikationsverhalten der Teilnehmer, worauf die Ziele der Direktverbindungen zugeschnitten werden. Die im Folgenden beschriebene Heuristik [DR06] zur Auswahl von Direktverbindungszielen im Geocast-Overlay-Netz basiert auf der Annahme, dass Sender hauptsächlich Ziele in ihrer Nähe adressieren und vergleichsweise selten entfernte Ziele, das heißt, die Relevanz von Zielgebieten nimmt mit der Entfernung zum Sender ab. (Ein entsprechendes Schema basierend hierarchischen Geo-Multicast-Gruppen wurde in einer Diplomarbeit entworfen [Luo04].) Nach dieser Annahme würde beispielsweise ein Sender, der sich in einer bestimmten Stadt aufhält, mit höherer Wahrscheinlichkeit Nachrichten an Zielgebiete innerhalb dieser Stadt schicken als an Ziele in anderen Städten, anderen Bundesländern oder gar anderen Ländern. Da bisher noch kein Geocast-System großflächig einer breiten Masse zur Verfügung gestellt wurde, fehlen zwar Erfahrungen bezüglich des tatsächlichen Geocast-Kommunikationsverhaltens. Allerdings zeigen beispielsweise ortsbezogene Anfragen oder Telefongespräche ähnliche Kommunikationsmuster [Sta09, XOW04]. Offensichtlich sind bei ortsbezogenen Anwendungen geographisch nahe Objekte wie ein nahe liegendes Restaurant oder eine Sehenswürdigkeit in unmittelbarer Nähe relevanter für den Benutzer. Ein ähnliches Kommunikationsmuster kann bei der herkömmlichen Telefonie beobachtet werden. Auch hier sind die Mehrzahl der Gesprächspartner geographisch nahe zum Anrufenden, das heißt, Ferngespräche in andere Länder sind beispielsweise deutlich seltener als Ortsgespräche. Somit erscheint ein ähnliches Kommunikationsmuster auch für die geographische Kommunikation, die explizit den Ort als Adressierungskonzept verwendet, ebenfalls plausibel.

Um Direktverbindungen für das beschriebene lokale Kommunikationsverhalten zu optimieren, sollte ein Geocast-Router mehr Direktverbindungen zu Lokationen einrichten, die sich in der Nähe seines Dienstgebiets befinden als zu entfernten Lokationen. Als nächstes wird eine hierfür geeignete Heuristik zur Auswahl von Direktverbindungszielen

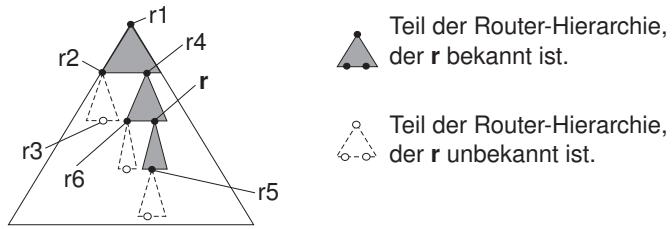


Abbildung 3.12: Statische Direktverbindungen des Routers r zur Optimierung des Overlay-Netzes für ein lokales Kommunikationsverhalten.

präsentiert.

Sei r ein beliebiger Geocast-Router mit dem Dienstgebiet $s(r)$. Informell ausgedrückt richtet jeder Geocast-Router r zusätzliche Direktverbindungen zu seinen Vorfahren in der Router-Hierarchie und zu den Kind-Routern seiner Vorfahren ein. Formal beschrieben etabliert r zusätzliche Direktverbindungen zu den folgenden Routern der Menge $R_{\text{staticshortcuts},r}$:

$$R_{\text{staticshortcuts}, r} = \{r' \in R \mid s(r') \in \text{ancestors}(s(r)) \vee s(r') \in \{l \in L \mid \exists l' \in L: l' \in \text{ancestors}(s(r)) \wedge l \in \text{children}(l')\}\} \quad (3.8)$$

Insgesamt besitzt r somit direkte Verbindungen zu den virtuellen Routern der Menge $R_{\text{tree},r}$ (Gleichung 3.6) und $R_{\text{staticshortcuts},r}$. Entsprechend Gleichung 3.7 wird die Relation \mathcal{M}_r erweitert, so dass r die physischen Router aller direktverbundenen virtuellen Router dieser Mengen kennt:

$$\mathcal{M}_r = \{(\tilde{r}', r') \in \mathcal{M} \mid r' \in R_{\text{tree}, r} \vee r' \in R_{\text{staticshortcuts}, r}\} \quad (3.9)$$

Beispielsweise kennt ein Stadtteil-Router alle anderen Stadtteil-Router in *seiner* Stadt (aber nicht die Stadtteil-Router *anderer* Städte), alle Städte-Router in *seinem* Bundesland (aber nicht die Städte-Router in *anderen* Bundesländern), alle Bundesland-Router in *seinem* Land (aber nicht die Bundesland-Router *anderer* Länder), usw.

Abbildung 3.12 veranschaulicht die Wahl von statischen Direktverbindungen entsprechend der beschriebenen Heuristik anhand eines Beispiels. Diese Abbildung zeigt die lokale Sicht des Routers r auf die Router-Hierarchie. r kennt die Router r_4 und r_5 , da es sich bei diesen Routern um Vater- und Kind-Router der Router-Hierarchie handelt. Das erweiterte topologische Wissen umfasst den Router r_1 (Vorfahren-Router) sowie r_2 und r_6 (Kinder von Vorfahren). r_3 ist für r nicht direkt sichtbar (weder Vater-, Kind-, Vorfahren- oder Kind-Router eines Vorfahren).

Bei dieser Art der Auswahl von Direktverbindungen ist die Anzahl der Direktverbindungen pro Router begrenzt durch $O(dc)$, wobei d die Tiefe der Router-Hierarchie und c die maximale Anzahl von Kind-Routern bezeichnen. Bei einer balancierten Hierarchie mit n (virtuellen) Routern wächst d mit $O(\log_c n)$. Selbst für eine große Anzahl virtueller Router, wie sie aus einem feingranularen und globalen Lokationsmodell resultiert, wächst

die Anzahl an Direktverbindungen und der mit ihrer Verwaltung verbundene Aufwand relativ langsam. Selbst für große Systeme dürfte somit die Anzahl der Direktverbindungen selten größer als 500 sein.

Mechanismen zur effizienten Verwaltung von Direktverbindungen

Nachdem oben definiert wurde, zu welchen Ziellokationen Geocast-Router Direktverbindungen einzurichten haben, werden ferner Mechanismen zu Verwaltung dieser Direktverbindungen, genauer zur Ermittlung der UDP-Adressen der Ziel-Router, benötigt.

Hierzu kann zunächst festgestellt werden, dass die Vermittlungstabelle eines Routers r eine Obermenge der Vermittlungstabelle seines Vater-Routers r_{parent} ist. Das bedeutet, r besitzt Verbindungen zu allen Geocast-Routern, zu denen auch r_{parent} Verbindungen besitzt. Diese Eigenschaft kann für eine effiziente Verwaltung von Direktverbindungen ausgenutzt werden.

Grundlage bildet der Mechanismus zur Etablierung der grundlegenden Router-Hierarchie, wie er in Abschnitt 3.6.1.3 beschrieben wurde.

Zur initialen Einrichtung von Direktverbindungen müssen die Schritte drei und vier, die beim Beitritt eines neuen physischen Geocast-Routers \tilde{r}_{new} zum Overlay-Netz ausgeführt werden, wie folgt angepasst werden:

Schritt 3 – original: \tilde{r}_{parent} sendet seine UDP-Adresse an \tilde{r}_{new} .

Schritt 3 – angepasst: Der physische Router \tilde{r}_{parent} sendet die komplette Vermittlungstabelle des von ihm implementierten virtuellen Routers r_{parent} mit $s(r_{parent}) = parent(s(\tilde{r}_{new}))$ an \tilde{r}_{new} (diese Vermittlungstabelle beinhaltet auch einen Eintrag für r_{parent} selbst).

Schritt 4 – original: \tilde{r}_{new} nimmt r_{parent} als Vater-Router auf, indem er seiner Routing-Tabelle den Eintrag $[parent(s(r_{new})) \rightarrow \text{UDP-Adresse von } \tilde{r}_{parent}]$ hinzufügt. Aus Sicht von \tilde{r}_{new} ist \tilde{r}_{parent} somit der neue designierte Router der Vaterlokation seines Dienstgebiets $s(\tilde{r}_{new})$. Aus Sicht der virtuellen Router-Hierarchie wird hierdurch der vormals unidirektionale Link zwischen r_{new} und r_{parent} zu einem bidirektionalen Link erweitert.

Schritt 4 – angepasst: \tilde{r}_{new} kopiert die vollständige Vermittlungstabelle von r_{parent} in die Vermittlungstabellen der von \tilde{r}_{new} implementierten virtuellen Router (die Vermittlungstabelle beinhaltet auch einen Eintrag für r_{parent} selbst).

Aus Sicht der virtuellen Router-Hierarchie richtet r_{new} nicht nur eine Verbindung zu seinem Vater-Router ein, sondern gleichzeitig auch alle Direktverbindungen zu seinen Vorfahren und den Kindern seiner Vorfahren, zu denen r_{parent} bereits ebenfalls Direktverbindungen eingerichtet hatte.

Schließlich muss noch sichergestellt werden, dass der Austritt eines Routers, fehlerbedingt oder geplant, nicht zu ungültigen Direktverbindungen führt. Algorithmus 3.1 aus Abschnitt 3.6.1.3 stellt bereits sicher, dass die Verbindungen zu Vater- und Kind-Routern in diesem Fall aktualisiert werden. Dieser Algorithmus muss für die Aktualisierung von Direktverbindungen wie folgt erweitert werden:

```

On child router  $\tilde{r}_{\text{child}}$  leaving overlay network do
2    $\tilde{r}$  becomes designated router of each location  $l \leq s(\tilde{r}_{\text{child}})$ 
      send updated forwarding tables to child routers
4 od

6 On parent router  $\tilde{r}_{\text{parent}}$  leaving overlay network do
7   remove  $\tilde{r}_{\text{parent}}$  from routing table
8   // Wiederbeitritt beim neuen Vater-Router
9   register  $\tilde{r}$  with new parent by executing bootstrap process
10  send updated forwarding tables to child routers
11 od

12 On receiving forwarding table update
13  update forwarding tables of virtual routers implemented by  $\tilde{r}$ 
14 od

16 On forwarding table update
17  send updated forwarding tables to child routers
18 od

```

Algorithmus 3.3: Aktualisierung statischer Direktverbindungen des physischen Routers \tilde{r}

Wie bisher übernimmt der Vater-Router $\tilde{r}_{\text{parent}}$ des ausgeschiedenen Routers $\tilde{r}_{\text{failed}}$ die Rolle des ausgeschiedenen Routers. Damit werden alle bisher installierten Direktverbindungen zu $\tilde{r}_{\text{failed}}$ ungültig. Bei diesen Direktverbindungen muss der Ziel-Router $\tilde{r}_{\text{failed}}$ durch $\tilde{r}_{\text{parent}}$ ersetzt werden. Hierfür sendet $\tilde{r}_{\text{parent}}$ aktualisierte Versionen seiner (virtuellen) Vermittlungstabelle an alle seine Kind-Router (Algorithmus 3.3, Zeile 3). Diese übernehmen die aktualisierte Tabelle (Algorithmus 3.3, Zeile 14) und aktualisieren damit auch die ungültige Direktverbindung zu $\tilde{r}_{\text{failed}}$. Zusätzlich propagieren sie die Änderung in ihrer Sub-Hierarchie durch eine Weitergabe an ihre Kind-Router (Algorithmus 3.3, Zeile 18).

Die Kind-Router des ausgeschiedenen Routers $\tilde{r}_{\text{failed}}$ gehen ähnlich vor. Sobald sie sich bei ihrem neuen Vater-Router $\tilde{r}_{\text{parent}}$ registriert haben, propagieren sie die aktualisierte Vermittlungstabelle in ihrer Sub-Hierarchie (Algorithmus 3.3, Zeile 10). Hierdurch werden die Direktverbindungen zum ausgeschiedenen Vorfahren-Router $\tilde{r}_{\text{failed}}$ in der Sub-Hierarchie aktualisiert.

3.6.2.2 Adaptive Erstellung von Direktverbindungen

Statische Direktverbindungen, wie sie im vorigen Abschnitt beschrieben wurden, sind jeweils auf ein bestimmtes Kommunikationsverhalten zugeschnitten, zum Beispiel Situationen, in denen die meisten Nachrichten an Zielgebiete in der Nähe des Senders geschickt werden. Obwohl die gewählten Direktverbindungslokationen für das antizipierte Kommunikationsverhalten eine signifikante Steigerung der Effizienz erlauben, so sind sie doch weniger effizient, wenn das Verhalten nicht den Erwartungen des Betreibers entspricht. Besonders wenn das Kommunikationsverhalten sich verändert, bieten adaptive,

dynamische Strategien zur Wahl der Direktverbindungslokationen im Vergleich zu statischen Verfahren Vorteile. Adaptive Verfahren passen die gewählten Direktverbindungen laufend selbstständig an das aktuelle Kommunikationsverhalten an. In diesem Abschnitt wird ein solches adaptives Verfahren vorgestellt [DR08].

Die grundlegende Idee der adaptiven Strategie zur Wahl von Direktverbindungszielen ist die fortlaufende Beobachtung der Ziele weitergeleiteter Nachrichten durch die einzelnen Router. Auf Grundlage dieser Beobachtungen kann jeder Router individuell eine Menge von populären Zielgebieten ermitteln, die beispielsweise gerade häufig adressiert werden. Durch zusätzliche Berücksichtigung der Overlay-Netz-Topologie kann so der Nutzen einer potentiellen Direktverbindung ermittelt werden. Auf Grundlage der Populärität von Zielen und der aus einer Direktverbindung resultierenden Pfadoptimierung des Overlay-Netzes wird dann eine beschränkte Anzahl von Direktverbindungen mit möglichst hohem Nutzen eingerichtet, wobei auch der Aufwand zur Einrichtung einer Direktverbindung berücksichtigt wird. Somit werden nur solche Direktverbindungen eingerichtet, die insgesamt einen hohen Nutzen im Sinne verkürzter Pfade und eingesparter Bandbreite erwarten lassen. Im Folgenden wird ein entsprechender Algorithmus zur Auswahl von geeigneten Direktverbindungen im Detail vorgestellt.

Mechanismus zum adaptiven Einrichten von Direktverbindungen

Bevor der eigentliche Algorithmus zur Auswahl geeigneter Direktverbindungsziele vorgestellt wird, soll hier zunächst der Mechanismus zum Einrichten von adaptiven Direktverbindungen erläutert werden. Dieser Mechanismus hat maßgeblichen Einfluss auf den zusätzlichen Kommunikationsaufwand, der für die Einrichtung und Verwaltung von Direktverbindungen notwendig ist. Dieser Aufwand ist bei der Wahl geeigneter Direktverbindungen zu berücksichtigen, so dass der Aufwand nicht den zu erwartenden Nutzen der Verbindung übersteigt. Die folgende Beschreibung erläutert das Vorgehen zur Einrichtung adaptiver Direktverbindungen aus Sicht der virtuellen Router-Hierarchie.

Nachdem eine bestimmte Ziellokation als lohnenswertes Direktverbindungsziel ermittelt wurde (siehe folgende Abschnitte), muss der Quell-Router der Direktverbindung die UDP-Adresse des Ziel-Routers der Verbindung, das heißt, die UDP-Adresse des designierten Routers der Ziellokation, ermitteln. Sobald eine neue Ziellokation als relevantes Direktverbindungsziel ermittelt wurde, sendet der Quell-Router eine `TargetRouterSolicited`-Nachricht an den Ziel-Router. Da der Quell-Router die Adresse des Ziel-Routers noch nicht kennt – genau diese gilt es ja zu ermitteln – wird diese Nachricht mit dem in Abschnitt 3.6.1.4 vorgestellten Geocast-Vermittlungsalgorithmus (Phase 1 des Algorithmus 3.2, Abschnitt 3.6.1.4) auf Basis der Ziellokation der Direktverbindung vermittelt. Diese Anfrage enthält die UDP-Adresse des Quell-Routers. An diese Adresse sendet der Ziel-Router die Antwort, welche die UDP-Adresse des Ziel-Routers enthält. Die Rücksendung der Antwort erfolgt aus Effizienzgründen direkt an die UDP-Adresse des anfragenden Quell-Routers ohne Traversierung der Router-Hierarchie.

Um den Kommunikationsaufwand für die Einrichtung von Direktverbindungen zu minimieren, wird die Anfrage nicht als eigene Nachricht an den Ziel-Router geschickt. Vielmehr wird die Anfrage auf normalen Geocast-Verkehr aufgesattelt (engl. *piggy backing*), der in Richtung des Zielgebiets der Direktverbindung geschickt wird. Somit

kann die Anfrage nahezu ohne zusätzlichen Kommunikationsaufwand vermittelt werden.

Da allerdings nicht garantiert ist, dass in der Gegenrichtung vom Ziel-Router zum Quell-Router ebenfalls normale Geocast-Nachrichten zum Zeitpunkt der Anfrage versandt werden, wird die Antwort als separate Nachricht vom Ziel- direkt an den Quell-Router geschickt. Daraus resultiert ein zusätzlicher Kommunikationsaufwand für die Einrichtung von Direktverbindungen. Dieser zusätzliche Aufwand tritt ebenfalls auf, wenn sich der Ziel-Router einer bestehenden Direktverbindung aufgrund des Austritts oder Ausfalls des Ziel-Routers ändert.

Nutzen eines Direktverbindungszieles

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, verursachen Direktverbindungen zusätzlichen Kommunikationsaufwand. Daher sollten nur solche Direktverbindungen eingerichtet werden, deren Aufwand sich durch die Nutzung verkürzter Pfade tatsächlich amortisiert. Um den Nutzen einer Direktverbindung zu einem bestimmten Zielgebiet, im Folgenden durch τ bezeichnet, auszudrücken, wird die Funktion $utility(\tau)$ eingeführt. Die Definition dieser Funktion basiert auf einer von Bahn et al. in [BKMN02] vorgeschlagenen Funktion zur Bewertung des Nutzens von Web-Cache-Einträgen.

Für die folgenden Beschreibungen ist es wichtig, sich nochmals vor Augen zu führen, dass Direktverbindungsziele von jedem Router *individuell* ausgewählt werden. Das heißt, die folgenden Ausführungen sind aus der lokalen Sicht eines einzelnen Routers r beschrieben.

Formal ist der Nutzen $utility_t(\tau)$ eines Direktverbindungszieles τ zum Zeitpunkt t wie folgt definiert: Wir sagen, ein Zielgebiet τ wird zum Zeitpunkt t *referenziert*, wenn der Router r zum Zeitpunkt t eine Nachricht an τ weiterleitet. Angenommen, das Zielgebiet τ' wird zum Zeitpunkt t' referenziert und das Zielgebiet τ wurde zum Zeitpunkt t referenziert. Dann ist der Nutzen von τ zum Zeitpunkt $t' > t$ wie folgt definiert:

$$utility_{t'}(\tau) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } \tau \text{ noch nie referenziert wurde} \\ \text{weight}(\tau) & \text{wenn } \tau = \tau' \text{ und } \tau \text{ erstmalig referenziert} \\ utility_t(\tau) \times F(t' - t) + \text{weight}(\tau) & \text{wenn } \tau = \tau' \text{ und } \tau \text{ bereits referenziert} \\ utility_t(\tau) \times F(t' - t) & \text{wenn } \tau \neq \tau' \end{cases} \quad (3.10)$$

Die Funktion $F(x) = (\frac{1}{2})^{\lambda x}$ mit dem Parameter λ bestimmt dabei den Einfluss der Aktualität (engl. recency) und Häufigkeit (engl. frequency) der Referenzierung und definiert somit die Popularität des Ziels. Durch die Definition von $\text{weight}(\tau)$ kann jeder Ziellokation τ zusätzlich ein eigenes Gewicht zugewiesen werden, um neben der Referenzierungshistorie zusätzliche Einflussfaktoren auf den Nutzen einer Direktverbindung zu berücksichtigen.

Ist der Parameter λ der Funktion F gleich 0, so wird nur die Häufigkeit der Referenzierung bei der Berechnung berücksichtigt, indem nur gezählt wird, wie oft das Ziel in der Vergangenheit referenziert wurde. Ist dagegen λ groß, dann erhält die Aktualität der Referenzierung ein hohes Gewicht, das heißt, Referenzierungen, die lange in der Vergangenheit liegen, werden schwächer bewertet, als erst kürzlich stattgefundene Referenzierungen. Informell ausgedrückt beschreiben die Referenzierungshäufigkeit und -aktualität

die Popularität einer Ziellokation. Durch diese Definition der Funktion F trägt jede Referenzierung in der Vergangenheit zum berechneten Wert der Nützlichkeit bei. Hierzu muss allerdings nicht die komplette Nachrichtenhistorie eines Ziels einschließlich der Referenzierungszeitpunkte jeder einzelnen Referenzierung gespeichert werden. Vielmehr genügt es, dass ein Router den Wert zum Zeitpunkt der letzten Referenzierung sowie den letzten Referenzierungszeitpunkt verwaltet. Hierdurch kann die Referenzierungshistorie eines Zielgebiets mit konstanter Platzkomplexität verwaltet werden.

Das Gewicht $weight(\tau)$ wird im Folgenden genutzt, um die durch eine Direktverbindung eingesparten Kommunikationskosten im Sinne einer Verkürzung des resultierenden Overlay-Netz-Pfades zum Zielgebiet zu berücksichtigen. Somit bekommen Direktverbindungen, die einen Pfad durch Umgehung vieler Overlay-Router stark verkürzen, ein höheres Gewicht als solche, die nur wenige Router im Overlay-Netz umgehen. Da jeder eingesparte Router im Overlay-Netz gleichzeitig eine Verkürzung des resultierenden Pfades im unterlagerten IP-Netz bedeutet, wird durch diese Metrik gleichzeitig die resultierende Last auf das unterlagerte IP-Netz berücksichtigt.

Da die Nützlichkeitsfunktion dazu dient zu bestimmen, welche Direktverbindungen einzurichten sind, muss $weight(\tau)$ bestimmt werden, *bevor* die Direktverbindung eingerichtet wird. Zu diesem Zeitpunkt kann ein Router ohne umfassendes Topologiewissen über das Overlay-Netz die aus der Direktverbindung resultierende Pfadverkürzung allerdings nicht sicher bestimmen sondern nur abschätzen. Zu Abschätzung der Pfadverkürzung wird die zu diesem Zeitpunkt bekannte symbolischen Adressen des Zielgebiets τ der Direktverbindung und die des Dienstgebiets des Quell-Routers r verwendet. Für eine formale Definition von $weight(\tau)$ werden die folgenden Definitionen eingeführt:

- $sup_{s(r),\tau}$ bezeichnet den kleinsten gemeinsamen Vorfahren (Supremum) von $s(r)$ und τ in der Lokationshierarchie. Beispielsweise ist der kleinste gemeinsame Vorfahre der Lokationen mit den Adressen /a/b/ und a/c die Lokation mit der Adresse /a
- $level(l)$ bezeichnen den Abstand einer Lokation zur Wurzel der Lokationshierarchie. Die Wurzellokation mit der Adresse / hat beispielsweise den Abstand null. Die Lokation mit der Adresse /a/b/ hat den Abstand zwei. $level(s(r))$, $level(\tau)$ und $level(sup_{s(r),\tau})$ lassen sich wie aus den Beispielen leicht zu sehen ist aus den symbolischen Adressen der Lokationen bestimmen.

Das Gewicht $weight(\tau)$ einer Direktverbindung zum Zielgebiet τ ausgehend von Quell-Router r ist dann wie folgt definiert:

$$weight(\tau) = level(s(r)) - level(sup_{s(r),\tau}) + level(\tau) - level(sup_{s(r),\tau}) - 1 \quad (3.11)$$

Abbildung 3.13 veranschaulicht diese Berechnung nochmals anhand eines Beispiels. In diesem Beispiel soll die Berechnung des Gewichts einer Direktverbindung zur Ziellokation $\tau = /us/newyork/newyorkcity$ aus Sicht des designierten Routers r_5 der Lokation /us/florida/miami betrachtet werden. Das Gewicht einer Direktverbindung von r_5 zum Ziel τ berechnet sich zu $weight(\tau) = level(s(r_5)) - level(sup_{s(r_5),\tau}) + level(\tau) - level(sup_{s(r_5),\tau}) - 1$

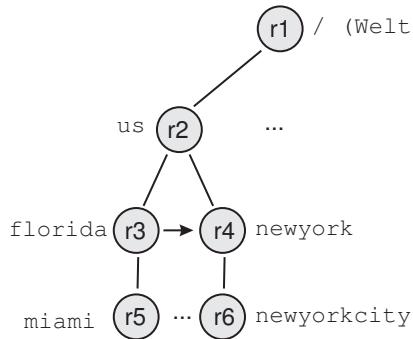


Abbildung 3.13: Abschätzung des Gewichts einer Direktverbindung (Overlay-Netz-Pfadverkürzung).

$\text{level}(\text{sup}_{s(r_5), \tau}) - 1 = 3 - 1 + 3 - 1 - 1 = 3$. Die abgeschätzte Pfadverkürzung beträgt somit drei Geocast-Router, die von der Direktverbindung umgangen werden, nämlich die designierten Router der Gebiete /us/florida, /us und /us/newyork. Dieses Beispiel zeigt auch, dass bereits bestehende Direktverbindungen wie die Direktverbindung zwischen r_3 und r_4 tatsächlich zu einer geringeren Pfadverkürzung führen können. Die tatsächliche Pfadverkürzung der Direktverbindung von r_5 zu τ beträgt im Beispiel nur zwei statt drei Router, wobei r_5 die bereits bestehende Direktverbindung mit seinem lokalen Topologiewissen nicht erkennen kann.

Entwurf des Algorithmus zur adaptiven Auswahl von Direktverbindungen

Basierend auf der Definition der Nützlichkeit einer Direktverbindung im vorigen Abschnitt wird im Folgenden der Auswahlalgorithmus zur Selektion von Ziellokationen beschrieben, zu denen ein Router schließlich seine Direktverbindungen einrichtet.

Zur anschaulichen Beschreibung des Algorithmus wird zwischen so genannten kalten, warmen und heißen Ziellokationen unterschieden. Pro Router existiert nur eine begrenzte Zahl *heißer Ziellokationen*. Nur zu diesen Ziellokationen werden Direktverbindungen eingerichtet und verwaltet. Durch die Begrenzung der Anzahl heißer Ziellokationen mit eingerichteten Direktverbindungen wird der Verwaltungsaufwand für Direktverbindungen limitiert. *Warme Ziellokationen* wurden in der Vergangenheit referenziert, sie werden aber (noch) nicht als heiß angesehen. Für diese Zielgebiete, die unter Umständen in der Zukunft zu heißen Zielen werden, verwaltet der Router den entsprechenden Nützlichkeitswert, richtet aber keine Direktverbindung ein. Die Verwaltung von Nützlichkeitswerten von warmen Ziellokationen ist notwendig, um es Lokationen zu ermöglichen, über die Zeit einen hohen Nützlichkeitswert zu akkumulieren; ohne diese Möglichkeit würden bereits heiße Ziele warme Ziele unter Umständen daran hindern, jemals heiß zu werden. *Kalte Zielgebiete* wurden entweder noch nie referenziert oder die Referenz liegt sehr lange zurück und das Zielgebiet wurde daher bereits aus dem Ziellokationspuffer entfernt (siehe unten). Für kalte Zielgebiete wird somit kein Nützlichkeitswert verwaltet.

Heiße und warme Zielgebiete werden im so genannten *Ziellokationspuffer*, bezeichnet durch B , verwaltet. Dieser ist in zwei Bereiche B_{hot} und B_{warm} unterteilt. B_{hot} be-

zeichnet den *heißen Pufferbereich*. Dieser Bereich hat eine definierte beschränkte Größe $|B_{\text{hot}}| \leq \text{maxsize}_{B_{\text{hot}}}$. Wie zuvor beschrieben, wird für jedes Ziel aus B_{hot} eine Direktverbindung eingerichtet und verwaltet. Die beschränkte Größe von B_{hot} (typischerweise kleiner als 50 Einträge) limitiert den Kommunikations- und Berechnungsaufwand, der durch zusätzliche Direktverbindungen eingeführt wird.

Der zweite Bereich, B_{warm} , nimmt *warme Ziellokationen* auf. In diesem Bereich werden Lokationen verwaltet, die sich gerade im Begriff befinden sich „aufzuwärmen“ und die somit möglicherweise in Zukunft zu heißen Zielen werden. Dieser Bereich ist besonders dann wichtig, wenn die Nützlichkeitsfunktion die Häufigkeit der Referenzierung der Zielgebiete betont. In diesem Fall benötigen Ziele mehrere Referenzierungen, um zu einem heißen Ziel zu werden. Daher ist es notwendig, den über die Zeit angesammelten Nützlichkeitswert eines warmen Ziels zu verwalten, um so die Referenzierungshistorie berücksichtigen zu können.

Ein Eintrag im Ziellokationspuffer enthält die folgenden Informationen:

- Die symbolische Zielgebietsadresse der Ziellokation τ
- Den Nützlichkeitswert $\text{utility}_t(\tau)$ zum Zeitpunkt der letzten Referenzierung
- Den Zeitpunkt t der letzten Referenzierung dieses Zielgebiets. Zusammen mit $\text{utility}_t(\tau)$ kann hiermit wie im vorigen Abschnitt beschrieben der Nützlichkeitswert zum aktuellen Zeitpunkt berechnet werden.
- Für heiße Direktverbindungen die UDP-Adresse des Ziel-Routers der Direktverbindung.

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, wird die Nützlichkeit eines Zielgebiets primär durch dessen Nützlichkeitswert $\text{utility}(\tau)$ beschrieben. Da sich dieser Wert im Laufe der Zeit ändern kann, werden aus warmen Zielen unter Umständen heiße Ziele und umgekehrt. Daher wird eine Ersetzungsstrategie benötigt, die bestimmt, wann ein warmes Ziel aus B_{warm} zum heißen Ziel wird und somit ein bisher heißes Ziel aus B_{hot} in den warmen Pufferbereich verdrängt.

Ein intuitiver Ansatz bestünde darin, die $\text{maxsize}_{B_{\text{hot}}}$ Ziele mit den aktuell höchsten Nützlichkeitswerten als heiß anzusehen und somit in B_{hot} zu platzieren. In diesem Fall würde das Ziel mit dem geringsten Nützlichkeitswert aus B_{hot} verdrängt, sobald ein Ziel mit höherem Nützlichkeitswert existiert. Allerdings hat dieser Ansatz einen entscheidenden Nachteil. Dieser Ansatz führt dazu, dass Direktverbindungen *sofort* eingerichtet werden, wenn der Nützlichkeitswert eines warmen Ziels den eines heißen überschreitet. Da der Nützlichkeitswert eines Ziels τ entsprechend der Definition von $\text{utility}(\tau)$ zwischen zwei aufeinander folgenden Referenzen monoton abnimmt (vgl. Abbildung 3.14), kann es vorkommen, dass Ziele, die nur sporadisch referenziert werden, bereits wieder aus B_{hot} verdrängt wurden, *bevor* sie ein weiteres Mal referenziert werden. Offensichtlich lohnt sich für solche „flüchtigen“ Ziele (engl. volatile shortcut) der Kommunikationsaufwand zur Einrichtung einer Direktverbindung nicht, da sich die Direktverbindung bei der nächsten Referenz bereits aufgrund der Verdrängung durch ein anderes Ziel nicht mehr

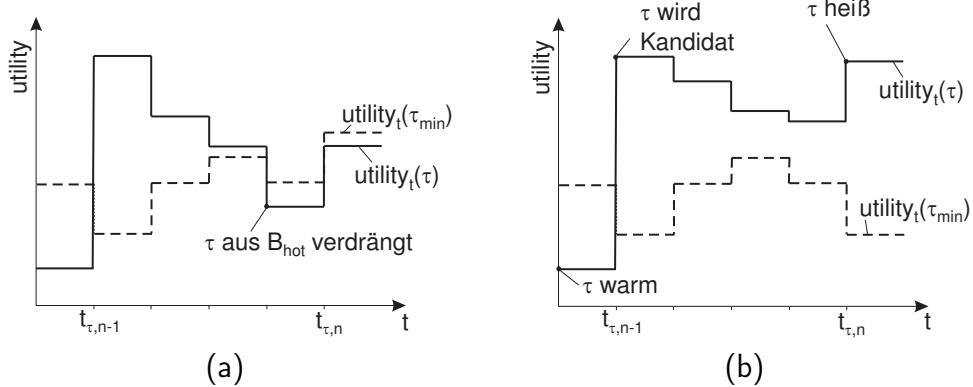


Abbildung 3.14: Verlauf des Nützlichkeitswerts eines Ziels τ über der Zeit. (a) Flüchtiges Ziel. (b) Stabiles Ziel.

im heißen Pufferbereich befindet. Dies ist vor allem dann ein Problem, wenn die Nützlichkeitsfunktion $utility(\tau)$ die Aktualität von Referenzen stark berücksichtigt, da dann der Nützlichkeitswert der Ziele rasch zwischen zwei Referenzen abnimmt. Auf der anderen Seite ist die Berücksichtigung der Aktualität wichtig, um rasch auf sich verändernde Kommunikationsmuster und wechselnde Zielpopularitäten reagieren zu können.

Die grundlegende Idee, um die unnötige Einrichtung von Direktverbindungen zu flüchtigen Zielen zu verhindern, sieht wie folgt aus. Es wird zunächst überprüft, ob der Nützlichkeitswert „stabil“ genug ist, um über einen Zeitraum von zwei aufeinanderfolgenden Referenzierungen im heißen Pufferbereich zu bleiben, ohne diesen zwischenzeitlich zu verlassen und dadurch die Direktverbindung zu verlieren. Erst nachdem ein Ziel diesen *Stabilitätstest* erfolgreich bestanden hat, wird es zum heißen Ziel. Anders ausgedrückt: Ein Ziel muss zunächst ein Mal „beweisen“, dass es das Potential hat, ein nützliches, stabiles Direktverbindungsziel zu sein, das nur mit geringer Wahrscheinlichkeit aus dem heißen Pufferbereich verdrängt wird, bevor die eingerichtete Direktverbindung tatsächlich genutzt werden kann.

Diese Unterscheidung von flüchtigen und stabilen Zielen ist der Hauptunterschied zu traditionellen Ersetzungsstrategien, wie sie beispielsweise beim Web-Caching oder der Pufferverwaltung bei Datenbanksystemen Anwendung finden. Die Pufferung einer Web-Seite oder Datenbankseite erzeugt keinen zusätzlichen Kommunikationsaufwand, da die Seite sowieso vom Web-Server geladen beziehungsweise von der Datenbank angefordert werden muss, bevor auf sie zugegriffen werden kann. Das heißt, das Laden der Seite ist grundsätzlich notwendig. Im Gegensatz dazu ist die Einrichtung einer Direktverbindung optional, da Nachrichten immer über die grundlegende Router-Hierarchie weitergeleitet werden können. Daher hat die Stabilität einer Direktverbindung großen Einfluss auf den resultierenden zusätzlichen Kommunikationsaufwand.

Die folgende formale Definition der *Bedingung für heiße Ziele* beschreibt, wann ein warmes Ziel zum heißen Ziel wird und somit ein bisher heißes Ziel aus B_{hot} verdrängt. Zunächst wird hierzu das *minimal heiße Ziel* $\tau_{\min,t}$ zum Zeitpunkt t als das Ziel aus B_{hot} definiert, das den geringsten Nützlichkeitswert besitzt (zu Gunsten einer klaren Beschrei-

bung wird der eingeschwungene Zustand betrachtet, in dem B_{hot} bereits bis zu seiner Kapazitätsgrenze besetzt ist):

$$\forall \tau \in B_{\text{hot}} : \text{utility}_t(\tau_{\min, t}) \leq \text{utility}_t(\tau) \quad (3.12)$$

Bedingung für heiße Ziele: Sei $t_{\tau, j}$ der Zeitpunkt der j -ten Referenzierung des Ziels τ . n bezeichnet die gesamte Anzahl der Referenzen von τ . Die Bedingung für heiße Ziele ist wie folgt definiert: Das Ziel τ wechselt vom warmen in den heißen Zustand zum Zeitpunkt $t_{\tau, n}$, wenn gilt:

$$\forall t \in [t_{\tau, n-1}, t_{\tau, n}] : \text{utility}_t(\tau) > \text{utility}_t(\tau_{\min, t}) \quad (3.13)$$

Das bedeutet, ein warmes Ziel wird heiß, wenn sein Nützlichkeitswert zwischen zwei aufeinanderfolgenden Referenzen ständig größer war, als der des minimal heißen Ziels zum jeweiligen Zeitpunkt. Wenn die Bedingung für heiße Ziele von einem Ziel τ zum Zeitpunkt t erfüllt wird, ersetzt τ das Ziel $\tau_{\min, t}$ aus B_{hot} . Das heißt, τ wird aus B_{warm} in B_{hot} verschoben und umgekehrt $\tau_{\min, t}$ aus B_{hot} nach B_{warm} .

Dieser Stabilitätstest kann leicht so verallgemeinert werden, dass nicht nur die letzten zwei aufeinanderfolgenden Referenzierungen betrachtet werden, sondern die letzten $minref$ aufeinanderfolgenden. In diesem allgemeinen Fall wird eine Ziellokation als ein heißes Direktverbindungsziel erachtet, wenn sein Nützlichkeitswert während der letzten $minref$ aufeinanderfolgenden Referenzen ständig größer als der jeweilige Wert des minimalen heißen Ziels war. Größere Werte von $minref$ erhöhen somit die Wahrscheinlichkeit, ein tatsächlich stabiles Ziel zu einem heißen Ziel zu erklären. Andererseits reagiert der Algorithmus damit langsamer auf Änderungen der Zielpopularitäten. Beim Stabilitätstest handelt es sich also um einen Kompromiss zwischen Reaktivität und Vermeidung flüchtiger Direktverbindungen und des aus ihnen resultierenden unnötigen Kommunikationsaufwands. Für den Sonderfall $minref = 1$ wird überhaupt kein Stabilitätstest durchgeführt; das System reagiert sehr schnell auf dynamische Änderungen. Für große Werte von $minref$ reagiert das System sehr langsam auf Popularitätsänderungen, erzeugt aber einen geringen Aufwand durch Vermeidung der Einrichtung unter Umständen flüchtiger Direktverbindungen.

B_{hot} kann in Form eines Heaps implementiert werden und ermöglicht somit das schnelle Auffinden des minimal heißen Ziels im Falle einer Ersetzung. Dieser Heap hat eine Zeitkomplexität von $O(\log|B_{\text{hot}}|)$ für Ersetzungsoperationen und besitzt somit eine ausreichend hohe Effizienz, um die relativ kleine Menge an heißen Zielen auch für hohe Nachrichtenraten zu verwalten. Es ist zu beachten, dass eine hohe Effizienz ein kritischer Faktor für die praktische Realisierung des vorgeschlagenen Algorithmus ist, da es sich um einen so genannten Online-Algorithmus handelt, der in Echtzeit relevante Ziele für Direktverbindungen selektiert, wann immer eine Nachricht weitergeleitet wird.

Bisher wurde nur eine beschränkte Größe des heißen Pufferbereichs angenommen. Allerdings ist auch die Größe des warmen Pufferbereichs B_{warm} inhärent durch den Speicher eines Routers beschränkt. Daher kann es auch hier zu Situationen kommen, in denen ein warmes Ziel durch ein vormals kaltes Ziel zu ersetzen ist. Typischerweise ist $\text{maxsize}_{B_{\text{warm}}}$ viel größer als $\text{maxsize}_{B_{\text{hot}}}$ und kann tausende von Einträgen enthalten. Da-

her wird für $\text{maxsize}_{B_{\text{hot}}}$ eine so genannte Least-Recently-Used-Ersetzungsstrategie (LRU) eingesetzt. Diese besitzt eine Zeitkomplexität von $O(1)$ für Ersetzungsoperationen. Zu beachten ist allerdings, dass mit einer LRU-Strategie nicht garantiert ist, dass immer das Ziel mit dem geringsten Nützlichkeitswert ersetzt wird. Andererseits ist es vor allem bei einem großen Puffer sehr wahrscheinlich, dass zumindest ein Ziel mit einem sehr gerin- gen Nützlichkeitswert verdrängt wird, da Ziele, die für eine lange Zeit nicht referenziert wurden, gleichzeitig geringe Nützlichkeitswerte aufweisen. Zu beachten ist ferner, dass ein Ziel, das aus $\text{maxsize}_{B_{\text{warm}}}$ verdrängt wurde, seine bisher angesammelte Referenzhis- torie verliert und das nächste Mal wie ein bisher noch nie referenziertes Ziel behandelt wird.

Implementierung des Algorithmus zur adaptiven Auswahl von Direktverbindungen

Basierend auf dem Entwurf des Algorithmus zur adaptiven Selektion von Direktverbin- dungen wird im Folgenden die Umsetzung dieses Algorithmus im Detail vorgestellt. Al- gorithmus 3.4 zeigt die Operationen, die eine Geocast-Router r beim Weiterleiten einer Nachricht an das Zielgebiet τ ausführt, um die gewählten Direktverbindungen an die ak- tuelle Popularität der Zielgebiete anzupassen.

Um den aktuellen Nützlichkeitswert entsprechend Gleichung 3.10 zu bestimmen, wird eine Uhr zur Berechnung von $F(t' - t)$ benötigt. Grundsätzlich kann diese Berech- nung auf Basis einer physischen oder logischen Uhr erfolgen. Bei der Umsetzung wurde eine logische Uhr gewählt, die beim Weiterleiten einer Nachricht durch r inkrementiert wird. Bei Verwendung einer physischen Uhr wäre es für den Betreiber schwieriger, den Parameter λ der Funktion $F(t' - t) = (\frac{1}{2})^{\lambda(t' - t)}$ entsprechend des gewünschten Einflusses der Referenzierungshäufigkeit und Referenzierungsaktualität zu setzen. Bei einer physi- schen Uhr hängt der jeweilige Einfluss von der tatsächlichen Nachrichtenrate ab, die sich im Laufe der Zeit signifikant ändern und sich zudem von Router zu Router unterscheiden kann.

Wann immer eine Nachricht an eine Ziellokation τ weitergeleitet wird, für die noch kein Puffereintrag existiert, wird ein entsprechender neuer Eintrag angelegt und als neu- es warmes Ziel in den warmen Pufferbereich B_{warm} aufgenommen (Algorithmus 3.4, Zei- len 4–9). Falls B_{warm} bereits bis zu seiner Kapazitätsgrenze gefüllt ist, wird hierbei ein an- deres warmes Ziel aus B_{warm} mit Hilfe einer LRU-Strategie verdrängt.

Wurde dagegen von r bereits eine Nachricht an die Ziellokation τ weitergeleitet, die Bedingung für heiße Ziele von τ aber bisher noch nicht erfüllt, dann überprüft r diese Be- dingung erneut um festzustellen, ob nun aufgrund der gestiegenen Popularität von τ eine Direktverbindung zu τ eingerichtet werden sollte. Dafür muss der Nützlichkeitswert von τ entsprechend Gleichung 3.13 zwischen den zwei letzten aufeinanderfolgenden Refe- renzen von τ ständig größer gewesen sein, als der Wert des minimalen heißen Ziels zum jeweiligen Zeitpunkt (Algorithmus 3.4, Zeilen 16–17).⁷ Zu diesem Zweck speichert r , ob der Nützlichkeitswert beim letzten Zugriff (vgl. Abbildung 3.14(b): $t_{\tau, n-1}$) größer als der Wert des minimal heißen Ziels war. Wenn das der Fall ist, dann ist τ ein *Kandidat*, der bei der nächsten Referenz tatsächlich zum heißen Ziel werden kann. Entsprechend wird ein

⁷Eine verallgemeinerte Version dieses Algorithmus könnte nicht nur die letzten zwei sondern wie im vorigen Abschnitt beschrieben die letzten i aufeinander folgenden Referenzen betrachten.

Kandidatenfeld für τ gesetzt (Algorithmus 3.4, Zeilen 8, 26). Bei der nächsten Referenz auf τ überprüft r die Bedingung für heiße Ziele erneut und zwar unmittelbar vor der Referenz und zum Referenzierungszeitpunkt (Abbildung 3.14(b)): $t_n - 1 = t_{\text{now}} - 1$ bzw. $t_{\tau,n} = t_{\text{now}}$. Wenn das zutrifft und τ ein Kandidat ist, dann wird τ zum heißen Ziel. Entsprechend wird τ in den heißen Pufferbereich verschoben (Algorithmus 3.4, Zeile 22), wobei er das aktuell minimal heiße Ziel in den warmen Pufferbereich verdrängt (Algorithmus 3.4, Zeile 20). Diese Auswertung der Bedingung für heiße Ziele nutzt die Tatsache aus, dass der Nützlichkeitswert von τ zwischen zwei aufeinanderfolgenden Referenzen auf τ entsprechend der Gleichung 3.10 monoton abnimmt. Ziele, die nicht referenziert werden, behalten ihre durch den Nützlichkeitswert definierte Ordnung bei. Daher ist es ausreichend, den Nützlichkeitswert von τ nur zum Zeitpunkt der letzten Referenzierung und zum aktuellen Zeitpunkt mit dem Wert des minimalen heißen Gebiets zu vergleichen. Wäre diese Eigenschaft nicht gegeben, so müsste der Wert jedes Kandidaten bei *jeder* Referenzierung – nicht nur bei der Referenzierung des Kandidaten selbst – mit dem Wert des minimal heißen Gebiets verglichen werden. Dies würde zu einer wesentlichen Erhöhung der Zeitkomplexität des Algorithmus führen, die wie bereits geschildert für einen Online-Algorithmus kritisch ist. Mit der vorgestellten Umsetzung hat der Algorithmus weiterhin eine Zeitkomplexität von $O(\log |B_{\text{hot}}|)$.

Sollte τ zum Zeitpunkt des Zugriffs bereits heiß und somit im heißen Pufferbereich platziert sein, so muss nur sein Nützlichkeitswert und der letzte Referenzierungszeitpunkt angepasst werden (Algorithmus 3.4, Zeile 29).

```

1  On receiving message with target area  $\tau$  do
2       $t_{\text{now}} \leftarrow t_{\text{now}} + 1$  // logische Uhr inkrementieren
3      if no entry  $e \in B$  with  $e.\text{target} = \tau$  exists then
4          // 1st reference of  $\tau$ 
5          create new buffer entry  $e$  with
6               $e.\text{target} \leftarrow \tau$ ;  $e.\text{shortcut} \leftarrow \text{undef}$ 
7               $e.\text{utility} \leftarrow \text{weight}(\tau)$ ;  $e.t_{n-1} \leftarrow t_{\text{now}}$ 
8               $e.\text{candidate} \leftarrow e.\text{utility} > \text{utility}_{t_{\text{now}}}(\tau_{\min})$ 
9          put  $e$  into  $B_{\text{warm}}$  // LRU-Ersetzungsstrategie
10         else
11             // 2nd, 3rd, ... reference of  $\tau$ 
12              $e \leftarrow$  buffer entry  $\in B$  with  $e.\text{target} = \tau$ 
13              $\text{newutility} \leftarrow e.\text{utility} \times F(t_{\text{now}} - e.t_{n-1}) + \text{weight}(\tau)$ 
14             if  $e \in B_{\text{warm}}$  then
15                 // Überprüfung, ob  $\tau$  die Bedingung für heiße Ziellokationen erfüllt
16                 if  $e.\text{candidate}$  and  $e.\text{utility} > \text{utility}_{t_{\text{now}}-1}(\tau_{\min})$  and
17                      $\text{newutility} > \text{utility}_{t_{\text{now}}}(\tau_{\min})$  then
18                         //  $\tau$  ist heiß; ersetze  $\tau_{\min}$  durch  $\tau$ 
19                          $e' \leftarrow$  buffer entry  $\in B_{\text{hot}}$  with  $e'.\text{target} = \tau_{\min}$ 
20                         move  $e'$  from  $B_{\text{hot}}$  to  $B_{\text{warm}}$ 
21                          $e'.\text{candidate} \leftarrow \text{false}$ 
22                         move  $e$  from  $B_{\text{warm}}$  to  $B_{\text{hot}}$ 

```

```

23      set up shortcut to  $\tau$  (set  $e.shortcut$ )
24      else
25          //  $\tau$  noch nicht heiß; erneuter Versuch bei nächster Referenzierung
26           $e.candidate \leftarrow newutility > utility_{t_{now}}(\tau_{\min})$ 
27      fi
28      fi
29       $e.utility \leftarrow newutility; e.t_{n-1} \leftarrow t_{now}$ 
30      fi
31  od

```

Algorithmus 3.4: Algorithmus zur adaptiven Selektion von Direktverbindungen, ausgeführt durch Geocast-Router r

Rekursive Referenzierung

Wenn man den Vermittlungsalgorithmus betrachtet, so stellt man fest, dass nicht nur direkte Verbindungen zu unmittelbar adressierten Zielgebieten den Pfad zum designierten Router des jeweiligen Zielgebiets verkürzen; jede andere Verbindung zu einem Router auf dem Pfad zum designierten Router des Zielgebiets – ausgenommen Verbindungen zum Vater- oder einem Kind-Router des aktuellen Routers – verkürzt den Pfad ebenfalls. Betrachtet man beispielsweise eine Nachricht adressiert an New York City, die vom Staaten-Router in Miami weitergeleitet wird, so ist sicherlich die ideale Verbindung mit dem kürzesten resultierenden Pfad eine Direktverbindung vom Miami- zum New-York-City-Router. Aber auch Verbindungen vom Miami- zum Staaten-Router von New-York oder dem Landes-Router der USA verkürzen den Pfad, da beide beispielsweise den Staaten-Router von Florida umgehen. Solche Direktverbindungen, die nicht direkt zum eigentlich adressierten Zielgebiet führen, werden im Folgenden *indirekte Verbindungen* (engl. *indirect shortcut*) genannt.

Des Weiteren sind Situationen denkbar, in denen größere Gebiete, die selbst nie direkt adressiert werden, eine höhere Popularität als die eigentlich adressierten kleineren Gebiete aufweisen. Wenn beispielsweise von New York City aus an jede Stadt in Florida eine einzelne Nachricht gesendet wird, so sind die Städte selbst alle relativ unpopulär. Der Staat Florida, obwohl nie direkt adressiert, ist dagegen aus Sicht des New-York-City-Routers ein sehr populäres Ziel, da viele Nachrichten an Gebiete in Florida geschickt werden.

Um die Nachrichtenweiterleitung auch in solchen Situationen durch indirekte Verbindungen optimieren zu können, wird die im Folgenden beschriebene so genannte *rekursive Referenzierung* durchgeführt. Erhält ein Router r eine Nachricht zur Weiterleitung an das Zielgebiet τ , so referenziert er nicht nur das Zielgebiet τ selbst, sondern rekursiv alle Ziele, die auf einem Pfad in der Lokationshierarchie vom Zielgebiet zum Dienstgebiet $s(r)$ von r liegen, beginnend bei der Lokation τ . Ausgenommen sind Vater- und Kindlokationen des Dienstgebiets von r , da zu diesen bereits durch die Router-Hierarchie Direktverbindungen bestehen. Beispielsweise referenziert der Staaten-Router von Miami (/us/miami) die folgenden Gebiete, wenn er eine an New York City (/us/newyork/newyorkcity) adressierte Nachricht weiterleitet: New York City (/us/newyork/newyorkcity), New York State (/us/newyork) und USA (/us). Florida wird nicht rekursiv referenziert.

siv referenziert, da der Miami-Router über die Hierarchie bereits direkt mit dem Staaten-Router von Florida verbunden ist.

In manchen Situationen ist es allerdings sinnvoll, die rekursive Referenzierung nicht auf dem vollständigen Pfad zwischen τ und $s(r)$ durchzuführen, insbesondere wenn r bereits Direktverbindungen zu Lokationen auf dem Hierarchie-Pfad zwischen τ und $s(r)$ eingerichtet hat. Betrachtet man ein Beispiel, in dem der Staaten-Router r von Florida bereits eine Direktverbindung zum Staaten-Router von New York eingerichtet, so wäre in diesem Fall für eine Nachricht von Florida nach New York City eine zusätzliche Direktverbindung zum Landes-Router der USA nutzlos; eine solche Nachricht würde von r über die Direktverbindung zum Staaten-Router von New York weitergeleitet und umginge somit die weniger effizienten Direktverbindungen zum Landes-Router der USA, da dieser in der Hierarchie weiter vom Zielgebiet New York City entfernt ist als der New York Staaten-Router. Wir sagen, die Direktverbindung vom Miami Staaten-Router zum Staaten-Router von New York *verdeckt* die Direktverbindung vom Miami Staaten-Router zum Landes-Router der USA für eine Nachricht von Miami zu jedem Ziel im Staate New York. Um in solchen Situationen nicht unnötige Direktverbindungen einzurichten, wird die rekursive Referenzierung von Gebieten zwischen τ und $s(r)$ gestoppt, sobald eine Lokation referenziert wird, zu der bereits eine Direktverbindung besteht. Im Beispiel würde die rekursive Referenzierung beim Staaten-Router von New York gestoppt, da der Miami-Router eine Direktverbindung zum diesem Router besitzt. Beim Empfang einer Nachricht an das Zielgebiet New York City referenziert der Miami-Staaten-Router also rekursiv nur die Lokationen `/us/newyork/newyorkcity` und `/us/newyork`.

Mechanismen zur Aktualisierung von Direktverbindungen

In diesem Abschnitt werden Mechanismen entworfen, um das durch adaptive Direktverbindungen erweiterte Overlay-Netz robust gegen Router- und Kommunikationsfehler zu machen. Solche Fehler können sowohl zur Partitionierung der Router-Hierarchie als auch zu ungültigen Direktverbindungen führen. Mechanismen zur Behandlung der Partitionierung der Hierarchie wurden bereits in Abschnitt 3.6.1.3 eingeführt. In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf der Aktualisierung ungültiger Direktverbindungen, das heißt, von Direktverbindungen mit veralteten Ziel-Router-UDP-Adressen.

Wenn ein Router aus dem Overlay-Netz geplant oder fehlerbedingt austritt, so werden alle Direktverbindungen ungültig, die diesen Router als Ziel-Router verwenden. Daher muss zunächst sichergestellt werden, dass solche ungültigen Direktverbindungen durch die Router erkannt und entsprechend markiert werden. Die Aktualisierung einer solchen als ungültig markierten Direktverbindung erfolgt im laufenden Betrieb automatisch. Sobald eine Nachricht über eine als ungültig markierte Direktverbindung weitergeleitet werden soll, erfolgt die Weiterleitung zunächst über die Router-Hierarchie, als ob keine Direktverbindungen bestünden. Auf diese Nachricht wird wie beim initialen Einrichten der Direktverbindung eine `ParentRouterSolicited`-Nachricht aufgesattelt, die dann vom neuen designierten Router der Direktverbindungsziellokation beantwortet wird und so die Direktverbindung aktualisiert. Somit wird gleichzeitig sichergestellt, dass nur ungültige Direktverbindungen aktualisiert werden, die tatsächlich noch heiß sind und benutzt werden; eine abgekühlte und nicht mehr als heiß erachtete Direktverbindung, die ungül-

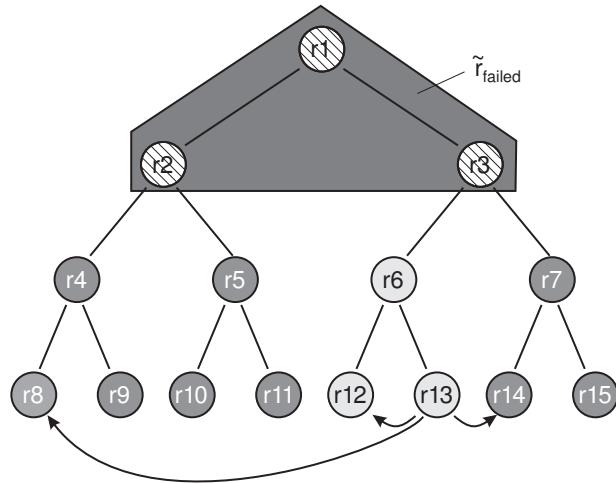


Abbildung 3.15: Erkennung von Router-Fehlern und Invalidierung von Direktverbindungen.

tig wird, wird dagegen nicht aktualisiert.

Das Verfahren zur Erkennung von ungültigen Direktverbindungen geht wie folgt vor. Wie in Abschnitt 3.6.1.3 beschrieben, überwacht jeder Router die Verfügbarkeit seiner Nachbarn in der Router-Hierarchie, das heißt, seinen Vater- und seine Kind-Router. Der Fehler eines physischen Routers, im Folgenden durch $\tilde{r}_{\text{failed}}$ bezeichnet, wird daher schließlich durch alle (verfügbareren) Nachbarn erkannt.

Da $\tilde{r}_{\text{failed}}$ im Allgemeinen mehrere virtuelle Router implementiert, kann dabei von den Nachbarn der Ausfall unterschiedlicher *virtueller* Router erkannt werden, je nachdem, ob ein Vater- oder Kind-Router des ausgefallenen physischen Routers dessen Fehler feststellt. Stellt der Vater-Router von $\tilde{r}_{\text{failed}}$ den Ausfall fest, so ist aus Sicht des Vater-Routers der virtuelle Router r_{failed} mit dem Dienstgebiet $s(r_{\text{failed}}) = s(\tilde{r}_{\text{failed}})$ ausgefallen. Stellt dagegen ein Kind-Router r_{child} des ausgefallenen physischen Routers dessen Fehler fest, so ist aus Sicht des Kind-Routers der virtuelle Router r_{failed} mit dem Dienstgebiet $s(r_{\text{failed}}) = \text{parent}(s(r_{\text{child}}))$ ausgefallen. Das heißt, ein virtueller Router wird immer den Ausfall des benachbarten virtuellen Routers in der Hierarchie feststellen. In Abbildung 3.15 erkennt zum Beispiel der virtuelle Router r_6 den Ausfall des Routers r_3 während aus Sicht von r_4 der Router r_2 ausgefallen ist.

Jeder Router, der einen Fehler eines benachbarten Routers erkannt hat, leitet eine RouterFailed-Nachricht $\text{RouterFailed}(r_{\text{failed}})$ an alle seine verfügbaren Nachbarn weiter (siehe Algorithmus 3.5, Zeilen 3 und 8, 12). Diese Nachricht enthält auch das Dienstgebiet $s(r_{\text{failed}})$ von r_{failed} , das aus Sicht des erkennenden Routers nicht mehr erreichbar ist. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei $s(r_{\text{failed}})$ wie oben beschrieben um das Dienstgebiet des benachbarten *virtuellen* Routers handelt, der vom ausgefallenen physischen Router $\tilde{r}_{\text{failed}}$ implementiert wird. Der erfolgreiche Empfang der RouterFailed-Nachricht wird in jedem Weiterleitungsschritt durch den jeweils empfangenden Router bestätigt.

Ein Router, der eine RouterFailed-Nachricht erhält, markiert die entsprechenden Direktverbindungen als ungültig (Algorithmus 3.5, Zeilen 14–17) und leitet die Nachricht wiederum an alle seine Nachbarn ausschließlich dem Router, von dem die Nachricht empfangen wurde, weiter (Algorithmus 3.5, Zeile 13). Das Overlay-Netz wird somit entlang der Kanten der Router-Hierarchie mit der RouterFailed-Nachricht geflutet, und es werden somit alle verfügbare Router über den Fehler von $\tilde{r}_{\text{failed}}$ informiert.

```

1 On failure of child router  $\tilde{r}_{\text{child}}$  do
2    $\tilde{r}$  becomes designated router of each location  $l \leq s(\tilde{r}_{\text{child}})$ 
3   send RouterFailed message with area  $s(\tilde{r}_{\text{child}})$  to parent and child routers
4   od
5
6   On failure of parent router  $\tilde{r}_{\text{parent}}$  do
7     register  $\tilde{r}$  with new parent (bootstrap process)
8     send RouterFailed message with area  $\text{parent}(s(\tilde{r}))$  to child routers
9   od
10
11  On receiving RouterFailed message  $m$  concerning failed
12    router  $r_{\text{failed}}$  with service area  $s(r_{\text{failed}})$  from  $\tilde{r}_{\text{prev}}$  do
13      forward  $m$  to parent and children except for  $\tilde{r}_{\text{prev}}$ 
14      foreach shortcut  $s$  with target location  $\tau_s$  do
15        if  $\tau_s \geq s(r_{\text{failed}}) \geq s(r)$  or  $s(r) \geq s(r_{\text{failed}}) \geq \tau_s$  or
16           $(\tau_s \not\geq s(r) \text{ and } s(r) \not\geq \tau_s \text{ and } (s(r_{\text{failed}}) \geq s(r) \text{ or } s(r_{\text{failed}}) \geq \tau_s))$  then
17            invalidate shortcut to  $\tau_s$ 
18        fi
19      od
20  od

```

Algorithmus 3.5: Aktualisierung von ungültigen adaptiven Direktverbindungen

Es ist bisher weiterhin offen, welche Direktverbindungen r beim Empfang der Nachricht RouterFailed(r_{failed}) invalidieren muss. Angenommen, r_{failed} ist virtueller Router des Gebiets $s(r_{\text{failed}})$. Dann müssen offensichtlich alle Direktverbindungen mit dem Ziel $s(r_{\text{failed}})$ invalidiert werden. Das heißt, r kennzeichnet die Direktverbindung zu $s(r_{\text{failed}})$ als ungültig, wenn eine solche in seinem Zielgebietspuffer existiert.

Diese Invalidierung alleine ist allerdings nicht ausreichend. Einerseits kann der ausgefallene physische Router $\tilde{r}_{\text{failed}}$ nicht nur den virtuellen Router r_{failed} sondern noch weitere virtuelle Router implementiert haben, die somit gleichzeitig ausgefallen sind. Andererseits konnte $\tilde{r}_{\text{failed}}$ unter Umständen weitere RouterFailed-Nachrichten, die über den Ausfall weiterer Router informieren aufgrund seines Fehlers nicht mehr an r weiterleiten. r kann sich daher über die Verfügbarkeit von virtuellen Routern nicht sicher sein, die über r_{failed} über die Hierarchie erreichbar sind, da RouterFailed-Nachrichten über die Hierarchie weitergeleitet werden. Daher muss r alle Direktverbindungen zu Zielen invalidieren, bei denen r_{failed} auf einem Pfad in der virtuellen Router-Hierarchie von r zum Direktverbindungszielrouter liegt.

Bei dem in Abbildung 3.15 dargestellten Beispiel muss r_{13} die Direktverbindungen

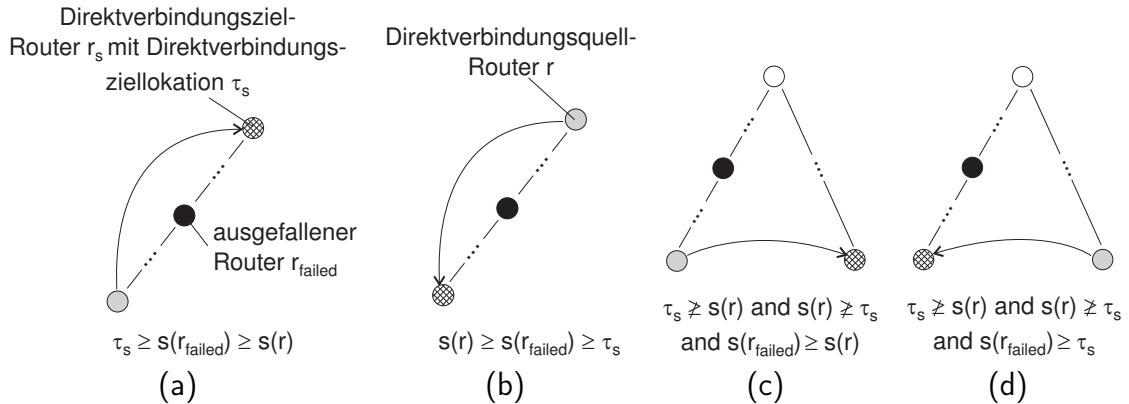


Abbildung 3.16: Invalidierung ungültiger Direktverbindungen.

zu den Routern r_8 und r_{14} invalidieren, da der nicht mehr verfügbare Router r_{failed} RouterFailed-Nachrichten daran hindern könnte, von den dunkelgrau hinterlegten Routern zu den hellgrau hinterlegten Routern zu gelangen. Ausfälle von r_8 oder r_{13} würde somit für r_{13} unentdeckt bleiben. Die Direktverbindung zu Router r_{12} ist dagegen weiterhin gültig, da eine RouterFailed-Nachricht bezüglich r_{12} nicht r_{failed} traversieren und somit sicher bei r_{13} ankommen würde. In diesem Beispiel führt der Ausfall von r_{failed} zu verschiedenen RouterFailed-Nachrichten, je nachdem, welcher Router den Ausfall feststellt. r_4 und r_5 versenden in ihren Sub-Hierarchien jeweils die Nachricht RouterFailed(r_2); r_6 und r_7 versenden in ihren Sub-Hierarchien jeweils die Nachricht RouterFailed(r_3).

Details zur Erkennung von ungültigen Direktverbindungen sind in Algorithmus 3.5 dargestellt. Sobald Router r eine RouterFailed-Nachricht erhält, leitet er diese zunächst wie beschrieben an alle Nachbarn in der Hierarchie weiter. Um festzustellen ob eine bestimmte Direktverbindung, bezeichnet durch s , invalidiert werden muss, stellt r zunächst fest, ob der ausgefallene Router auf einem Pfad in der virtuellen Router-Hierarchie von r zum Ziel-Router von s liegt (Algorithmus 3.5 Zeilen 15–16). Eine Direktverbindung muss in den vier in Abbildung 3.16 dargestellten Fällen invalidiert werden. In den Fällen (a) und (b) ist der Direktverbindungsquell-Router r ein Vorfahre des Ziel-Routers in der Router-Hierarchie oder umgekehrt, und der nicht verfügbare Router liegt zwischen dem Quell- und dem Ziel-Router. In den Fällen (c) und (d) liegt der nicht verfügbare Router auf einem Pfad in der Hierarchie, der den Quell- und Ziel-Router über den kleinsten gemeinsamen Vorfahren (Supremum) in der Hierarchie verbindet. Da symbolische Adressen die räumliche Inklusionsbeziehung $<$ zwischen Lokationen reflektieren, können effiziente Präfix-Vergleichsoperationen verwendet werden, um die dargestellten Bedingungen auszuwerten.

3.6.2.3 Optimierte Vermittlung im Zielgebiet

Die Einführung von Direktverbindungen optimiert nur die erste Phase der Nachrichtenvermittlung, in der Nachrichten zum designierten Router des Zielgebiets weitergeleitet werden. Die zweite Phase der Nachrichtenvermittlung, in der die Nachricht an alle

Geocast-Router weitergeleitet wird (vgl. Abschnitt 3.6.1.4), deren Dienstgebiete innerhalb des Zielgebiets liegen, bleibt von dieser Optimierung unberührt. In diesem Abschnitt soll eine Optimierung dieser zweiten Phase betrachtet werden.

Phase 2 beginnt, nachdem der designierte Router des Zielgebiets die Nachricht am Ende der ersten Phase erhalten hat. Dieser Router definiert die Wurzel eines Teilbaums, der alle Router enthält, deren Dienstgebiete im Zielgebiet liegen. Um die Nachricht in der zweiten Phase an all diese Router weiterzuleiten, wird die Nachricht entsprechend Algorithmus 3.2 jeweils von jedem Router an alle seine Kind-Router weitergeleitet. Dieses Vorgehen kann allerdings in Fällen zu Problemen führen, in denen ein Geocast-Router viele Kind-Router besitzt – die Anzahl der Router, an die ein Router r in Phase 2 Nachrichten weiterleitet, wird im Folgenden als der *Fan-Out* $f(r)$ des Routers bezeichnet. Ist der Fan-Out eines Routers hoch, so besteht die Gefahr der Überlastung seiner Netzanbindung. Hierbei ist zu beachten, dass logische Verbindungen zwischen Geocast-Routern im Overlay-Netz typischerweise auf eine oder wenige physische Netzanbindungen des Routers abgebildet werden. Sendet zum Beispiel ein Stadt-Router 500 Nachrichten an seine Kind-Router auf Straßenebene, so kann dies seine Netzanbindung stark belasten oder sogar überlasten. Um eine solche Überlast zu vermeiden, wird folgende Optimierung der Phase 2 vorschlagen.

Die Grundidee des Ansatzes besteht darin, den Fan-Out jedes Routers r auf einen kleinen Wert $f(r) \geq 2$ zu beschränken, so dass seine Netzanbindung nicht überlastet wird. Verschiedene Router können dabei entsprechend ihrer Netzanbindung und typischen Nachrichtenlast mit verschiedenen individuellen Fan-Out-Werten konfiguriert werden.

Ist der Fan-Out-Wert kleiner als die Anzahl der Kinder eines Routers im Router-Baum, so ist mit dem ursprünglichen Weiterleiterungsalgorithmus der Phase 2, der Nachrichten nur vom Vater an seine Kinder weiterleitet, offensichtlich nicht mehr sichergestellt, dass jeder Kind-Router die Nachricht von seinem Vater bekommen kann. Daher muss dieser Algorithmus modifiziert werden. Hierzu führen wir zunächst so genannte *Weiterleitungsgruppen* (engl. forwarding group) ein. Eine Weiterleitungsgruppe besteht aus einer sortierten Liste (r_1, \dots, r_n) von Geschwister-Routern. Die Sortierung kann zum Beispiel anhand der UDP-Adressen (IP-Adresse & Portnummer) der Geocast-Router erfolgen. Die Weiterleitungsgruppen bilden dabei eine Partition der Geschwister-Router.

Ein Geocast-Router leitet Nachrichten sowohl an einen Teil seiner Kinder als auch an einen Teil seiner Geschwister innerhalb seiner Weiterleitungsgruppe weiter. Ziel ist es hierbei, die Pfadlängen im resultierenden Verteilbaum – der nun nicht mehr dem ursprünglichen Router-Baum entspricht – möglichst klein zu halten. Ein einfaches sequentielles Weiterleiten innerhalb einer Weiterleitungsgruppe ist somit für große Weiterleitungsgruppen (kleine Fan-Out-Werte) nicht sinnvoll. Vielmehr teilt der optimierte Weiterleiterungsalgorithmus den einem Router zur Verfügung stehenden Fan-Out so auf seine Kinder und seine Weiterleitungsgruppe auf, dass lange sequentielle Pfade vermieden werden.

Algorithmus 3.6 zeigt den optimierten Weiterleiterungsalgorithmus im Detail, der von jedem Router r ausgeführt wird. Zunächst gehen wir davon aus, dass jede Nachricht eine Sicht auf die Weiterleitungsgruppe des weiterleitenden Routers r enthält. Diese Sicht wird als Teil der Nachricht an r übertragen (weiter unten wird beschrieben, wie diese

Sicht effizient übertragen werden kann, ohne die Größe der Nachricht signifikant zu erhöhen). r entfernt sich zunächst aus der Weiterleitungsgruppe, indem er das erste Element entfernt (Algorithmus 3.6, Zeile 3). Dann teilt r seinen Fan-Out $d(r)$ proportional entsprechend der Größen der Weiterleitungsgruppe und seiner Kindermenge auf (Algorithmus 3.6, Zeilen 6–7). Hierbei muss sichergestellt werden, dass mindestens eine Nachricht an ein Kind von r und mindestens eine Nachricht an einen Geschwister-Router der Weiterleitungsgruppe geschickt werden kann (Algorithmus 3.6, Zeilen 8–15). Durch einen geforderten Mindestwert für den Fan-Out von zwei ist diese Bedingung in jedem Fall erfüllbar. Im nächsten Schritt partitioniert r die Weiterleitungsgruppe und die Liste seiner Kind-Router entsprechend der ermittelten Fan-Out-Werte in f_{fwdgrp} beziehungsweise f_{children} neue Weiterleitungsgruppen (Algorithmus 3.6, Zeilen 16–19). An den jeweils ersten Router jeder Weiterleitungsgruppe sendet r eine Kopie der Nachricht zusammen mit der Sicht auf die entsprechende Gruppe (Algorithmus 3.6, Zeilen 21–23).

```

On receiving geocast message  $m$  with forwarding group  $F = (r_1, \dots, r_n)$ 
2   // Router entfernt sich selbst aus Weiterleitungsgruppe
     $F \leftarrow F \setminus r$ 
4   // Fan-Out proportional zwischen den Kindern
   // und eigener Weiterleitungsgruppe aufteilen
6    $f_{\text{children}} \leftarrow \text{round}(f(r) \frac{|\text{children}(r)|}{|\text{children}(r)| + |F|})$ 
     $f_{\text{fwdgrp}} \leftarrow \text{round}(f(r) \frac{|F|}{|\text{children}(r)| + |F|})$ 
8   if  $f_{\text{children}} = 0$  then
     $f_{\text{children}} \leftarrow 1$ 
10   $f_{\text{fwdgrp}} \leftarrow f_{\text{fwdgrp}} - 1$ 
fi
12  if  $f_{\text{fwdgrp}} = 0$  then
     $f_{\text{fwdgrp}} \leftarrow 1$ 
14   $f_{\text{children}} \leftarrow f_{\text{children}} - 1$ 
fi
16  // Weiterleitungsgruppe in  $f_{\text{fwdgrp}}$  Teile partitionieren
    split  $F = (r_1, \dots, r_n)$  into  $f_{\text{fwdgrp}}$  groups  $F_1, \dots, F_m$ 
18  // Kinder in  $f_{\text{children}}$  Weiterleitungsgruppen aufteilen
    split  $\text{children}(r)$  into  $f_{\text{children}}$  groups  $C_1, \dots, C_n$ 
20  // Nachricht an ersten Router jeder Gruppe weiterleiten
    foreach group  $g \in \{F_1, \dots, F_m, C_1, \dots, C_n\}$  do
22      send  $m$  and  $g$  to router  $r_1$  from  $g = (r_1, \dots, r_i)$ 
    od
24 od

```

Algorithmus 3.6: Optimierter Vermittlungsalgorithmus für Phase 2

Abbildung 3.17 zeigt ein Beispiel des optimierten Weiterleitungsprozesses mit beschränktem Router-Fan-Out in Phase 2. Hier wird angenommen, dass der Fan-Out jedes Routers auf zwei beschränkt ist. Der erste Router teilt seine Kinder entsprechend in zwei Weiterleitungsgruppen auf. Die weiteren Router senden jeweils eine Nachricht an ihre

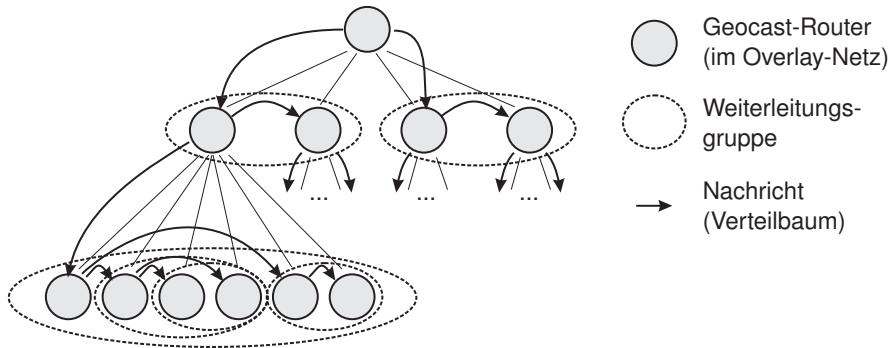


Abbildung 3.17: Nachrichtenweiterleitung mit beschränktem Router-Fan-Out.

Weiterleitungsgruppe und eine Nachricht an einen Kind-Router. Router der Blatt-Ebene leiten je zwei Nachrichten an Geschwister weiter.

Um eine konsistente Weiterleitung zu ermöglichen, muss jeder Router die gleiche Sicht auf seine Geschwister-Router besitzen. Das heißt, jeder Router r der Gruppe $(r_1, \dots, r, \dots, r_n)$ muss dieselben Router in derselben Ordnung kennen. Im Falle des durch statische Direktverbindungen optimierten Overlay-Netzes (Abschnitt 3.6.2.1) ist diese Bedingung relativ leicht zu erfüllen, da jeder Router alle seine Geschwister-Router kennt. Jeder Router kann somit alle Geschwister konsistent ordnen. In der Nachricht muss dann nur die Position des jeweils ersten und letzten Routers in der wohlbekannten sortierten Liste der Geschwister-Router mit der Nachricht mitgeschickt werden. Ist die Liste der Geschwister den Routern nicht implizit bekannt, so kann mit jeder Nachricht in Phase 2 die jeweilige komplette Gruppensicht im Kopf der Nachricht mitgeschickt werden.

3.7 Vermittlung in verbandsbasierten Overlay-Netzen

Das in Abschnitt 3.6 beschriebene Overlay-Netz und die entsprechenden Algorithmen zur Vermittlung von symbolisch adressierten Geocast-Nachrichten sind auf baumförmige symbolische Lokationsmodelle zugeschnitten. Überlappende symbolische Lokationen, wie sie in einem Lokationsverband möglich sind (vgl. Abschnitt 2.4.2.2), sind mit einem solchen Modell nicht darstellbar. In diesem Abschnitt wird ein weiteres Geocast-Vermittlungsverfahren auf Basis eines Overlay-Netzes vorgestellt, das symbolische Lokationsmodelle mit überlappenden Lokationen, insbesondere das in Abschnitt 2.4.2.2 vorgestellte verbandsbasierte symbolische Lokationsmodell, unterstützt [DBR05].

3.7.0.4 Overlay-Netzarchitektur

Das grundlegende Konzept zur Strukturierung des verbandsbasierten Overlay-Netzes entspricht dem Konzept des in Abschnitt 3.6 vorgestellten baumförmigen Overlay-Netzes. Das Overlay-Netz besteht aus einer Menge an virtuellen Geocast-Routern. Virtuelle Router sind genau einer Lokation des Lokationsmodells zugeordnet; umgekehrt ist jeder Lokation genau ein virtueller Router zugeordnet. Die virtuellen Router sind für die Wei-

terleitung von Nachrichten an die entsprechende Lokation – ihr Dienstgebiet – verantwortlich. Die Verbindungen zwischen diesen virtuellen Routern entsprechen der Inklusionsbeziehung des Lokationsmodells. Das heißt, die Struktur des virtuellen Overlay-Netzes entspricht in diesem Fall dem Lokationsverband anstatt wie bisher der baumförmigen Lokationshierarchie. Formal wird die Verbandsstruktur des Overlay-Netzes durch die Vorgänger-/Nachfolgerrelation $\prec \in R \times R$ auf virtuellen Routern bestimmt, die entsprechend der auf Lokationen definierten Halbordnung $\prec \in L \times L$ folgendermaßen definiert ist: Es gilt $r_1 \prec r_2$ gdw. $s(r_1) \prec s(r_2)$. Gleichfalls können die Definitionen der Vater- und Kind-Lokationen sowie des Supremums und Infimums auf den Router-Verband übertragen werden:

- $r_{\text{parent}} \in \text{parents}(r)$ gdw. $s(r_{\text{parent}}) \in \text{parents}(s(r))$
- $r_{\text{child}} \in \text{children}(r)$ gdw. $s(r_{\text{child}}) \in \text{children}(s(r))$
- $r_{\text{supremum}} = \sup_{r_1, r_2}$ gdw. $s(r_{\text{supremum}}) = \sup_{s(r_1), s(r_2)}$
- $r_{\text{infimum}} = \inf_{r_1, r_2}$ gdw. $s(r_{\text{infimum}}) = \inf_{s(r_1), s(r_2)}$

Innerhalb der Router-Verbandsstruktur besitzt ein Router r somit direkte Verbindungen zu den folgenden Routern der Menge $R_{\text{lattice}, r}$:

$$R_{\text{lattice}, r} = \{r' \in R \mid s(r') \in \text{parents}(s(r)) \vee s(r') \in \text{children}(s(r))\} \quad (3.14)$$

In einem Router-Verband können zwischen zwei Lokationen nun im Gegensatz zu einem Baum mehrere Pfade existieren. Durch die Existenz von Lokationen, die den Schnitt verschiedener Vorgängerlokationen definieren, und der Zuordnung von virtuellen Routern zu diesen Lokationen können nun auch Nachrichten an sich überlappende Gebiete weitergeleitet werden.

Virtuelle Router werden wie gehabt von physischen Routern implementiert, wobei ein physischer Router mehrere virtuelle Router implementieren kann. Entsprechend der bisherigen Definition direktverbundener Router kennt r für jeden virtuellen Router aus $R_{\text{lattice}, r}$ den zugeordneten physischen Router, das heißt, die Teilmenge der Relation \mathcal{M}_r entsprechend Gleichung 3.7. Ebenfalls analog zum baumförmigen Overlay-Netz können von r ausgehende Direktverbindungen zu weiteren Lokationen beziehungsweise den ihnen zugeordneten virtuellen Routern $R_{\text{shortcuts}, r}$ eingerichtet werden, indem \mathcal{M}_r entsprechend um Zuordnungen der zugehörigen physischen Router erweitert wird.

Die Zuordnung einer gegebenen Menge von physischen Routern, die durch den Betreiber für bestimmte Lokationen installiert wurden, zu virtuellen Routern erfolgt nun entsprechend der folgenden Zuordnungsvorschrift:

(\tilde{r}, r) ist genau dann Teil der Relation \mathcal{M} , wenn gilt

$$\nexists \tilde{r}' \in \tilde{R} : s(r) \leq s(\tilde{r}') < s(\tilde{r}) \wedge \forall \tilde{r}'' \in \tilde{R} \nexists \tilde{r}''' \in \tilde{R} : s(r) \leq s(\tilde{r}''') < s(\tilde{r}'') \rightarrow \text{ord}(\tilde{r}) \leq \text{ord}(\tilde{r}'') \quad (3.15)$$

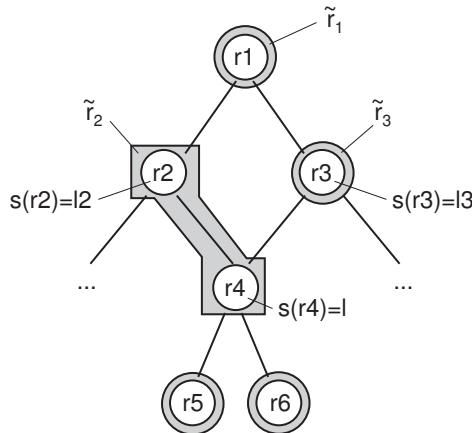


Abbildung 3.18: Verbandsbasierten Overlay-Netzes mit Zuordnung von physischen zu virtuellen Routern.

Das heißt, auch im Falle eines Router-Verbandes definiert die Relation \mathcal{M} eine bijektive Abbildung von physischen auf virtuelle Router, bei der ein physischer Router der designierte virtuelle Router einer Lokation l ist, falls es keinen anderen physischen Router mit einem kleineren Dienstgebiet gibt, das die Lokation l enthält. Um zu erreichen, dass diese Beziehung eindeutige ist, muss beachtet werden, dass virtuelle Router im Verband mehrere Vater-Router besitzen können, die wiederum unter Umständen von verschiedenen physischen Routern implementiert werden. Wird für eine Schnittlokation kein eigener physischer Router konfiguriert, so muss aus den designierten Routern der Vaterlokationen der Schnittlokation *genau ein* Router ausgewählt werden, der die Rolle des designierten Routers der Schnittlokation übernimmt. Hierfür wird im zweiten Teil der Gleichung 3.15 zusätzlich die Funktion $\text{ord}()$ verwendet, die im Falle von mehreren Vaterlokationen eine eindeutige Zuordnung eines physischen Routers zu Schnittlokation sicherstellt. Die Funktion $\text{ord}()$ definiert hierzu eine Totalordnung auf allen physischen Routern. Diese Totalordnung kann beispielsweise aus der UDP-Adresse (IP-Adresse + Portnummer) eines physischen Routers oder eines global eindeutigen Identifikators, der beispielsweise aus den MAC-Adressen der Router-Netzschnittstellen bestimmt werden kann, abgeleitet werden. Der physische Vater-Router mit der kleinsten Ordnungsnummer wird dann zum designierten Router der Schnittlokation.

Abbildung 3.18 zeigt hierfür einen beispielhaften Ausschnitt aus einem verbandsbasierten Overlay-Netz. In diesem Beispiel ist der Schnittlokation l zunächst kein eigener physischer Router zugeordnet, das heißt, ein physischer Router einer Vaterlokation von l muss den entsprechenden virtuellen Router von l implementieren. l besitzt in diesem Beispiel zwei Vaterlokationen $l_2 = s(r_2)$ und $l_3 = s(r_3)$ denen jeweils eigener physischer Router \tilde{r}_2 und \tilde{r}_3 zugeordnet sind. Es gelte dabei $\text{ord}(\tilde{r}_2) < \text{ord}(\tilde{r}_3)$. Somit implementiert aufgrund der kleineren Ordnungsnummer der physische Router \tilde{r}_2 den designierte virtuellen Router der Schnittlokation l .

3.7.0.5 Verwaltung des Overlay-Netzes

Die Mechanismen zum Beitritt eines neuen physischen Routers zum Overlay-Netz und zum Verlassen des Overlay-Netzes sind prinzipiell mit den entsprechenden Mechanismen des baumförmigen Overlay-Netzes aus Abschnitt 3.6 vergleichbar. An dieser Stelle werden daher nur die aus der Verbandsstruktur resultierenden Besonderheiten behandelt.

Beitritt eines Routers

Das grundlegende Verfahren für den Beitritt eines neuen physischen Geocast-Routers, im Folgenden \tilde{r}_{new} genannt, zum Overlay-Netz entspricht dem in Abschnitt 3.6.1.3 vorgestellten Verfahren für ein baumförmiges Overlay-Netz: \tilde{r}_{new} sendet eine `ParentRouterSolicited`-Nachricht an die designierten Router der Vaterlokationen seines Dienstgebiets. Diese nehmen \tilde{r}_{new} in ihre Vermittlungstabellen auf und senden ihre UDP-Adressen zurück an \tilde{r}_{new} . \tilde{r}_{new} nimmt seinerseits die Vater-Router in seine Vermittlungstabelle auf. Somit wird eine bidirektionale Vater-Kind-Verbindung erstellt, und die Vater-Router übergeben dadurch die Verantwortung für alle Lokationen gleich und innerhalb von \tilde{r}_{new} 's Dienstgebiet an \tilde{r}_{new} ab. Vormals bei den Vater-Routern registrierte Kind-Router, deren Dienstgebiete in \tilde{r}_{new} 's Dienstgebiet enthalten sind, erhalten eine `ParentChanged`-Nachricht und registrieren sich schließlich bei \tilde{r}_{new} .

Bei diesem Ablauf ergeben sich durch die Existenz von Schnittlokalationen die folgenden Besonderheiten im Vergleich zu einem baumförmigen Overlay-Netz. Der virtuelle Router einer Schnittlokation besitzt mehrere Vater-Router, die von verschiedenen physischen Routern implementiert werden können. Wird ein physischer Router \tilde{r}_{new} für eine Schnittlokation konfiguriert, so muss sich dieser bei mehreren Vater-Routern registrieren, das heißt, die `ParentRouterSolicited`-Nachricht muss an alle physischen Router zugestellt werden, die designierte Router der Vaterlokationen des Dienstgebiets von r_{new} sind. Entsprechend ist die Nachricht an jede Vaterlokation $l \in \text{parents}(s(\tilde{r}_{\text{new}}))$ adressiert. Hierzu muss r_{new} ein bestimmtes Wissen über den Aufbau des symbolischen Lokationsmodells, insbesondere über die Vorgängerlokationen seines Dienstgebiets, besitzen. Auf diesen Punkt wird weiter unten im Detail eingegangen.

Eine weitere Besonderheit ergibt sich für Fälle, in denen für eine Schnittlokation durch den Betreiber kein eigener physischer Router konfiguriert wurde. Wie oben durch die Relation \mathcal{M} beschrieben, muss in diesem Fall *genau einer* der designierten Router der Vaterlokation die Rolle des designierten Routers der Schnittlokation übernehmen. Insbesondere wenn zwei verschiedene physische Router designierte Router der Vaterlokationen sind, entsteht ein Konflikt, der zu Gunsten eines physischen Routers aufgelöst werden muss. Zwar definiert die oben eingeführte Funktion `ord()` in diesem Fall eindeutig, welcher Router diese Rolle übernimmt, allerdings kennt jeder physische Router zunächst nur seine eigene Ordnungsnummer, und einem physischen Router ist auch nicht *a priori* bekannt, mit welchen anderen Routern er in Konflikt steht. Zur Erkennung und Auflösung eines Konflikts ist daher ein entsprechendes Konfliktresolutionsprotokoll notwendig, das in Kraft tritt, sobald ein Router einen Konflikt feststellt.

Der folgende Ablauf beschreibt die Auflösung eines Konflikts. Es wird zunächst angenommen, dass der physische Router r_{detect} einen Konflikt für die Schnittlokation l_{conflict}

festgestellt hat (die Konflikterkennung wird weiter unten im Detail behandelt). Die folgenden Schritte werden ausgeführt, um den Konflikt aufzulösen:

1. $\tilde{r}_{\text{detect}}$ sendet eine $\text{ResolveConflict}(l_{\text{conflict}})$ -Nachricht an die Vaterlokationen von l_{conflict} . Die Vermittlung dieser Nachricht erfolgt mit Hilfe des unten dargestellten Geocast-Vermittlungsprotokolls. Diese Nachricht erreicht die designierten Router der Vaterlokationen, das heißt, die Menge $\tilde{R}_{\text{conflict}}$ der in Konflikt stehenden Router.
2. Jeder in Konflikt stehenden Router $\tilde{r}_{\text{conflict}} \in \tilde{R}_{\text{conflict}}$ sendet seine Ordnungsnummer $\text{ord}(\tilde{r}_{\text{conflict}})$ und UDP-Adresse zurück an $\tilde{r}_{\text{detect}}$.
3. $\tilde{r}_{\text{detect}}$ ermittelt durch Vergleich der Ordnungsnummern den designierten Router $\tilde{r}_{\text{designated}}$ von l_{conflict} .
4. $\tilde{r}_{\text{detect}}$ sendet eine Nachricht $\text{ConflictResolved}(l_{\text{conflict}})$ an alle in Konflikt stehenden Router. Diese Nachricht enthält die Adresse von $\tilde{r}_{\text{designated}}$.
5. Jeder Router $\tilde{r}_{\text{conflict}} \in \tilde{R}_{\text{conflict}}$ übernimmt die Zuordnung $l_{\text{conflict}} \mapsto \tilde{r}_{\text{designated}}$ in seine lokale Vermittlungstabelle und erstellt somit eine interne Repräsentation des Routerverbandes, die als Grundlage für das Treffen von Weiterleitungsentscheidungen dient (siehe Abschnitt 3.7.0.6).

Abbildung 3.19 zeigt ein Beispiel für eine Konfliktauflösung. In diesem Beispiel werden die Schnittlokation l_{conflict} sowie alle ihr untergeordneten Lokationen – Schnitt der Dreiecke in Abbildung 3.19(a) – von den beiden physischen Routern \tilde{r}_2 und \tilde{r}_3 abgedeckt. Dieser Konflikt wird von \tilde{r}_2 oder \tilde{r}_3 entdeckt, beispielsweise beim Beitritt eines der Router (siehe unten). Angenommen, \tilde{r}_2 entdeckt diesen Konflikt. Mit Hilfe des Wissens über das Lokationsmodell kann \tilde{r}_2 die Vaterlokationen von l_{conflict} ermitteln und eine $\text{ResolveConflict}(l_{\text{conflict}})$ -Nachricht an \tilde{r}_3 per geographischer Vermittlung an die Lokation $s(r_3)$ schicken. \tilde{r}_3 schickt daraufhin seine Ordnungsnummer und UDP-Adresse zurück an \tilde{r}_2 . \tilde{r}_2 löst den Konflikt auf und teilt \tilde{r}_3 das Ergebnis der Konfliktauflösung mit. Nach der Konfliktauflösung ergibt sich die in Abbildung 3.19(b) dargestellte Overlay-Topologie.

Das oben beschriebene Protokoll zur Konfliktlösung setzt voraus, dass der Router $\tilde{r}_{\text{detect}}$ in der Lage ist, einen Konflikt zu erkennen. Bei der Konflikterkennung sind entsprechend des Zeitpunkts der Erkennung zwei Strategien zu unterscheiden: Die proaktive und die reaktive Strategie.

Bei der proaktiven Strategie erkennt und löst der Router $\tilde{r}_{\text{detect}} = \tilde{r}_{\text{new}}$ bereits bei seinem Beitritt auftretende Konflikte auf. Hierzu tritt $\tilde{r}_{\text{detect}}$ zunächst wie oben beschrieben dem Router-Verband bei, das heißt, er etabliert Verbindungen zu seinen physischen Vater- und Kind-Routern. Anschließend ermittelt er jede Schnittlokation l_{conflict} innerhalb seines Dienstgebiets, die nicht im Dienstgebiet eines Kind-Routers enthalten ist, das heißt, alle Schnittlokationen, für die $\tilde{r}_{\text{detect}}$ potentiell der designierte Router sein könnte. Hierfür benötigt $\tilde{r}_{\text{detect}}$ Wissen über die Lokationshierarchie. Für diese Lokationen stößt $\tilde{r}_{\text{detect}}$ wie oben beschrieben eine Konfliktresolution an.

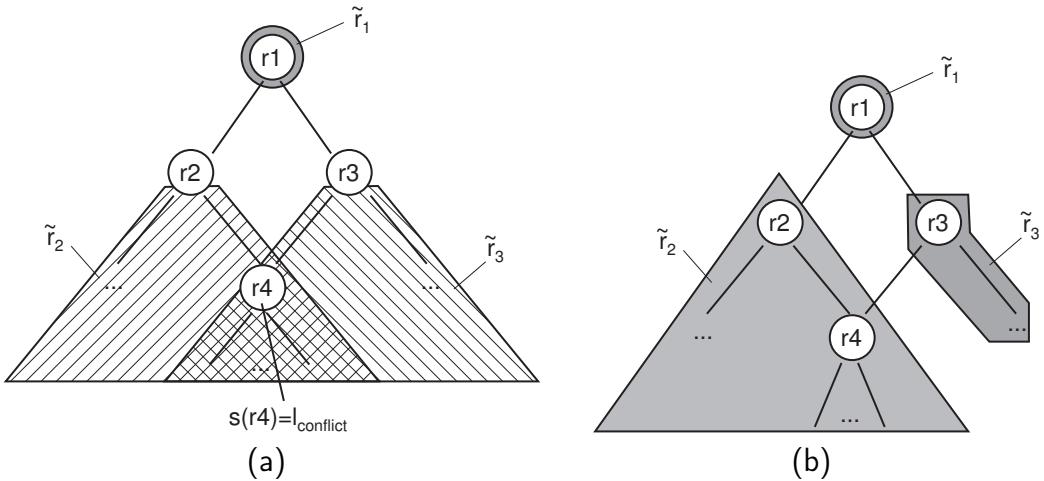


Abbildung 3.19: Auflösung eines Konflikts im Router-Verband.

Obwohl diese proaktive Strategie theoretisch Konflikte wie gewünscht erkennt, so erfordert die Bestimmung der Schnittlokationen doch unter Umständen einen hohen Aufwand. Praktisch kann das dazu notwendige Wissen über den Lokationsverband nur durch den Einsatz eines Lokationsmodelldienstes verwaltet werden, mittels dessen Hilfe alle Lokationen und die Inklusionsbeziehung zwischen Lokationen ermittelt werden können.⁸ Handelt es sich bei r_{detect} allerdings um einen Router mit großem Dienstgebiet, typischerweise nahe der Wurzel des Verbandes, der zunächst keine Kind-Router besitzt, so kann die Menge der Schnittlokationen, die r_{detect} auf Konflikte überprüfen muss, sehr groß sein. Zu deren Ermittlung muss dann unter Umständen nahezu das vollständige Lokationsmodell vom Lokationsmodelldienst abgefragt und anschließen von einem einzelnen Router verwaltet werden! Der Beitritt eines solchen Routers würde somit zu einer hohen Last des Lokationsmodelldienstes und einer Vielzahl an Nachrichten zur Konfliktauflösung und somit insgesamt zu einer ineffizienten Konflikterkennung und einem ineffizienten Beitrittsprozess führen. Außerdem entsteht bei einzelnen Routern ein hoher Speicherbedarf für die lokale Verwaltung umfangreicher Ausschnitte des Lokationsmodells.

Die reaktive Konflikterkennungsstrategie versucht dagegen nicht, einen Konflikt bereits während des Beitritts zu erkennen. Vielmehr wird diese Erkennung so lange verzögert, bis \tilde{r}_{detect} tatsächlich eine Nachricht über den designierten Router einer Schnittlokation weiterleiten will. Wurde von \tilde{r}_{detect} bisher für diese Schnittlokation keine Konfliktresolution durchgeführt, so startet \tilde{r}_{detect} den oben beschriebenen Konfliktresolutionsalgorithmus und verzögert die Weiterleitung so lange, bis der Konflikt aufgelöst wurde. Die dadurch auftretende Verzögerung bei der ersten Weiterleitung über eine Schnittlokation ist der wesentliche Nachteil dieser Strategie. Dem steht aber auch ein wesentlicher Vorteil gegenüber: Da \tilde{r}_{detect} bei seinem Beitritt keine Konflikterkennung durchführt, be-

⁸Die Realisierung eines entsprechenden Lokationsmodelldienstes ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ein entsprechender Dienst, der für diese Zwecke eingesetzt werden kann, wird beispielsweise im Rahmen des Nexus-Projekts an der Universität Stuttgart entwickelt [NGSV01]. Durch die verteilte Architektur besitzt dieser Dienst auch die Fähigkeit, detaillierte und globale Lokationsmodelle effizient zu verwalten.

nötigt er zunächst auch kein umfangreiches Wissen über die Schnittlokationen in seinem Dienstgebiet, das heißt, er muss bei seinem Beitritt kein umfangreiches Wissen über den Lokationsverband mittels Anfragen an den Lokationmodelldienst ermitteln. Außerdem entsteht zunächst auch kein Kommunikationsaufwand für die Konfliktresolution. Dieser Aufwand wird nun über einen längeren Zeitraum verteilt auftreten und zwar erst dann, wenn tatsächlich Nachrichten die in Konflikt stehenden Router traversieren.

Treten Router sukzessive dem Overlay-Netz bei, so ist es außerdem wahrscheinlich, dass insgesamt weniger Konfliktresolutionen durchgeführt werden müssen. Bei der proaktiven Strategie werden sofort beim Beitritt *alle* möglichen Konflikte behandelt. Beim sukzessiven Beitritt der Router werden für dieselben Schnittlokationen jeweils erneute Konfliktresolutionen durchgeführt. Bei der reaktiven Strategie dagegen werden nur Konflikte aufgelöst, die tatsächliche bei der Weiterleitung relevant sind. Bei einem sukzessiven Beitritt ist es daher wahrscheinlich, dass beim Beitritt eines neuen Routers noch nicht alle Konflikte aufgelöst wurde, falls noch keine Nachricht über in Konflikt stehende designierte Router geleitet wurden. Im Allgemeinen werden daher für dieselbe Schnittlokation insgesamt weniger Konfliktresolutionen durchgeführt.

Austritt eines Routers

Verlässt ein physischer Geocast-Router $\tilde{r}_{\text{failed}}$ das verbandsbasierte Overlay-Netz, so müssen wie beim beschriebenen baumbasierten Ansatz die von $\tilde{r}_{\text{failed}}$ implementierten virtuellen Router neu zugeteilt werden, so dass für jede Lokation genau ein designierter Router existiert oder formal ausgedrückt die Zuordnung von physischen zu virtuellen Routern entsprechend der Zuordnungsvorschrift aus Gleichung 3.15 erfüllt ist. Hierfür kann der Mechanismus für baumförmige Overlay-Netze (Algorithmus 3.1) unverändert übernommen werden.

3.7.0.6 Vermittlungsalgorithmus

Wie bei der baumbasierten Vermittlung besteht die verbandsbasierte Vermittlung aus zwei Phasen. In der ersten Phase wird die Nachricht zum (virtuellen) Router weitergeleitet, dessen Dienstgebiet dem Zielgebiet entspricht. Wir bezeichnen diesen Router im Folgenden als den Zielrouter r_{target} . Die Kernidee dieses Vermittlungsschritts ist die schrittweise Weiterleitung an Nachbar-Router, die bezüglich des Router-Verbandes näher zu r_{target} liegen als der aktuelle Router. In Phase 2 wird die Nachricht an alle Router weitergeleitet, deren Dienstgebiete im Zielgebiet der Nachricht liegen. Dies geschieht durch eine Traversierung des Router-Verbandes, d.h. jeder Router aus Phase 2 leitet die Nachricht an seine Kind-Router weiter. In Phase 2 wird die Nachricht auch an die Geocast-Message-Server weitergeleitet, deren Zugangsnetze das Zielgebiet überlappen.

Durch die Verwendung eines Router-Verbandes im Gegensatz zu einem einfachen Router-Baum als grundlegende Struktur kann der Vermittlungsalgorithmus für baumförmige Overlay-Netze (Algorithmus 3.2, Abschnitt 3.6.1.4) nicht ohne Weiteres verwendet werden. Der Algorithmus für baumförmige Overlay-Netztopologien geht davon aus, dass in der grundlegenden Overlay-Netzstruktur genau ein Pfad vom aktuellen Router zum Ziel-Router existiert. Durch Direktverbindungen können zwar einzelne Router auf die-

sem Pfad „übersprungen“ werden, es werden jedoch nur Sprungziele auf diesem einen Pfad im Routing-Baum vom aktuellen zum Ziel-Router berücksichtigt. Im Verband können dagegen mehrere Pfade zum Ziel-Router existieren, die von den Routern beim Treffen einer Weiterleitungsentscheidung wie im Folgenden beschrieben berücksichtigt werden müssen.

Verbandsbasierte Vermittlung

Für eine effiziente Vermittlung ist dabei zu beachten, dass typischerweise nahe der Wurzel im Verband wenige Router verfügbar sind, wohingegen tiefer im Verband eine große Menge an Routern anzutreffen ist. So gibt es zum Beispiel vergleichsweise wenige Länder-Router aber viele Städte- oder Gebäude-Router. Um die wenigen Router an der Spitze des Verbandes möglichst wenig zu beladen, verfolgt der verbandsbasierte Vermittlungsalgorithmus die folgende Strategie. Eine Nachricht wird über den so genannten *Pfad mit dem geringsten Anstieg* (engl. *least ascending path*, kurz *LAP*) weitergeleitet, der den weiterleitenden Router mit dem designierten Router des Zielgebiets verbindet. Informell ist ein LAP als ein Pfad mit dem niedrigsten Scheitelpunkt bezüglich des Router-Verbands definiert. Das heißt, die weitergeleiteten Nachrichten steigen im Router-Verband möglichst wenig auf und traversiert dadurch nach Möglichkeit nicht die vergleichsweise wenigen Routern an der Spitze des Verbandes. Da die niedrigen Ebenen des Verbandes typischerweise mit einer deutlich größere Zahl an Routern besetzt sind, verteilt sich somit die Last auf diese Router und die Gefahr der Überlastung der wenigen Router auf höheren Ebenen sinkt. Da in einem Router-Verband mehrere Pfade denselben Scheitelpunkt besitzen können, ist ein LAP nicht notwendiger Weise eindeutig.

Abbildung 3.20 veranschaulicht zunächst informell die Vermittlung über den Pfad des geringsten Anstiegs anhand eines Beispiels. In diesem Beispiel soll eine Nachricht durch den Router r_7 an das Zielgebiet τ vermittelt werden. Der Router r_6 ist der designierte Router dieses Zielgebiets, der analog zur bereits vorgestellten Vermittlung in baumförmigen Overlay-Netzen die Nachricht zunächst in Phase 1 erhalten soll. Aus Sicht des Routers r_7 existieren zwei Pfade zu diesem Router im Verband: Ein Pfad führt über den Router r_3 , der andere über den Router r_5 . Der LAP ist der Pfad über den Router r_5 , denn dieser führt über den niedrigeren Scheitelpunkt (Router r_3 anstatt r_1).

Für eine formale Definition des LAP wird zunächst die *Ebene eines virtuellen Routers*, bezeichnet durch $\text{level}(r)$ wie folgt definiert:

$$\text{level}(r) = \begin{cases} 0 & \text{if } s(r) = \perp \\ \max(\text{level}(r_{\text{child},1}), \dots, \text{level}(r_{\text{child},n})) + 1 & \text{if } s(r) > \perp \end{cases} \quad (3.16)$$

$r_{\text{child},i}$ bezeichnet dabei einen Kind-Router von r , das heißt, es gilt $s(r_{\text{child},i}) \in \text{children}(s(r))$. Abbildung 3.20 zeigt die Ebenen eines beispielhaften Router-Verbandes. Zu beachten ist, dass im Router-Verband ein logischer „Bottom-Router“ (Router r_{10}) eingeführt wurde, um den Router-Verband entsprechend des zugrunde liegenden Lokationsverbands abzuschließen. Dieser Router ist rein logischer Natur und nur für die Definition der Ebenen notwendig; er wird von keinem physischen Router implementiert, und somit werden auch keine Nachrichten über diesen Router vermittelt.

Des Weiteren wird durch $P_{r_{\text{source}}, r_{\text{destination}}}$ die Menge der Pfade im Router-Verband

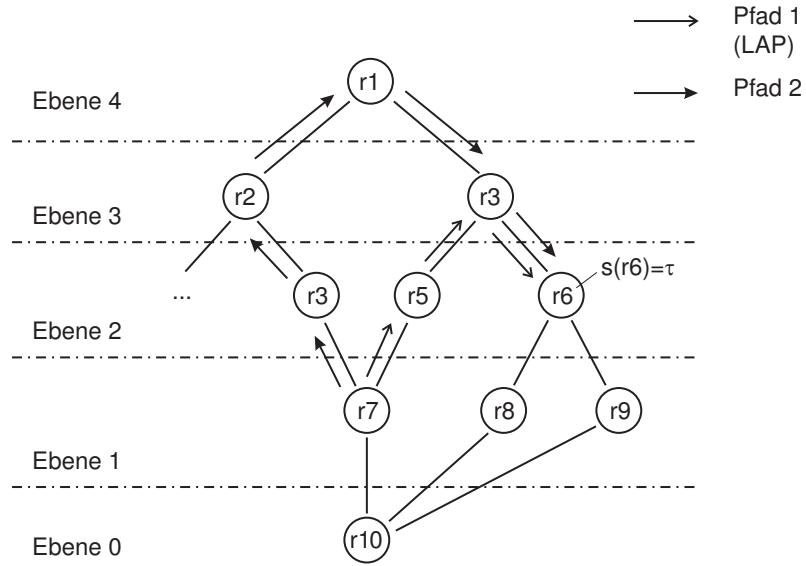


Abbildung 3.20: Vermittlung einer Nachricht im Verband über den Pfad des geringsten Anstiegs (Least Ascending Path; LAP).

definiert, die den Router r_{source} mit dem Router $r_{\text{destination}}$ verbinden. Ein *Pfad* $p \in P_{r_{\text{source}}, r_{\text{destination}}}$ ist eine Sequenz $(r_{\text{source}}, \dots, r_{\text{destination}})$ von traversierten Routern. Als der *Scheitelpunkt* eines Pfades p wird der Router $\hat{r}_p \in p$ bezeichnet, für den gilt:

$$\forall r \in p : \text{level}(\hat{r}_p) \geq \text{level}(r) \quad (3.17)$$

Ein *Pfad des geringsten Anstiegs* (Least-Ascending Path; LAP), bezeichnet durch $\check{p} \in P_{r_{\text{source}}, r_{\text{destination}}}$, mit dem Scheitelpunkt $\hat{r}_{\check{p}}$ wird folgendermaßen auf Grundlage der Ebene von $\hat{r}_{\check{p}}$ definiert:

$$\forall p \in P_{r_{\text{source}}, r_{\text{destination}}} : \text{level}(\hat{r}_{\check{p}}) \leq \text{level}(\hat{r}_p) \quad (3.18)$$

Diese Eigenschaft kann von mehreren Pfaden von r_{source} nach $r_{\text{destination}}$ erfüllt werden. Mit $\check{P}_{r_{\text{source}}, r_{\text{destination}}} \subseteq P_{r_{\text{source}}, r_{\text{destination}}}$ wird daher die Menge der Pfade von r_{source} nach $r_{\text{destination}}$ bezeichnet, für welche die Bedingung aus Gleichung 3.18 erfüllt ist, d.h. alle Pfade, die r_{source} mit $r_{\text{destination}}$ über den Scheitelpunkt mit der geringsten Höhe verbinden. Alle diese Pfade besitzen denselben Scheitelpunkt $\hat{r}_{\check{p}}$, welcher durch das Supremum $\sup_{r_{\text{source}}, r_{\text{destination}}}$ eindeutig definiert ist und auf der Verbandsstruktur berechnet werden kann (siehe unten).

Ziel des verbandsbasierten Vermittlungsalgorithmus ist jeweils die Wahl eines Routers r_{next} auf einem LAP der jeweils möglichst nahe zum designierten Router r_{τ} des Zielgebiets τ liegt. Als Metrik für die Nähe wird dabei die Anzahl der virtuellen Router auf einem Pfad von r_{next} nach r_{τ} im Router-Verband betrachtet. Im Folgenden wird der hierzu vom aktuellen Router r ausgeführte Vermittlungsalgorithmus (Algorithmus 3.7) im Detail beschrieben.

Zunächst überprüft r , ob er die Nachricht m bereits zuvor empfangen und weitergeleitet hat, das heißt, ob es sich bei m um ein Duplikat handelt (Algorithmus 3.7, Zeile 2). Solche Duplikate können dann entstehen, wenn m in Phase 2 der Weiterleitung an den Router einer Schnittlokation weitergeleitet wird. Da dieser Router mehrere Vater-Router besitzt, kann er die gleiche Nachricht über mehrere Pfade empfangen. Ein Duplikat wird von r verworfen (Algorithmus 3.7, Zeile 4).

Handelt es sich um kein Duplikat, so stellt r zunächst die aktuelle Phase der Nachrichtenweiterleitung über ein entsprechendes Feld im Kopf der Nachricht fest (Algorithmus 3.7, Zeilen 8 und 29). In Phase 1, also der Weiterleitung zum Ziel-Router r_τ , überprüft r , ob er selbst der Ziel-Router ist, der Phase 2 startet (Algorithmus 3.7, Zeile 9).

In Phase 1 bestimmt r zunächst die Menge der LAPs (Algorithmus 3.7, Zeile 17). Zu beachten ist hierbei, dass die LAPs bei r_τ beginnen und bei r enden. Mittels einer Breitensuche auf den ermittelten LAPs wird derjenige virtuelle Router r_{next} ermittelt, der zu r_τ den geringsten Abstand hat und für den r den entsprechenden physischen Router kennt (Algorithmus 3.7, Zeile 14–21). Der Abstand d ist hierbei durch die Anzahl an virtuellen Routern zwischen r_τ und r_{next} auf dem LAP definiert. Diese Suche wird in jedem Fall ein Ergebnis liefern, da r mindestens die physischen Router der Vater- und Kindlokationen seines Dienstgebiets kennt (minimales topologisches Wissen; siehe unten). Sollte r durch Kenntnis weiterer physischer Router zusätzliche Direktverbindungen eingerichtet haben, so werden diese verwendet, wenn sie näher zum Ziel-Router auf dem LAP liegen (erweitertes topologisches Wissen; siehe unten).

```

On receiving message  $m$  with target area  $\tau$  do
2   if  $r$  has already forwarded  $m$  then
3     // Duplikat empfangen → verworfen
4     drop  $m$ 
5     return
6   fi

8   if  $\text{phase}(m) = 1$  then
9     if  $s(r) = \tau$  then
10       $\text{phase}(m) \leftarrow 2$ 
11    else
12      // Phase 1: Weiterleitung zum Zielgebiet
13      // Breitensuche nach Router auf dem Pfad des geringsten Anstiegs von  $r_\tau$  nach  $r$ 
14       $r_{\text{next}} \leftarrow \text{undef}$ 
15       $d = 0$ 
16      while  $r_{\text{next}} = \text{undef}$  do
17        foreach  $p \in \check{P}_{r_\tau, r}$  do
18          let  $r_d$  be the  $d$ -th router in sequence  $p = (r_\tau = r_0, \dots, r = r_n)$ 
19          if  $r$  knows physical router implementing  $r_d$  then
20             $r_{\text{next}} \leftarrow r_d$ 
21          fi
22        od
23         $d \leftarrow d + 1$ 

```

```

24   od
25     forward  $m$  to  $r_{\text{next}}$ 
26   fi
27   fi
28
29   if  $\text{phase}(m) = 2$  then
30     // Phase 2: Verteilung im Zielgebiet
31     forward  $m$  to each child router  $r_{\text{child}}$ 
32     forward  $m$  to each message server  $M$  with  $s(r) = s(M) \cap \tau$ 
33   fi
34 od

```

Algorithmus 3.7: Verbandsbasierter Vermittlungsalgorithmus ausgeführt von Geocast-Router r

Abbildung 3.21 zeigt ein einfaches Beispiel für diesen Vermittlungsprozess. Dieses Beispiel stellt einen Weiterleitungsschritt aus Sicht des virtuellen Routers r_7 dar, der durch den physischen Router \tilde{r}_7 implementiert wird. Sobald r_7 in Phase 1 die Nachricht zur Weiterleitung erhält, bestimmt er den dargestellten Pfad des geringsten Anstiegs. Das topologische Wissen von r_7 umfasst in diesem Beispiel neben den physischen Vater- und Kind-Routern \tilde{r}_4 beziehungsweise \tilde{r}_5 auch den designierten physischen Router \tilde{r}_3 (erweitertes topologisches Wissen; siehe unten). Bezüglich des Router-Verbands liegt r_3 näher an r_7 als r_5 . Eine Breitensuche entlang der Pfade des geringsten Anstiegs liefert zunächst den virtuellen Router r_6 , dessen physischen Router r_7 aber nicht kennt. Die weitere Suche liefert r_3 , dessen physischer Router \tilde{r}_3 bekannt ist und der somit von r_7 als nächstes Sprungziel in Richtung des Ziel-Routers gewählt wird.

In der zweiten Phase werden außerdem Nachrichten an die Geocast-Message-Server zugestellt, deren Zugangsnetze Teile des Zielgebiets abdecken. Für eine bandbreiteneffiziente Zustellung ist es wie bereits in Abschnitt 3.6.1.4 ausgeführt wurde wünschenswert, dass eine Nachricht nicht mehrfach an einen Geocast-Message-Server zugestellt wird. Wie beim baumförmigen Overlay-Netz ist hierzu zunächst die Fragen zu klären, bei welchen Geocast-Routern sich ein Message-Server registrieren sollte, um von diesen Nachrichten zu erhalten und falls sich ein Message-Server bei mehreren Routern anmeldet, welcher Router jeweils die Nachricht schließlich an den Message-Server ausliefert. Hierbei kann grundsätzlich das gleiche Konzept wie für das baumförmige Overlay-Netz bereits in Abschnitt 3.6.1.4 beschrieben eingesetzt werden:

Ein Geocast-Message-Server, genannt M , mit dem Dienstgebiet $s(M)$ registriert sich bei jedem virtuellen Geocast-Router r mit $s(r) \leq s(M)$. Die Zustellung erfolgt durch den Geocast-Router r mit $s(r) = s(M) \cap \tau$, das heißt, durch den Geocast-Router, dessen Dienstgebiet dem Schnitt aus Zielgebiets τ und des Message-Server-Dienstgebiet entspricht. Hierbei ist zu beachten, dass im Gegensatz zu einem einfachen baumförmigen Lokationsmodell nun nicht mehr reine Inklusionsoperationen als Sonderfall der Schnittoperation ausreichend sind, sondern tatsächlich eine partielle Überlappung von $s(M)$ und τ auftreten kann. Die Schnittoperation kann daher nicht durch einen einfachen Präfix-Vergleich der symbolischen Adressen implementiert werden, wie dies für baumförmige

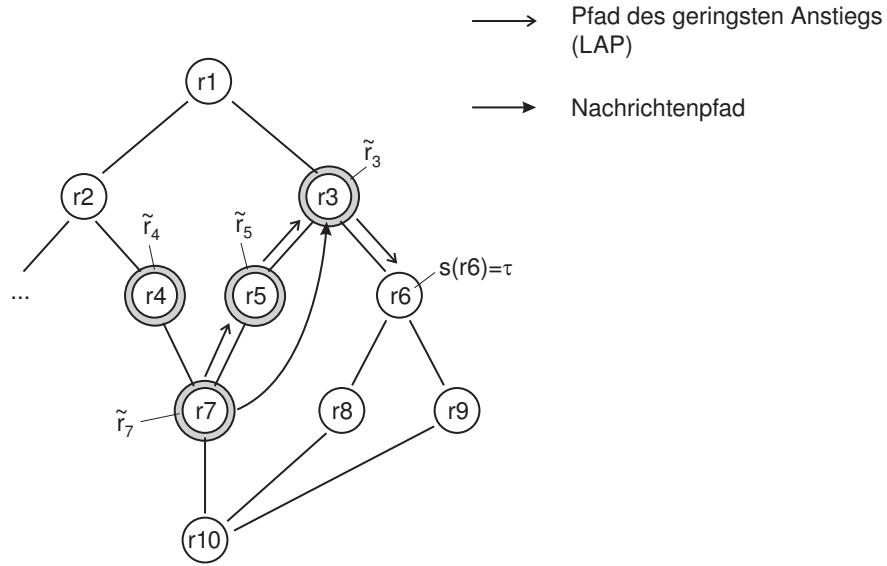


Abbildung 3.21: Vermittlung auf einem Router-Verband. Darstellung aus Sicht des Routers r_7 .

Lokationsmodelle möglich war (vgl. Abschnitt 3.6.1.4). Stattdessen benötigt jeder Router Wissen über die Struktur des Lokationsverbandes, um diese Weiterleitungsbedingung auszuwerten und den Schnitt zu berechnen. Im nächsten Abschnitt wird im Detail darauf eingegangen, wie ein Router dieses Wissen erlangt.

Abbildung 3.22 veranschaulicht den allgemeinen Zustellungsprozess an Message-Server anhand eines Beispiels. In diesem Beispiel wird eine Nachricht an das Zielgebiet τ gesendet. Die lokalen Netze des Message-Servers M deckt die Lokation $s(M)$ ab, und entsprechend registriert sich M bei jedem Router, dessen Dienstgebiet $s(M)$ enthält. Der Schnitt von τ und $s(M)$ ergibt die Lokation $s(r_9)$. Somit ist der Router r_9 für die Weiterleitung der Nachricht an M zuständig.

Effiziente Implementierung des Vermittlungsalgorithmus

Die effiziente Implementierung des oben vorgestellten Vermittlungsalgorithmus setzt vor allem die effiziente Implementierung zweier Operationen voraus, die auf der Verbandsstruktur operieren, nämlich der Operationen zur Ermittlung des Supremums \sup_{l_1, l_2} zweier Lokationen l_1 und l_2 (Gleichung 2.20) und des Infimums \inf_{l_1, l_2} (Gleichung 2.19).

Die Operation zur Ermittlung des Supremums wird benötigt, um die Pfade des geringsten Anstiegs (LAP) zu ermitteln. Ein LAP \check{p} verbindet den weiterleitenden Router r mit dem designierten Router r_τ des Zielgebiets. Ein LAP ist dabei durch einen Scheitelpunkt $\hat{r}_\check{p}$ minimaler Höhe im Verband definiert, im Vergleich zu anderen Pfaden die r mit r_τ verbinden (vgl. Gleichung 3.18). Anders ausgedrückt ist $\hat{r}_\check{p}$ also durch das Supremum $\sup_{r, r_\tau} = \hat{r}_\check{p}$ im virtuellen Router-Verband definiert.⁹ Um somit die Phase 1 des Vermitt-

⁹Der virtuelle Router-Verband entspricht dem Lokationsverband. Somit kann diese Bedingung auch als $\sup(s(r), \tau)$ durch entsprechende Operationen auf dem Lokationsverband formuliert und durch die

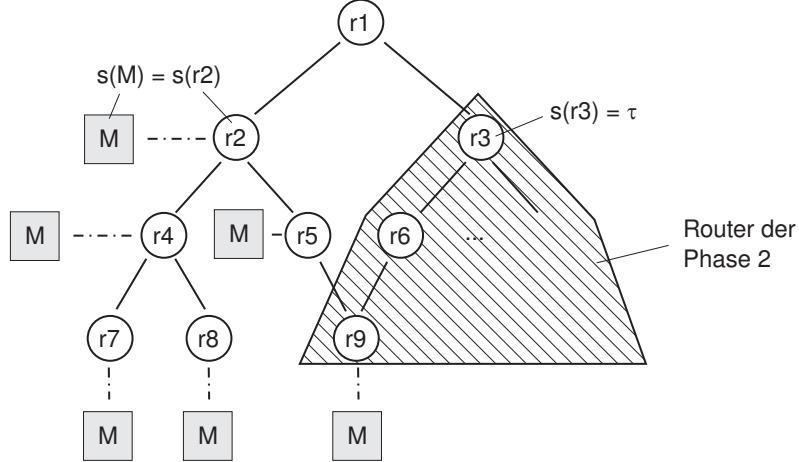


Abbildung 3.22: Zustellung einer Nachricht an Geocast-Message-Server im Router-Verband.

lungsalgorithmus effizient implementieren zu können, muss es möglich sein, das Supremum \sup_{r, r_τ} effizient zu berechnen.

Die zweite Phase des Vermittlungsalgorithmus ist dagegen bezüglich der Weiterleitung zwischen Routern im Verband bezüglich ihrer Komplexität unkritisch. In Phase 2 wird die Nachricht einfach von r_τ aus beginnend von jedem Router an seine Kind-Router weitergeleitet, die direkt über lokale Datenstrukturen ermittelt werden können.

Neben der Weiterleitung zwischen Routern erfolgt in Phase 2 allerdings auch eine Weiterleitung von den Routern zu den Message-Servers, deren Dienstgebiete das Zielgebiet τ schneiden. Hierzu muss wie bereits beschrieben, von den Routern der Phase 2 der Schnitt $s(M) \cap \tau$ berechnet werden; ein Router r leitet in Phase 2 die Nachricht an den bei ihm registrierten Message-Server M weiter, wenn $s(r) = s(M) \cap \tau$ gilt, das heißt, wenn sein Dienstgebiet dem Schnitt des Dienstgebiets des Message-Server und des Zielgebiets entspricht. Der Schnitt $s(M) \cap \tau$ ist in der Lokationsverbandstruktur durch das Infimum $\inf_{s(M), \tau}$ definiert. Eine effiziente Implementierung der Infimum-Operation ist somit neben der oben motivierten effizienten Implementierung der Supremum-Operation ebenfalls eine Voraussetzung für einen insgesamt effizienten Vermittlungsalgorithmus.

Bei genauerer Betrachtung stellt sich heraus, dass die Infimum-Operation im Vergleich zur Supremum-Operation relativ einfach effizient zu implementieren ist. So existieren bereits Verfahren, die durch eine Kodierung der Verbandsstruktur eine Berechnung des Infimums in „praktisch konstanter Zeit“ ermöglichen [GMR94]. Alternativ können die Lokationen l im Verband, für die gilt $\inf_{s(M), l} = s(r)$, im Voraus berechnet und markiert werden, so dass die tatsächliche Berechnung zur Laufzeit nur einen Vergleich dieser Markierungen erfordert.

Die effiziente Implementierung der Supremum-Operation gestaltet sich hingegen deutlich aufwendiger. Hierfür werden an dieser Stelle zwei Verfahren vorgeschlagen. Das

Supremum-Berechnungen im Lokationsmodell ermittelt werden, wobei hierdurch konzeptionell und bezüglich der Komplexität keine Unterschiede entstehen.

erste Verfahren basiert auf dem in der Literatur vorgeschlagenen Verfahren von Ganguly et al. [GMR94]. Bei diesem Verfahren werden die virtuellen Router¹⁰ des Router-Verbandes mittels eines speziellen Kodierungsverfahrens durch Bit-Folgen repräsentiert. Die Supremum-Operation wird mit Hilfe dieser Bit-Folgen durch effiziente Kodevergleiche implementiert. Die Evaluierung (siehe Abschnitt 3.10) zeigt, dass diese Kodierung eine sehr effiziente Implementierung der Supremum-Operation ermöglicht. Andererseits erfordert die Kodierung nicht unerheblichen Speicherbedarf. Dieses Verfahren ist somit primär geeignet, wenn Geocast-Router nur einen relativ beschränkten Ausschnitt des gesamten Verbandes kennen und wenige Direktverbindungen zu anderen Routern aufbauen. Ferner besitzt dieses Verfahren den Nachteil, dass eine Änderung der Verbandsstruktur eine Neukodierung erforderlich macht. Vor allem bei dynamischen Direktverbindungsstrategien mit einer dynamisch veränderlicher Menge von Routern kann sich dieser Aufwand negativ auswirken.

Das zweite Verfahren zur Bestimmung des Supremums verwendet eine Graph-Repräsentation des Verbandes und ermittelt das Supremum durch Navigation auf diesem Graphen. Zunächst werden hierfür alle gemeinsamen Vorfahren $\text{ancestors}(r) \cap \text{ancestors}(r_\tau)$ aufgezählt. In einem zweiten Schritt wird aus dieser Schnittmenge das Element auf der kleinsten Ebene bestimmt. Offensichtlich hängt die Effizienz dieses Verfahrens von der Anzahl an Vorfahren im Verband ab. Diese steigt im Allgemeinen mit der Anzahl an Schnittlokalisationen im Verband. Somit ist dieses Verfahren hauptsächlich für Verbandsstrukturen mit einer geringen Anzahl an Schnittlokalisationen geeignet (siehe Evaluierung in Abschnitt 3.10.2). Im Gegensatz zum ersten Verfahren können dagegen Lokationen beziehungsweise Router vergleichsweise einfach dynamisch in den Verband durch Modifikation der Graphrepräsentation integriert werden, und auch größere Verbandsstrukturen führen nicht zu gravierenden Speicherproblemen. Dieses Verfahren ist somit auch für dynamische Direktverbindungsstrategien und bei vielen Direktverbindungen pro Router geeignet.

Für einen ausführlichen quantitativen Vergleich der beiden Verfahren wird an dieser Stelle auf die Evaluierung in Abschnitt 3.10.2 verwiesen.

Topologisches Wissen eines Geocast-Routers

Sowohl die Vermittlung von Geocast-Nachrichten – Bestimmung von LAPs – als auch die Entscheidung, welcher Router schließlich eine Geocast-Nachricht an einen Message-Server zuzustellen hat, erfolgt durch Navigation auf einer Router-internen Repräsentation des virtuellen Router-Verbandes. Um auf dem virtuellen Router-Verband navigieren zu können, benötigt ein Router Wissen über einen bestimmten Ausschnitt der Verbandsstruktur. Hierbei wird zwischen dem *minimale topologische Wissen* und dem *erweiterte topologischen Wissen* unterschieden. Das minimale topologische Wissen bezeichnet die minimal notwendige Information, die für einen korrekten Vermittlungsvorgang benötigt wird. Das erweiterte topologische Wissen optimiert die Vermittlung durch Wissen über weitergehende Ausschnitte der Overlay-Topologie und ermöglicht damit die Verwendung von optimierten kurzen Pfaden durch zusätzliche Direktverbindungen. Im Fol-

¹⁰Beziehungsweise die Lokationen des Lokationsverbandes.

genden werden die beiden Arten des topologischen Wissens im Detail erläutert.

Minimales und erweitertes topologisches Wissen In Gleichung 3.14 wurde bereits definiert, dass ein virtueller Router r seine virtuellen Vater- und Kind-Router kennt. Neben diesem Wissen benötigt r allerdings weiteres Wissen über die Router-Topologie, um eine korrekte Funktionsweise des eingeführten Vermittlungsalgorithmus sicherzustellen. Insbesondere um die Pfade des geringsten Anstiegs zu ermitteln und Entscheidungen über die Weiterleitung von Nachrichten zu Message-Servern zu treffen, benötigt r mehr Wissen über die virtuelle Router-Topologie, als nur das Wissen über seine Vater- und Kind-Router. Außerdem benötigt r für die Weiterleitung von Nachrichten auch Wissen über die Zuordnung von physischen zu virtuellen Routern in Form der Relation \mathcal{M}_r . Diesen Wissen eines Routers r wird unter dem Begriff *minimales topologisches Wissen* von r zusammengefasst und formal wie folgt definiert:

1. Virtuelle Vater- und Kind-Router von r : $R_{\text{lattice},r}$
2. Designierte physische Router der virtuellen Vater- und Kind-Router von r : $\mathcal{M}_r = \{(\tilde{r}', r') \in \mathcal{M} \mid r' \in R_{\text{lattice},r}\}$
3. Virtuelle Vorgänger-Router der virtuellen Vater- und Kind-Router: $R_{\text{ancestors},r} = \{r' \in R \mid \exists r_{\text{lattice}} \in R_{\text{lattice},r} : r' > r_{\text{lattice}}\}$
4. Vorgänger-/Nachfolgerrelation bezüglich der r bekannten virtuellen Routern der Menge $R_{\text{known},r} = R_{\text{lattice},r} \cup R_{\text{ancestors},r}$: $\prec_r \subseteq \prec$: $\{(r_1, r_2) \in R \times R \mid r_1 \in R_{\text{known},r} \wedge r_2 \in R_{\text{known},r} \wedge (r_1, r_2) \in \prec\}$

Werden ausgehend von r weitere Direktverbindungen zu Routern aus $R_{\text{neighbors},r} = R_{\text{lattice},r} \cup R_{\text{shortcuts},r}$ eingerichtet, so benötigt r das folgende *erweiterte topologische Wissen*:

1. Virtuelle Vater- und Kind-Router und zusätzliche Direktverbindungs-Router von r : $R_{\text{neighbors},r} = R_{\text{lattice},r} \cup R_{\text{shortcuts},r}$
2. Designierte physische Router der Vater-, Kind- und Direktverbindungs-Router: $\mathcal{M}_r = \{(\tilde{r}', r') \in \mathcal{M} \mid r' \in R_{\text{neighbors},r}\}$
3. Virtuelle Vorgänger-Router der virtuellen Vater-, Kind- und Direktverbindungs-Router: $R_{\text{ancestors},r} = \{r' \in R \mid \exists r_{\text{neighbor}} \in R_{\text{neighbors},r} : r' > r_{\text{neighbor}}\}$
4. Vorgänger-/Nachfolgerrelation bezüglich der r bekannten virtuellen Routern der Menge $R_{\text{known},r} = R_{\text{neighbor},r} \cup R_{\text{ancestors},r}$: $\prec_r \subseteq \prec$: $\{(r_1, r_2) \in R \times R \mid r_1 \in R_{\text{known},r} \wedge r_2 \in R_{\text{known},r} \wedge (r_1, r_2) \in \prec\}$

Diese Informationen werden entweder durch die Konfiguration von r durch seinen Betreiber vorgeben oder während der Laufzeit ermittelt.

Die Router der Menge $R_{\text{neighbors},r}$ (Punkt 1) und die UDP-Adressen der entsprechenden designierten Router (Punkt 2) werden im Falle von Vater- oder Kind-Routern wie oben beschrieben während des initialen Beitrittsprozesses ermittelt. Im Falle von zusätzlichen

Direktverbindungszielen werden die Ziele entweder durch eine statische Strategie zur Selektion von Direktverbindungszielen entsprechend Abschnitt 3.6.2.1 oder eine adaptive Strategie entsprechend Abschnitt 3.6.2.2 bestimmt. Je nach Strategie werden die designierten Router von Direktverbindungszielen durch die Verbreitung von Adressinformationen der designierten Router in bestimmten Teilen des Verbandes oder durch explizite TargetRouterSolicited-Nachricht ermittelt.

Aufgrund der bijektiven Abbildung von symbolischen Lokationen auf virtuelle Router kann ein Router durch Kenntnis der Dienstgebiete der Vorgänger-Router und der auf symbolischen Lokationen definierten Vorgänger-/Nachfolgerrelation die Menge der virtuellen Vorfahren-Router (Punkt 3) und die durch diese Router gebildete Verbandsstruktur (Punkt 4) ableiten. Hierfür dient der oben bereits eingeführte Lokationsmodelldienst, der alle symbolischen Lokationen und die räumlichen Inklusionsbeziehungen zwischen diesen Lokationen verwaltet und diese Informationen einem Router auf Anfrage zur Verfügung stellt. Somit kann ein virtueller Router diese Informationen bei seinem Start ermitteln, indem er vom Lokationsmodelldienst alle Vorfahrenlokationen der Dienstgebiet aller Router bekannten Router in $R_{\text{neighbors},r}$ zusammen mit ihren Inklusionsbeziehungen ermittelt. Daraus leitet er die entsprechende virtuelle Verbandsstruktur ab.

Zielbezogenes topologisches Wissen Das oben eingeführte minimale und erweiterte topologische Wissen deckt im Allgemeinen nur einen Teil der LAPs zum Router des Zielgebiets ab, beginnend beim aktuellen Router r , der die Weiterleitungsentscheidung trifft. Das Ende der LAPs bis zum Ziel-Router r_τ ist r im Allgemeinen zunächst nicht bekannt, allerdings notwendig, um LAPs zu bestimmen.

Da über r Nachrichten an beliebige Lokationen weitergeleitet werden können, müsste r ein topologisches Wissen über den gesamten Router-Verband besitzen, um alle Nachrichten vermitteln zu können. Dies würde aber zu einem sehr hohen lokalen Speicherverbrauch führen. Um dieses Problem zu umgehen, verwaltet r so genanntes *zielbezogenes topologisches Wissen* nur für den Zeitraum der Weiterleitung einer Nachricht an ein bestimmtes Ziel. Nach der Weiterleitung kann dieses Wissen über einen Teil des Router-Verbandes wieder verworfen werden. Zur Optimierung ist allerdings ein Caching dieser Informationen sinnvoll, um möglichst wenige Anpassungen der lokal verwalteten Verbandsstruktur durchführen zu müssen.

Das zielbezogene Wissen einer Nachricht an Zielgebiet τ besteht im Einzelnen aus den folgenden Informationen:

- Virtueller Ziel-Router r_τ mit $s(r_\tau) = \tau$ und die Vorgänger-Router des Ziel-Routers: $R_{\text{targetrouterancestors}} = \{r' \in R \mid r' \succeq r_\tau\}$
- Vorgänger-/Nachfolgerrelation bezüglich der virtuellen Router der Menge $R_{\text{targetrouterancestors}}$: $\prec_r \subseteq \prec: \{(r_1, r_2) \in R \times R \mid r_1 \in R_{\text{targetrouterancestors}} \wedge r_2 \in R_{\text{targetrouterancestors}} \wedge (r_1, r_2) \in \prec\}$

Damit der weiterleitende Router r diese Informationen nicht ständig bei jeder Vermittlungsentscheidung zunächst zeitaufwendig vom Lokationsmodelldienst abfragen muss, wird diese Information mit der Nachricht mitgeschickt. Das heißt, der sendende

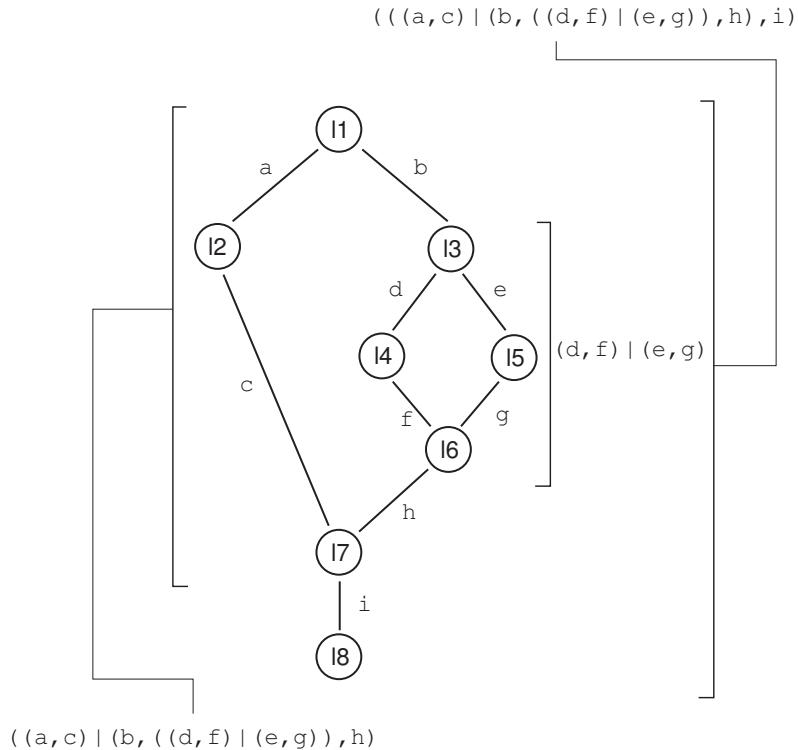


Abbildung 3.23: Kompakte Beschreibung der Verbandsstruktur durch Auflistung der Teilpfade im Lokationsmodell.

Geocast-Host ermittelt diese Informationen vom Lokationsmodelldienst undbettet diese in einer geeigneten Beschreibungsform in den Kopf der gesendeten Nachricht ein. Eine kompakte Beschreibung dieser Information ist beispielsweise durch die Auflistung der Teilpfade im Lokationsverband vom Top-Element des Verbandes bis zur Zielgebietslokation möglich. Ein einfaches Beispiel hierfür ist in Abbildung 3.23 dargestellt. (x, \dots, y) bezeichnet hierbei eine Pfadsequenz von Lokationen beziehungsweise den zugeordneten virtuellen Routern des Router-Verbands; $(x|y)$ bezeichnet zwei alternative Pfade.

Aus dieser Darstellung des Pfades zur Ziellokation kann jeder weiterleitende Router das zielbezogene topologische Wissen des Router-Verbands ableiten. Durch die Integration von minimalem und zielbezogenem Wissen stehen einem Router somit die notwendigen Informationen zur Bestimmung der minimal ansteigenden Pfade zur Verfügung.

Optimierung des lokalen Ressourcenbedarfs

Implementiert ein physischer Router sehr viele virtuelle Router, so führt dies unter Umständen zu einem hohen lokalen Ressourcenbedarf. Um dieses Problem abzuschwächen, muss ein physischer Router daher nicht alle von ihm implementierten Router sofort starten, solange diese nicht für die Registrierung von Message-Servern oder die Vernetzung mit anderen Routern benötigt werden. Ein physischer Router \tilde{r} startet in diesem Fall zunächst nur den virtuellen Router r mit $s(r) = s(\tilde{r})$. Andere virtuelle Router, die $s(\tilde{r})$ im-

plementiert, werden erst gestartet, sobald sich Kind-Router oder Message-Server bei $s(\tilde{r})$ registrieren – vorher werden diese virtuellen Router nicht für die Weiterleitung oder Zustellung von Nachrichten benötigt. Im Detail wird ein virtueller Router r für die Lokation l nur dann vom physischen Router \tilde{r} gestartet, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt ist:

1. Ein anderer physischer Router \tilde{r}' implementiert virtuelle Router, die Nachfahren des virtuellen Routers r sind: $\exists \tilde{r}' \in \tilde{R} : \tilde{r}' \neq \tilde{r} \wedge s(\tilde{r}') < s(r)$
2. r ist ein Direktverbindungsziel eines virtuellen Routers, der nicht von \tilde{r} implementiert wird: $\exists r' \in R : (\tilde{r}, r') \notin \mathcal{M} \wedge r \in R_{\text{neighbors}, r'}$
3. Das Dienstgebiet eines Message-Servers M beinhaltet r 's Dienstgebiet: $s(M) \geq s(r)$

Im ersten und zweiten Fall wird der virtuelle Router r für die Vermittlung von Nachrichten im Router-Verband benötigt. Im dritten Fall wird r für die Weiterleitung von Nachrichten an den bei ihm registrierten Message-Server M benötigt. Der physische Router \tilde{r} erkennt diese Fälle durch ParentRouterSolicited-Nachrichten (Fall 1), durch TargetRouterSolicited-Nachrichten (Fall 2) oder durch MessageServerRegister-Nachrichten (Fall 3). Da im Falle einer statischen Direktverbindungsstrategie keine expliziten TargetRouterSolicited-Nachrichten versandt werden, muss \tilde{r} potentielle Direktverbindungsziele entsprechend der global bekannten und einheitlichen Strategie unaufliegt starten.

3.8 Optimierte Vermittlung durch IP-Multicast-Verfahren

Die symbolischen Vermittlungsprotokolle aus Abschnitt 3.6 und 3.7 sind als Overlay-Netz-Protokolle implementiert und setzen insbesondere keine IP-Multicast-Protokolle auf Schicht 3 voraus, sondern können alleine auf Grundlage von IP-Unicast-Protokollen realisiert werden. Sie können daher ohne Modifikation der IP-Vermittlungsprotokolle umgesetzt werden. Es ist jedoch offensichtlich, dass ein Overlay-Netz Nachrichten nicht so effizient vermitteln kann, wie das ein Ansatz auf Schicht 3 könnte (ein quantitativer Vergleich findet sich in Abschnitt 3.10). Daher soll in diesem Abschnitt gezeigt werden, wie die Overlay-Netz-basierte Vermittlung und geeignete IP-Multicast-Protokolle kombiniert werden können, um die Effizienz zu steigern [DR06]. Diese kombinierten Verfahren sind dabei als *optionale* Optimierung zu verstehen; stehen keine IP-Multicast-Protokolle zur Verfügung, so können die Overlay-Netz-basierten Ansätze wie gehabt alleine durch IP-Unicast-Protokolle implementiert werden.

3.8.1 Optimierte Vermittlung

Die grundlegende Idee des optimierten Ansatzes ist folgende. Zunächst werden die ersten Geocast-Nachrichten an ein bestimmtes Zielgebiet wie gehabt im Overlay-Netz zu den Message-Servern im Zielgebiet vermittelt. Sobald die ersten Nachrichten bei

den Message-Servern eintreffen, erfolgt ein Wechsel zu einer effizienteren IP-Multicast-basierten Vermittlung, wobei eine optimierte Multicast-Verteilstruktur auf Schicht 3 etabliert wird. Hierfür wird ein so genanntes quellenspezifisches IP-Multicast-Protokoll verwendet, das durch seinen Charakter insbesondere eine einfache Verwaltung von IP-Multicast-Gruppen ermöglicht (siehe unten). Die Optimierung der Nachrichtenverteilung erfolgt folglich quellenspezifisch, das heißt, der etablierte Multicast-Verteilbaum wird nur von einer bestimmten Quelle genutzt, wobei eine Quelle hierbei mit dem Message-Server des sendenden Geocast-Hosts gleichzusetzen ist, an den ein Geocast-Host seine Nachrichten zur Vermittlung übergibt.

Offensichtlich bedeutet der Wechsel vom Overlay-Netz-basierten Protokoll zum IP-Multicast-Protokoll einen gewissen Aufwand, beispielsweise zur Etablierung des Multicast-Verteilbaumes, der sich nur amortisiert, wenn die etablierte Multicast-Verteilstruktur häufiger genutzt wird. Die optimierte Vermittlung durch die IP-Multicast-Verteilstruktur ist also insbesondere dann sinnvoll, wenn mehrere Nachrichten häufig von einem Sender zum selben Zielgebiet gesendet werden; werden dagegen Nachrichten nur sporadisch an ein bestimmtes Zielgebiet gesendet, so lohnt sich der resultierende Aufwand nicht, und eine reine Overlay-Netz-basierte Vermittlung ist vorteilhafter. Um diejenigen Fälle unterscheiden zu können, für welche die Optimierung tatsächlich vorteilhaft ist und daher angewandt werden soll, werden daher zwei Modi der Nachrichtenvermittlung eingeführt:

Der *Nachrichtenmodus* (engl. message mode) wird immer dann verwendet, wenn Applikationen sporadisch Nachrichten an sich häufig ändernde Zielgebiete senden. Ein typisches Beispiel hierfür sind kurze textuelle Warnmeldungen an verschiedene gefährdete Gebiete. In diesem Modus werden Nachrichten wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben rein durch das Overlay-Netz ohne weitere Optimierung weitergeleitet.

Der *Strommodus* (engl. streaming mode) wird dagegen in Szenarien angewandt, in denen Applikationen Nachrichtenströme über einen längeren Zeitraum an bestimmte Zielgebiete senden. Ein Anwendungsfall für solche Nachrichtenströme sind periodische Werbenachrichten mit Produktabbildungen und -beschreibungen, die vom Geocast-Host einer Firma an potentielle Kunden in einem Einkaufszentrum gesendet werden.

Da es für die Geocast-Infrastruktur nicht ohne Weiteres erkenntlich ist, welcher Art die weiterzuleitenden Geocast-Nachrichten sind, muss die Anwendung explizit den zu verwendenden Nachrichtenmodus auswählen. Im Falle des Strommodus signalisiert die Anwendung den Beginn eines Nachrichtenstroms an ein bestimmtes Zielgebiet sowie das Ende des Stroms, wenn von der Anwendung keine weiteren Nachrichten mehr zu erwarten sind. Der Message-Server des Senders, der eine zu übermittelnde Nachricht zunächst vom sendenden Geocast-Host auf dem die Applikation ausgeführt wird erhält, etabliert im Strommodus einen Multicast-Verteilbaum, der solange aufrecht erhalten wird, wie der Strom existiert, das heißt, solange Anwendungen signalisieren, dass sie Nachrichten an ein bestimmtes Zielgebiet senden wollen.

3.8.2 Etablierung der Verteilstruktur

Ein Geocast-Nachrichtenstrom wird durch das Paar $(M_{\text{source}}, \tau)$ identifiziert, wobei M_{source} der Message-Server des Senders und τ die Zielgebietslokation ist. Um möglichst optimale Verteilbäume zu erhalten, wird ein quellenbasierter Verteilbaum aufgebaut, so dass die Wurzel des Multicast-Verteilbaumes der Message-Server des Senders ist und die Blätter die Message-Server der Empfänger im Zielgebiet. Die Klasse der *quellenspezifischen Multicast-Protokolle* (engl. *source-specific multicast*, kurz SSM [Bha03, HC06]) stellt sich hierbei als besonders geeignet dar. SSM definiert so genannte Kanäle (S, G) , die durch die Unicast-IP-Adresse S der Quelle und eine IP-Multicast-Gruppenadresse G definiert sind. Im Geocast-Anwendungsfall ist S die Unicast-Adresse des sendenden Message-Servers M und G identifiziert das adressierte Zielgebiet τ . Ein Standard-Multicast-Protokoll mit SSM-Unterstützung wie beispielsweise Protocol Independent Multicast Sparse Mode (PIM-SM [FHHK06]) kann für die Etablierung eines Baumes der kürzesten Pfade (engl. shortest path tree, kurz SPT) mit der Wurzel S zur Nachrichtenvermittlung verwendet werden.

Im Einzelnen wird ein der SPT wie folgt etabliert (vgl. Abbildung 3.24). Zunächst signalisiert die sendende Anwendung auf dem Geocast-Host H_s des Senders dem Geocast-Message-Server M_s des Senders den Wunsch, einen Nachrichtenstrom an ein bestimmtes Zielgebiet τ zu senden (Abbildung 3.24(a), ❶). Hierzu wird ein entsprechendes Feld im Kopf der ersten Geocast-Nachricht an dieses Zielgebiet gesetzt. M bildet daraufhin das Zielgebiet τ auf eine IP-Multicast-Gruppe G_τ ab. Dabei ist zu beachten, dass diese Abbildung $\tau \rightarrow G_\tau$ nur pro Message-Server eindeutig sein muss, da ein Nachrichtenkanal durch das Paar $(S = M_s, G_\tau)$ identifiziert wird. Somit können andere Message-Server die gleiche Gruppenadresse G_τ für andere Zielgebiete verwenden. Ein unter Umständen beschränkter Adressraum für IP-Multicast-Adressen stellt somit kein Problem dar. Außerdem ist keine koordinierte und somit aufwendige Verwaltung von Gruppenadressen notwendig, da jeder Message-Server selbst und unabhängig die Abbildungsvorschrift von Zielgebieten auf Gruppenadressen wählen kann, solange diese Abbildung nur lokal je Message-Server eindeutig ist.

Im nächsten Schritt fügt M_s der Nachricht ein Feld mit der Identifikation (M_s, G_τ) des zu erstellenden Kanals hinzu und sendet die Nachricht über das Overlay-Netz zu den Message-Servern im Zielgebiet (Abbildung 3.24(a), ❷).

Sobald diese Nachricht bei einem Message-Server M_τ im Zielgebiet ankommt, erkennt M_τ am gesetzten Strommodusfeld im Nachrichtenkopf, dass er dem Kanal (M_s, G_τ) beitreten soll. Er sendet daher eine entsprechende Beitrittsnachricht für den Kanal (M_s, G_τ) an seinen lokalen PIM-SSM-Router. PIM-SSM etabliert Verteilbäume durch das Weiterleiten der Beitrittsnachricht in Richtung der Quelle – im Beispiel in Richtung von M_s . PIM-SSM-Router auf dem Weg der Beitrittsnachricht werden Teil des SPT (Abbildung 3.24(a), ❸).

Sobald der erste Message-Server dem Kanal (M_s, G_τ) beigetreten ist, sendet M_s Nachrichten an das Zielgebiet τ sowohl über das Overlay-Netz als auch über den Kanal. Das heißt, die Message-Server erhalten die Nachrichten nun zwei Mal. Sobald M_τ eine Nachricht über den Kanal erhält, sendet er eine Bestätigungsmeldung (ACK) an den Overlay-

Router, von dem die Nachricht empfangen wurde. Die Bestätigung enthält dabei den Identifikator (M_s, G_τ) des Kanals (Abbildung 3.24(b), ④). Die Geocast-Router aggregieren diese ACK-Nachrichten und leiten eine aggregierte ACK-Nachricht in Richtung des Senders (engl. upstream) weiter, sobald jeder Router in Richtung der Empfänger (engl. downstream) ein ACK gesendet hat.

Schließlich erreicht die aggregierte ACK-Nachricht M_s . M_s weiß nun, dass alle Message-Server im Zielgebiet dem Kanal beigetreten sind und stoppt die Auslieferung der Nachrichten über das Overlay-Netz. Nachrichten an das Zielgebiet τ werden nun nur noch über den Kanal (M_s, G_τ) weitergeleitet (Abbildung 3.24(c), ⑤).

3.9 Vermittlung an mobile Zielgebiete

Die bisher vorgestellten Geocast-Vermittlungsalgorithmen betrachteten nur Nachrichten an stationäre Zielgebiete wie Städte, Gebäude oder Räume. Neben Nachrichten an solche stationären Zielgebiete existieren aber auch Anwendungsfälle, in denen Nachrichten an Empfänger vermittelt werden sollen, die sich in mobilen Objekten aufhalten, zum Beispiel im Speisewagen eines Zuges.

Bereits in Kapitel 2 wurden hierfür in Abschnitt 2.6.1.1 spezielle lokale Lokationsmodelle eingeführt, die mobilen Objekten wie Zügen zugeordnet werden können, um Lokationen innerhalb des mobilen Objekts zu definieren. Bezuglich der Zustellung von Nachrichten an mobile Objekte wurden dann zwei Fälle in Abschnitt 2.6.1.2 unterschieden:

Adressierte Lokation enthält das mobile Objekt: Es wird ein stationäres Gebiet adressiert, welches das mobile Objekt und somit dessen lokales mobiles Lokationsmodell enthält. Eine solche Nachricht soll auch an alle Geocast-Hosts ausgeliefert werden, die sich im mobilen Objekt und somit im adressierten umgebenden Gebiet befinden. Ein Beispiel wäre eine Nachricht an die Stadt Stuttgart, die auch an alle Fahrgäste eines Zuges ausgeliefert werden soll, der sich gerade in Stuttgart aufhält oder Stuttgart durchfährt.

Adressierte Lokation ist Teil des mobilen Objekts: Es wird ein Gebiet innerhalb des mobilen Objekts adressiert. Diese Nachricht soll nur an Objekte ausgeliefert werden, die sich im spezifizierten Gebiet innerhalb des mobilen Objekts aufhalten. Ein Beispiel hierfür wäre eine Nachricht an alle Passagiere eines Zuges, die sich gerade im Speisewagen dieses Zuges aufhalten.

Für beide Anwendungsfälle sollen in diesem Abschnitt geeignete Vermittlungsalgorithmen entworfen werden. Hierfür wird zunächst das bisher verwendete Systemmodell um mobile Objekte wie Züge erweitert, bevor in den anschließenden Abschnitten die eigentlichen Vermittlungsansätze vorgestellt werden.

3.9.1 Erweitertes Systemmodell

Das bisher zugrunde liegende Systemmodell berücksichtigte keine mobilen Objekte wie Züge, Schiffe oder Flugzeuge, die einerseits selbst als mobile Zielgebiet dienen können

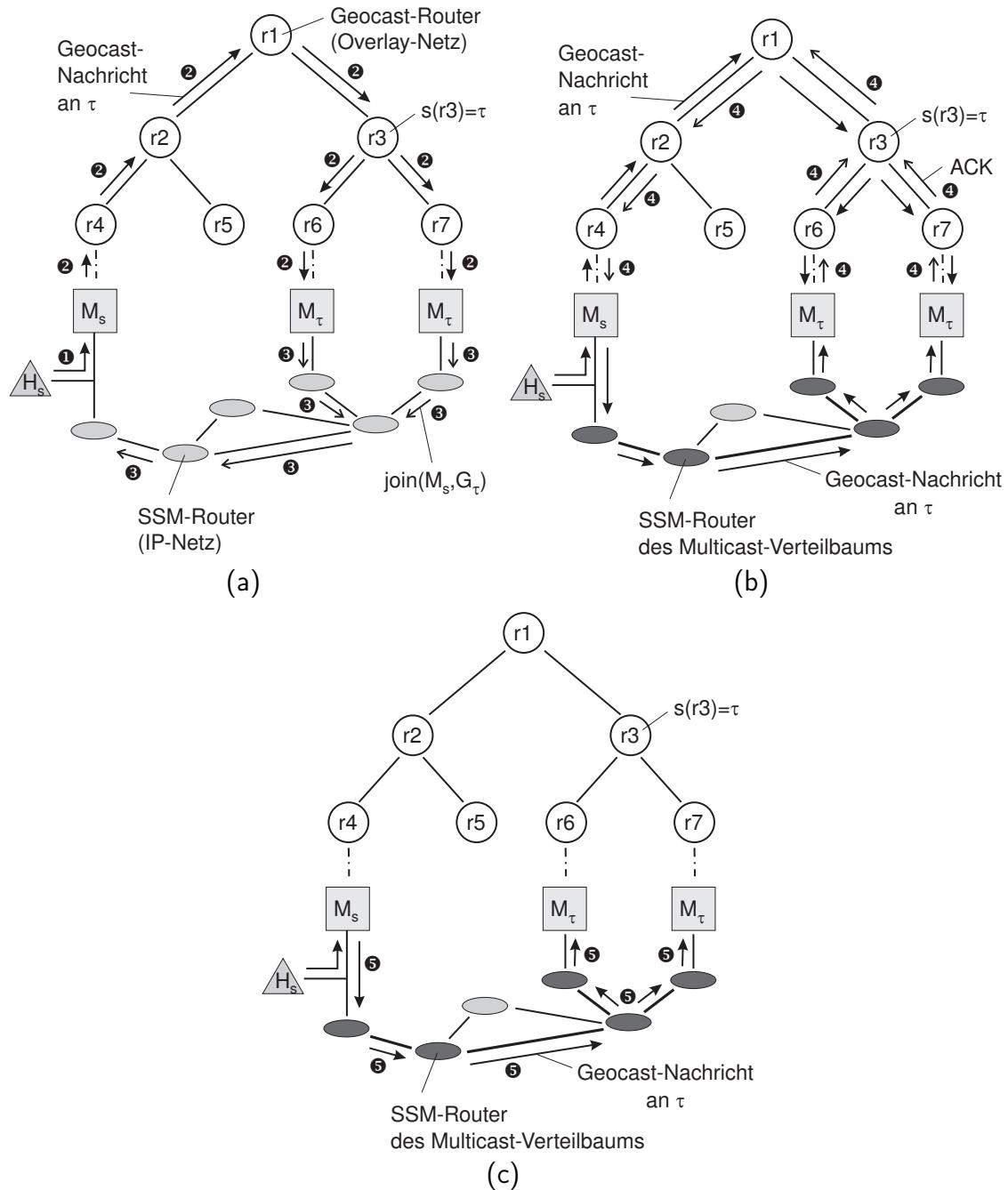


Abbildung 3.24: Optimierte Nachrichtenvermittlung mit Hilfe von quellspezifischem IP-Multicast.

und die andererseits auch die eigentlichen Empfänger (Geocast-Hosts) beinhalten. Das erweiterte Systemmodell ergänzt das ursprüngliche Modell um diese mobilen Objekte.

Jedem mobilen Objekt ist ein *lokales mobiles Lokationsmodell*, wie es in Abschnitt 2.6.1.1 eingeführt wurde, zugeordnet. Dieses Lokationsmodell beschreibt Lokationen innerhalb des mobilen Objektes und kann somit zur ortsbezogenen Adressierung von Empfängern innerhalb der mobilen Objekte verwendet werden. Als durchgängiges Beispiel eines mobilen Objekts soll im Folgenden ein Zug (ICE 576) betrachtet werden. Um Lokationen innerhalb des Zuges zu definieren, wird das folgende Referenzsystem definiert:

```
<localreferencesystem>
  <scope>
    <-- Angaben bezüglich WGS84 -->
    <referencesystem>
      <refsysid>WGS84</refsysid>
    </referencesystem>
    <area-2d_geometric mobile="yes">
      <-- Gültigkeitsbereich relativ zur aktuellen
          Position und Ausrichtung des Zuges. -->
      <polygon>
        <vertex>...</vertex>
        ...
        </polygon>
      </area-2d_geometric>
    </scope>
    <refsysid>
      db-ice576
    </refsysid>
  </localreferencesystem>
```

Das hier definierte Referenzsystem mit dem Identifikator db-ice576bettet das lokale symbolische Lokationsmodell des Zuges in das übergeordnete globale WGS84 ein. Anstatt der Einbettung in ein globales geometrisches System könnte analog auch eine Einbettung in ein globales symbolisches System erfolgen. Die im Folgenden beschriebenen Vermittlungsansätze sind grundsätzlich unabhängig vom Typ des globalen Systems. Je nach übergeordnetem System werden für die Geocast-Vermittlung geometrische Geocast-Protokolle aus den verwandten Arbeiten oder symbolische Protokolle wie in dieser Arbeit in den vorigen Abschnitten beschrieben angewandt. Die hier beschriebenen Verfahren sind somit universell und können auch zur Erweiterung geometrischer Geocast-Protokolle um mobile Zielgebiete eingesetzt werden.

Mit Hilfe dieses Referenzsystems können Lokationen innerhalb des Zuges adressiert werden, beispielsweise der Speisewagen des ICES:

```
<targetarea>
  <area-symbolic>
```

```

<-- Angaben bezüglich des lokalen Zugmodells. -->
<referencesystem>
    <-- Scope des lokalen Modells. -->
    <scope>
        <everywhere/>
    </scope>
    <refsysid>db-ice576</refsysid>
</referencesystem>
<-- Lokale symbolische Lokationsadresse. -->
<symbolicaddress>
    /speisewagen
</symbolicaddress>
</area-symbolic>
</targetarea>

```

Es wird ferner davon ausgegangen, dass die Position des mobilen Objekts bezüglich des übergeordneten Referenzsystems bekannt ist. Im Beispiel ist die Position des Zuges in Form einer WGS84-Koordinate beispielsweise durch einen GPS-Empfänger am Zug bekannt.

Als zusätzliche Komponente wird der so genannte *mobile Geocast-Message-Server*, bezeichnet mit M_{mobile} , eingeführt (vgl. Abbildung 3.25); zur klaren Unterscheidung werden die bisher betrachteten Message-Server als *stationäre Message-Server*, kurz M_{fixed} , bezeichnet. Wie Message-Server allgemein, so ist auch ein mobiler Message-Server für die Verteilung von Nachrichten an Hosts in seinen angeschlossenen lokalen Netzen zuständig. Der mobile Message-Server ist im Speziellen für die Weiterleitung von Nachrichten an Geocast-Hosts verantwortlich, die ein lokales Netz innerhalb des mobilen Objekts verwenden, beispielsweise ein LAN oder WLAN, das im Zug installiert ist. Diese Hosts werden mit $H_{internal}$ bezeichnet. Im Gegensatz zu diesen *internen Hosts*, die das zuginterne LAN zur Kommunikation benutzten, gibt es auch so genannte *externe Hosts* ($H_{external}$), die sich zwar ebenfalls innerhalb des mobilen Objekts befinden, zur Kommunikation aber einen stationären Message-Server verwenden. Im Beispiel könnten Passagiere des Zuges direkt mit einem externen Messager-Server über UMTS verbunden sein, anstatt über WLAN mit dem internen Netz.

Sowohl externe als auch interne Hosts können ihre *Position in Bezug zum lokalen mobilen Referenzsystem* mittels eines geeigneten Positionierungssystem ermitteln, zum Beispiel einem RFID-basierten Positionierungssystem, das in den Wagen des Zuges installiert ist, mit dessen Hilfe die Hosts ermitteln können, in welchem Wagen des Zuges sie sich aufhalten. Ferner wird davon ausgegangen, dass jeder Host auch seine *Position im übergeordneten Referenzsystem* kennt, beispielsweise in Form globaler WGS84-Koordinaten. Hierzu können zum einen eigene Positionierungssysteme der Hosts verwendet werden, zum Beispiel die Bestimmung der Position über Mobilfunk-Zellenidentifikatoren (engl. cell id) oder mittels Host-eigener GPS-Empfänger. Ferner besteht die Möglichkeit, eine approximierte Position mit Hilfe des mobilen Objekts zu ermitteln. Im Beispiel können die Host-Positionen durch die Position des Zuges approximiert werden – genauer durch

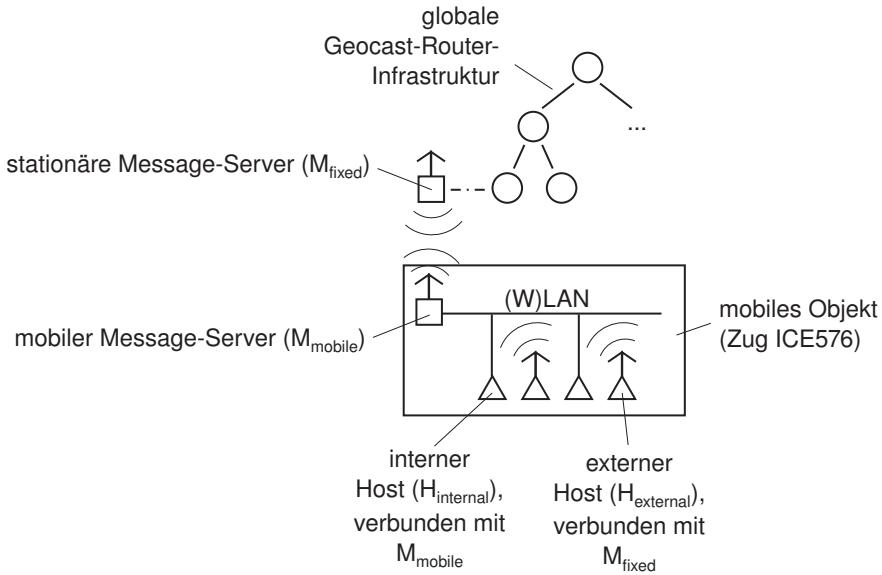


Abbildung 3.25: Erweitertes Systemmodell mit mobilen Objekten.

den aktuelle Gültigkeitsbereich des übergeordneten Systems, der sich aus der aktuellen Position des Zuges und dem relativen Gültigkeitsbereichs des Zuges (Objektumriss) ergibt.

Um Geocast-Nachrichten zu empfangen und an die internen Hosts weiterzuleiten, ist der mobile Message-Server mit einer drahtlosen Kommunikationstechnologie ausgestattet und mit einem stationären Message-Server verbunden, dessen Dienstgebiet die aktuelle Position des mobilen Objekts abdeckt (Details hierzu folgen in den weiteren Abschnitten). Im Beispiel könnte der mobile Message-Server des Zuges per UMTS mit einem stationären Message-Server kommunizieren.

Die stationären Message-Server entsprechen den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Message-Servern. Diese Message-Server besitzen ein stationäres Dienstgebiet. Sie stellen das Bindeglied zu einer globalen Geocast-Infrastruktur dar, zum Beispiel zu dem in dieser Arbeit beschriebene symbolischen Geocast-Overlay-Netz oder einer Geocast-Vermittlungsinfrastruktur für geometrisch adressierte Nachrichten, wie in den verwandten Arbeiten beschrieben.

3.9.2 Stellvertretervermittlung

Bei der Vermittlung soll zunächst der oben beschriebene erste Anwendungsfall betrachtet werden, bei dem eine Nachricht an ein Zielgebiet gesendet wird, welches das mobile Objekt beinhaltet. Dies kann zum Beispiel eine Nachricht an die Stadt Stuttgart sein, in der sich der Zug ICE 576 gerade aufhält. Diese Nachricht soll auch an alle Hosts ausgeliefert werden, die sich gerade im Zug aufhalten.

Die Auslieferung einer solchen Nachricht an externe Hosts stellt kein weiteres Problem dar, da diese Hosts wie gewöhnliche Hosts bereits über einen stationären

Message-Server angebunden sind. Eine Nachricht an die Stadt Stuttgart erreicht die externen Hosts daher durch den in den vorigen Abschnitten beschriebenen Vermittlungsalgorithmus.

Es bleibt somit die Notwendigkeit, entsprechende Nachrichten auch an die internen Hosts zu vermitteln, die sich im LAN des mobilen Geocast-Message-Servers aufhalten. Hierfür wird ein Ansatz verwendet, der im Folgenden als *Stellvertretervermittlung* (engl. *proxy server forwarding*) bezeichnet wird.

Die Stellvertretervermittlung beruht auf der Grundidee, den mobilen Message-Server M_{mobile} als Stellvertreter (engl. *proxy*) für die internen Hosts seines LANs fungieren zu lassen. Das heißt, aus Sicht des stationären Message-Servers M_{fixed} verhält sich M_{mobile} wie ein gewöhnlicher Host. Entsprechend registriert sich M_{mobile} bei einem stationären Message-Server, M_{fixed} , in dessen Dienstgebiet er sich gerade aufhält. Somit werden Nachrichten an Zielgebiete, welche die Position von M_{mobile} beinhalten, an diesen wie an jeden anderen gewöhnlichen Host im Zielgebiet ausgeliefert. In einem zweiten Schritt kann M_{mobile} die Nachricht nun innerhalb seines LANs an die internen Hosts zustellen.

3.9.3 Vermittlung durch Geocast-in-Geocast-Tunnel

In den folgenden Abschnitten soll der zweite Anwendungsfall der Nachrichtenvermittlung an mobile Objekte betrachtet werden, das heißt, die Zustellung einer Nachricht an ein lokales Zielgebiet innerhalb des mobilen Objekts, das auf Grundlage des lokalen Loka tionsmodells des mobilen Objekts bestimmt wurde. Das im Weiteren betrachtet Beispiel hierfür soll eine Nachricht an den Speisewagen des Zuges ICE 576 sein.

Der erste Ansatz verwendet zur Vermittlung einen *Geocast-in-Geocast-Tunnel*. Dieser Ansatz beruht auf der Grundidee, Geocast-Nachrichten an lokale Zielgebiete in mobilen Objekten wie den Speisewagen eines Zuges in eine Geocast-Nachricht an ein stationäres Zielgebiet zu kapseln, welches das mobile Zielgebiet umgibt (vgl. Abbildung 3.26). Diese Einkapselung wird vom Message-Servers M_s des sendenden Geocast-Host H_s durchgeführt. Im Beispiel könnte die Nachricht an den Speisewagen des ICE 576 ($\tau_{original}$), von dem angenommen werden soll, dass er sich gerade am Hauptbahnhof in Stuttgart aufhält, in eine Geocast-Nachricht an den Hauptbahnhof in Stuttgart (τ_{tunnel}) gekapselt werden. Die eingekapselte Nachricht kann wie eine gewöhnliche Geocast-Nachricht über die globale Geocast-Vermittlungsinfrastruktur zu allen Hosts im mobilen Objekt weitergeleitet werden. Die Beispieldnachricht würde also an alle Hosts am Hauptbahnhof in Stuttgart ausgeliefert werden.

Der mobile Geocast-Message-Server M_{mobile} nimmt hierbei die Rolle eines Hosts ein und fungiert somit wiederum als Stellvertreter für seine internen Hosts (vgl. Abschnitt 3.9.2). Er entkapselt die ursprüngliche Geocast-Nachricht, die an den Speisewagen adressiert ist, und stellt die Nachricht an die entsprechenden lokalen Hosts im Speisewagen zu.

Die externen Hosts empfangen wie der mobile Geocast-Message-Server des Zuges die eingekapselte Geocast-Nachricht vom stationären Message-Server M_{fixed} . Sie entkapseln die ursprüngliche Nachricht und vergleichen ihre lokale Position mit dem adressierten lokalen Zielgebiet $\tau_{original}$. Die Nachricht wird durch lokale Filterung beim externen Host

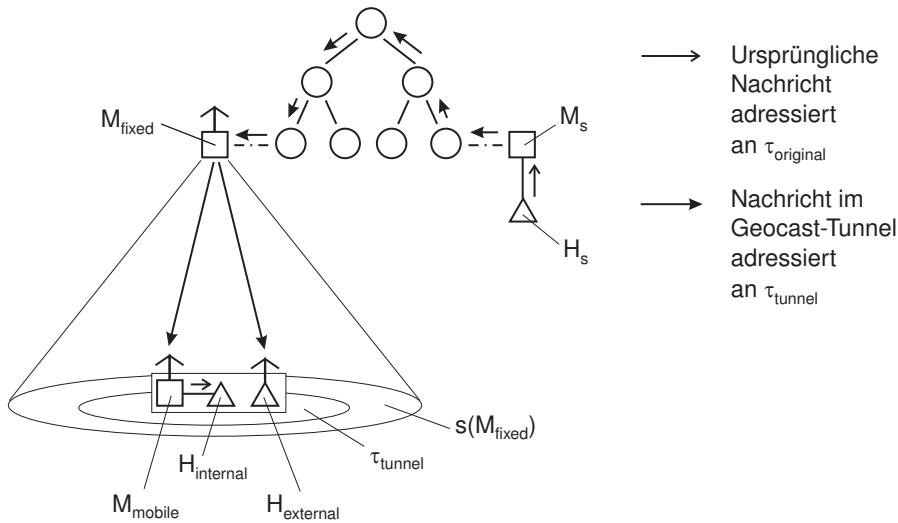


Abbildung 3.26: Geocast-in-Geocast-Tunnel zur Vermittlung einer Nachricht an ein Zielgebiet innerhalb eines mobilen Objekts.

nur dann an lokale Geocast-Applikationen des Hosts ausgeliefert, wenn sich der Host tatsächlich im adressierten lokalen Zielgebiet τ_{original} befindet; ansonsten wird die Nachricht verworfen.

Um diesen Ansatz umzusetzen, wird eine weitere Komponente benötigt, um die Position des mobilen Objekts zu ermitteln und damit die Zielgebietsadresse τ_{tunnel} der einkapselnden Geocast-Nachricht zu erstellen, nämlich ein *Lokationsdienst*. Mit Hilfe dieses Dienstes ermittelt der Message-Servers M_s , an den die zu sendende Nachricht zunächst mit der ursprünglichen Zielgebietsadresse vom Sender H_s übergeben wird, als erstes die Position des mobilen Objekts. Der Identifikator dieses Objekts ist Teil der Spezifikation des lokalen Referenzsystems, das zur Adressierung verwendet wird (vgl. Element `<refsysid>db-ice576</refsysid>`). Dieser Identifikator dient dem Lokationsdienst als Eingabe für eine Anfrage nach der Position des mobilen Objekts. Mit Hilfe der ermittelten Position und des (relativen) Gültigkeitsbereichs des lokalen Referenzsystems, der die Umrisse des mobilen Objekts spezifiziert (vgl. Element `<area-2d_geometric>`), kann nun von M_s das Zielgebiet τ_{tunnel} definiert werden, das die aktuelle Position des mobilen Objekts beinhaltet. Im obigen Beispiel ist dies das Zielgebiet „Hauptbahnhof Stuttgart“.

Hierbei ist zu beachten, dass die anschließende Zustellung über die globale Geocast-Infrastruktur eine gewisse Verzögerung δ einführt. Das heißt, die eingekapselte Nachricht wird erst nach δ bei den stationären Message-Servern im Zielgebiet τ_{tunnel} eintreffen. In dieser Zeit bewegt sich das mobile Objekt weiter. Bei der Konstruktion des Zielgebiets τ_{tunnel} ist daher darauf zu achten, dass dieses Zielgebiet groß genug gewählt wird, so dass es auch nach der um δ verzögerten Auslieferung noch die Position des mobilen Objekts enthält und die Nachricht somit von stationären Message-Servern empfangen wird, deren Dienstgebiet die *aktuelle* Position des mobilen Objekts enthält. Andererseits sollte τ_{tunnel} auch nicht übermäßig groß sein, denn ansonsten wird die eingekapselte Nachricht unter

Umständen von vielen Hosts empfangen, die sich gar nicht im mobilen Objekts aufhalten. Um ein solches Zielgebiet konstruieren zu können, sollte der Lokationsdienst neben der aktuellen Position π des mobilen Objekts weitere Informationen liefern, insbesondere die aktuelle Geschwindigkeit v des mobilen Objekts. Mit Hilfe dieser Information und einer angenommenen maximalen Verzögerung δ_{\max} kann M_s das Gebiet berechnen, in dem sich das mobile Objekt zum Zeitpunkt des Eintreffens der Nachricht im Zielgebiet τ_{tunnel} aufhalten wird. Im Beispiel handelt sich um einen einfachen Kreis mit Radius $r = \delta_{\max} v$ und Mittelpunkt π . τ_{tunnel} ergibt sich aus der Erweiterung dieses Gebiets um die Ausmaße des mobilen Objekts (Element `<area-2d_geometric>`). Liefert der Lokationsdienst noch weitere Informationen über die Bewegung des mobilen Objekts wie die aktuelle Bewegungsrichtung, so kann dieses Gebiet noch genauer bestimmt werden.

3.9.4 Mobile-Geocast-Vermittlung

Als zweiter Ansatz zur Vermittlung von Nachrichten an lokale Zielgebiete innerhalb von mobilen Objekten soll im Folgenden der *Mobile-Geocast-Ansatz* betrachtet werden. Im Gegensatz zur Vermittlung mittels eines Geocast-in-Geocast-Tunnels kommt dieser Ansatz ohne Lokationsdienst aus, setzt dafür aber ein geeignetes IP-basiertes Vermittlungsverfahren wie zum Beispiel Mobile-IP [Per02, JPA04] und Cellular-IP [Val99] zur Vermittlung von Nachrichten an mobile Empfänger voraus.

Der Mobile-Geocast-Ansatz teilt die Vermittlung in zwei Schritte auf. Im ersten Schritt wird die Nachricht an den mobilen Geocast-Message-Server M_{mobile} des Zielgebietes mittels Mobile IP oder Cellular IP weitergeleitet, der die Nachricht an alle internen Hosts im Zielgebiet weiterleitet.

Im zweiten Schritt sendet M_{mobile} eine herkömmliche Geocast-Nachricht an ein stationäres Zielgebiet um seine aktuelle Position, um die Nachricht an die externen Hosts innerhalb des mobilen Objekts weiterzuleiten.

Schritt 1: Schritt 1 beruht im Wesentlichen auf der Verwendung eines IP-basierten Protokolls zur Vermittlung von Nachrichten an mobile Empfänger. In diesem Fall soll die Geocast-Nachricht vom Message-Server des Senders an den mobilen Message-Server M_{mobile} ausgeliefert werden, der für das adressierte lokale Zielgebiet innerhalb des mobilen Objekts zuständig ist. Im Folgenden wird für die Beschreibung das Mobile-IP-Protokoll verwendet.

Nachdem der Sender H_s die Geocast-Nachricht an den Messager-Server des Senders, M_s übergeben hat, ermittelt M_s die *ortsunabhängige* so genannte Home Address, kurz IP_{home} , von M_{mobile} . Hierzu wird ein Verzeichnis benötigt, das den Identifikator des mobilen Objekts auf IP_{home} abbildet. Der Identifikator des mobilen Objekts ergibt sich wiederum aus der Spezifikation des adressierten lokalen Referenzsystems des mobilen Objekts (`<refsysid>db-ice576</refsysid>`). Für die Implementierung des Verzeichnisses kann zum Beispiel ein Peer-to-Peer-Netz, gebildet durch die (stationären) Message-Server oder das Domain Name System (DNS) verwendet werden.

Mit Hilfe des Mobile-IP-Protokolls kann nun M_s die Geocast-Nachricht an M_{mobile} senden. Im Allgemeinen wird die Nachricht hierbei zunächst an die Adresse IP_{home} ge-

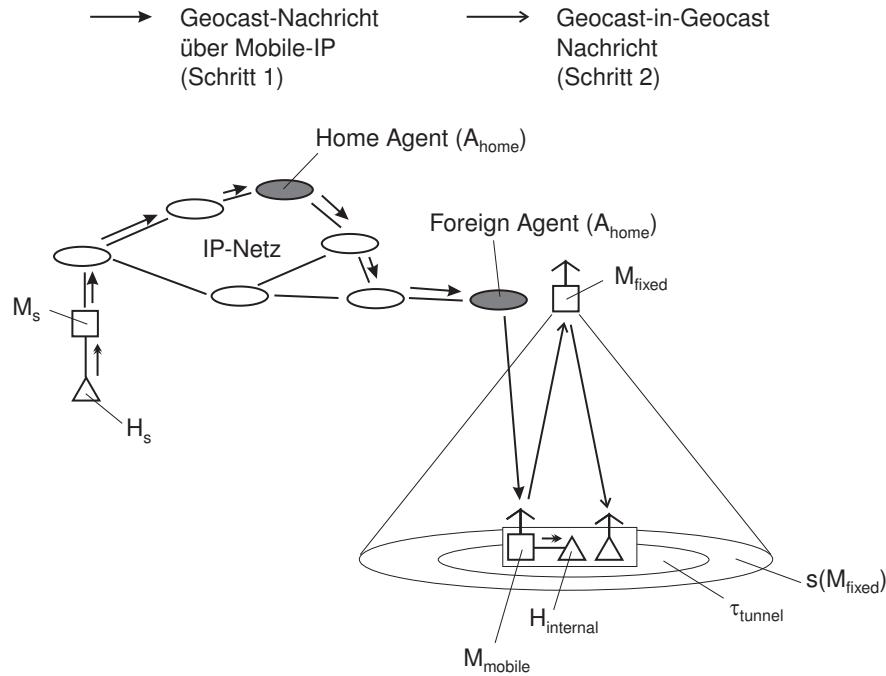


Abbildung 3.27: Mobile-Geocast-Vermittlung einer Nachricht an ein Zielgebiet innerhalb eines mobilen Objekts.

sendet und gelangt so zum so genannten Home-Agent (A_{home}) von M_{mobile} (vgl. Abbildung 3.27). A_{home} leitet die Nachricht an die so genannte Care-of-Adresse (IP_{foreign}) des mobilen Message-Servers im entfernten Zugangsnetz weiter, unter Umständen über den Umweg eines so genannten Foreign-Agents (A_{foreign}) im entfernten Zugangsnetz.

Sobald M_{mobile} die Nachricht per Mobile-IP empfangen hat, verteilt er sie an die lokalen Hosts in seinem lokalen Netz entsprechend des adressierten lokalen Zielgebiets.

Schritt 2: Im zweiten Schritt der Vermittlung wird die Nachricht an alle externen Hosts im Zielgebiet verteilt. Da M_{mobile} die externen Hosts im Gegensatz zu den internen Hosts in seinem lokalen Netz allerdings nicht kennt, da diese bei anderen, stationären Message-Servers registriert sind, kann M_{mobile} die externen Hosts nicht direkt adressieren. Um die Nachricht an die externen Hosts weiterzuleiten, benutzt M_{mobile} daher den in Abschnitt 3.9.3 beschriebene Geocast-in-Geocast-Tunnel-Ansatz. Der Tunnel geht in diesem Fall allerdings nicht vom Message-Server des Senders sondern von M_{mobile} aus (vgl. Abbildung 3.27). Das heißt, M_{mobile} sendet eine Geocast-Nachricht mit der ursprünglichen Nachricht als Inhalt an ein Zielgebiet, das die aktuelle Position des mobilen Objekts beinhaltet. Diese Nachricht wird von den externen Hosts innerhalb des mobilen Objekts über ihren jeweiligen stationären Message-Server empfangen, entkapselt, und falls das ursprüngliche Zielgebiet die Position des Hosts enthält an die lokalen Applikationen ausgeliefert.

Die Konstruktion des Zielgebiets τ_{tunnel} der getunnelten Nachricht entspricht der in Abschnitt 3.9.3 beschriebenen Konstruktion. Da M_{mobile} die Position des mobilen Objekts

kennt, ist für die Konstruktion von τ_{tunnel} allerdings kein separater Lokationsdienst notwendig, sondern M_{mobile} kann die Konstruktion rein auf Grundlage seines lokalen Wissens vornehmen.

Zu beachten ist, dass die getunnelte Geocast-Nachricht an M_{mobile} selbst auch ausgeliefert wird und M_{mobile} somit dieselbe Geocast-Nachricht zwei Mal empfängt. Die Kopie wird in diesem Fall von M_{mobile} verworfen. Um solche Duplikate zu verhindern, kann in der getunnelten Nachricht M_{mobile} als der Absender der getunnelten Nachricht eingetragen werden. Ein stationärer Message-Server sollte die Nachricht dann nicht an den Absender ausliefern.

3.10 Evaluierung

In diesem Abschnitt werden die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Vermittlungsansätze hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bewertet.

In Abschnitt 3.10.1 werden zunächst die vermaschten Geocast-Overlay-Netze für baumförmige symbolische Lokationsmodelle betrachtet. Insbesondere die Bewertung der Pfadlänge der aus den verschiedenen Strategien zur Installation von Direktverbindungen resultierenden Nachrichtenpfade steht dabei im Vordergrund. Hierbei erfolgt auch ein Vergleich der Overlay-Netz-basierten Vermittlungsansätze mit den Multicast-basierten Ansätzen, welche die Vermittlung direkt auf der IP-Ebene implementieren. Neben der Pfadlänge wird außerdem die resultierende Netzlast bewertet, die sich sowohl aus den Nutznachrichten als auch den Verwaltungsnachrichten – insbesondere den Nachrichten zur Verwaltung von dynamischen Direktverbindungen – zusammensetzt. Ferner erfolgt eine Bewertung der Robustheit des Overlay-Netzes.

In Abschnitt 3.10.2 wird das vorgeschlagene verbandsbasierte Overlay-Netz im Detail betrachtet. Diese Betrachtungen konzentrieren sich auf die Bewertung des Berechnungsaufwands. Dieser Berechnungsaufwand ist im Vergleich zu den Overlay-Netzen für baumförmige Lokationsmodelle kritisch, da für das Treffen von Weiterleitungsentscheidungen vergleichsweise aufwendige Operationen auf dem Verband wie die Berechnung des Supremums durchgeführt werden müssen.

3.10.1 Vermaschte Geocast-Overlay-Netze

Die Bewertung der vermaschten Overlay-Netze für baumförmige Lokationsmodelle wird mit Hilfe eines Netzwerksimulators durchgeführt. Die in Abschnitt 3.6 vorgestellten Vermittlungsalgorithmen wurden hierzu für das Simulationswerkzeug Network Simulator 2 (ns2) [ns09] implementiert und mit Hilfe verschiedener Szenarien evaluiert.

Bevor die eigentlichen Simulationsergebnisse vorgestellt werden, soll im nächsten Abschnitt zunächst der Simulationsaufbau mit der unterlagerten IP-Netztopologie, das angenommene baumförmige Lokationsmodell und die darauf aufbauende Basis-Overlay-Netztopologie (Router-Baum) des Geocast-Netzes einschließlich der Platzierung der Geocast-Router im unterlagerten Netz beschrieben werden.

3.10.1.1 Simulationsaufbau

Unterlagertes IP-Netz Die weiter unten vorgestellten Simulationen betrachten nicht nur die Nachrichtenvermittlung im Overlay-Netz selbst, sondern auch die resultierenden Pfade im unterlagerten IP-Netz. Durch diese Betrachtung der Pfade im IP-Netz wird insbesondere ein Vergleich der Overlay-Netz-basierten Ansätze aus Abschnitt 3.6 mit dem in Abschnitt 3.5 vorgestellten Multicast-basierten Ansatz sowie eine Bewertung der auf quellenspezifischem IP-Multicast (SSM) basierten Optimierung aus Abschnitt 3.8 ermöglicht. Um diesen Vergleich möglichst realitätsnah zu gestalten, wurde das simulierte IP-Netz nicht mit Hilfe von Topologiegeneratoren modelliert. Vielmehr wurde eine reale Netztopologie verwendet, die von Liljenstam, Liu und Nicol erfasst wurde [LLN03]. Diese Topologie besteht aus den Backbone-Netzen von acht großen Internet-Dienstanbietern aus den USA. Die Topologie modelliert IP-Router und ihre Verbindungen.

Eine Besonderheit dieser Topologie ist die Verortung der IP-Router. Für jeden IP-Router wird seine geographische Position in Form von Längen- und Breitengraden bezüglich des WGS84 als auch seine symbolische Position in Form einer symbolischen Adresse mit dem Aufbau /Land/Staat/Stadt¹¹ modelliert. Obwohl diese Positionen nur Annäherungen darstellen, so können sie doch als Ausgangspunkt für eine Abbildung von Geocast-Overlay-Routern auf ihre Position im unterlagerten IP-Netz dienen.

Die gesamte IP-Netztopologie besteht aus 44.223 IP-Routern und 68.681 Verbindungen zwischen diesen Routern. Das gesamte Netz ist allerdings aufgrund seiner Größe nicht für eine Simulation geeignet. Um eine durch den Netzwerksimulator ns2 handhabbare IP-Netztopologie zu erhalten, wurden 2942 Router eines autonomen Systems ausgewählt, die ein zusammenhängendes IP-Netz innerhalb der in Abbildung 3.28 dargestellten Region zwischen dem 38sten und 42sten nördlichen Breitengrad und dem 70sten und 80sten westlichen Längengrad bilden.

Lokationsmodell und Basis-Geocast-Overlay-Netz Das in den folgenden Simulationen angenommene *Lokationsmodell* ist baumförmig und besteht aus vier Ebenen: Länder, Staaten, Städte und Stadtteile.

Aufbauend auf dem Lokationsmodell wurde die *Basis-Topologie* des Geocast-Overlay-Netzes als eine baumförmige Topologie entsprechend des Lokationsbaumes erstellt – diese Topologie wird im Zuge der Simulation um zusätzliche Direktverbindungen erweitert. Jedes im Folgenden betrachtete Geocast-Overlay-Netz besteht somit aus einer Menge von Geocast-Routern für Länder, Staaten, Städte und Stadtteile. Für jede Lokation wird hierbei ein eigener physischer Router vorgesehen (entsprechend der Größe der betrachteten Lokationen ist dies eine realistische Annahme).

Geocast-Router des Overlay-Netzes werden bei IP-Routern des unterlagerten IP-Netzes platziert. Diese Platzierung erfolgt anhand einer einfachen Heuristik zur *lokale Overlay-Router-Platzierung*. Hierbei wird der designierte Geocast-Router mit einem bestimmten Dienstgebiet mit einem IP-Router assoziiert, dessen Position sich im entsprechenden Gebiet befindet. Existieren mehrere solche IP-Router wird aus der Menge jeweils ein Router zufällig ausgewählt. Hierfür wird die oben beschriebene IP-Router-Position

¹¹Ein Staat bezeichnet hierbei einen Bundesstaat des Landes USA.

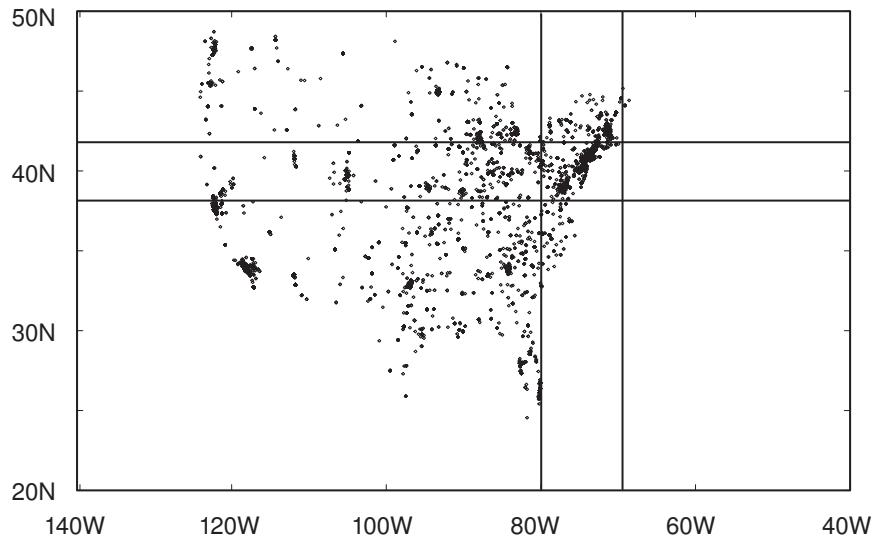


Abbildung 3.28: Unterlagertes IP-Netz mit den geographischen Positionen der IP-Router.

verwendet, die durch das modellierte IP-Netz vorgegeben wird.¹² Beispielsweise könnte der designierte Stadt-Router der Lokation „New York City“ (/us/ny/newyork) bei einem IP-Router mit der Position /us/ny im Staat „New York State“ platziert werden.

Ein Geocast-Message-Server wird bei jedem IP-Router platziert, der nur eine Verbindung (engl. link) besitzt. Solche Router markieren Zugangs-Router zu lokalen Netzen. Entsprechend wird angenommen, dass jeder Geocast-Message-Server ein lokales Netz abdeckt, dessen Gebiet einem Stadtteil entspricht.¹³

Die Simulation betrachtet nur die globale Vermittlung von Geocast-Nachrichten. Die lokale Vermittlung innerhalb eines lokalen Netzes eines Geocast-Message-Servers ist dagegen nicht Gegenstand der Evaluierung. Entsprechend erfolgt keine detaillierte Modellierung der lokalen Netze der Geocast-Message-Server.

3.10.1.2 Bewertung statischer Direktverbindungen

Zunächst soll in diesem Abschnitt die Länge von Nachrichtenpfaden bewertet werden, die mit Hilfe eines Geocast-Overlay-Netzes mit statischen Direktverbindungen, wie es in Abschnitt 3.6.2.1 beschrieben wurde, erzielt wird. Overlay-Netze mit dynamischen Direktverbindungen sind dann Gegenstand des folgenden Abschnittes.

Szenarien

Die Leistungsfähigkeit eines Overlay-Netzes mit statischen Direktverbindungen hängt wesentlich von den Eigenschaften des Nachrichtenverkehrs ab. Wie in Abschnitt 3.6.2.1 be-

¹²Das IP-Netzmodell bildet die Positionen von IP-Routern nur mit Städtegenauigkeit ab. Stadtteil-Geocast-Router werden daher mit IP-Routern assoziiert, die in der übergeordneten Stadt positioniert sind.

¹³Da die unterlagerte IP-Netztopologie Positionen nur mit Stadtgenauigkeit modelliert, entsprechen die Stadtteile der Simulation keinen realen Stadtteilen.

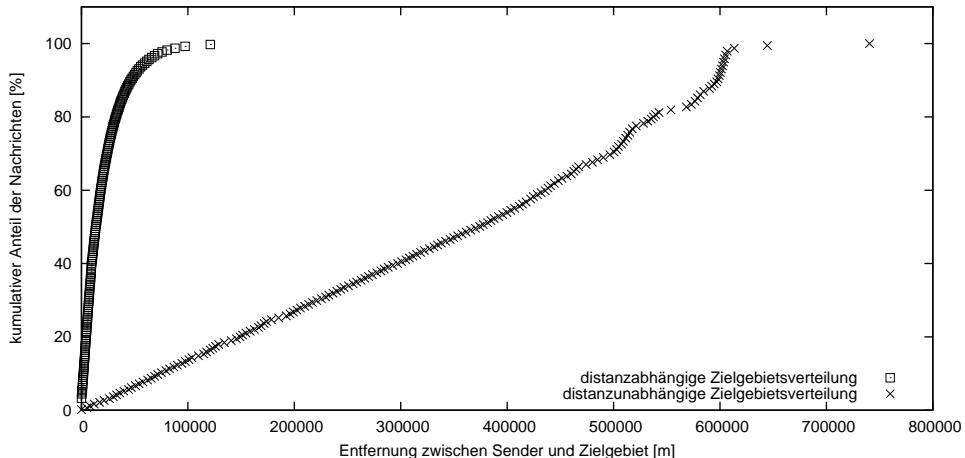


Abbildung 3.29: Geographische Zielgebietsverteilung.

reits erwähnt, zielt die dort vorgestellte Heuristik zur statischen Auswahl von Direktverbindungen auf Szenarien ab, in denen die Mehrzahl der Nachrichten an Zielgebiete in der Nähe des Senders gesendet werden. Die Heuristik richtet daher für einen Router r mit einem bestimmten Dienstgebiet $s(r)$ mehr Direktverbindungen zu Routern ein, deren Dienstgebiete nahe zum Dienstgebiet von r liegen, als zu solchen mit entfernten Dienstgebieten. Die Auswirkungen dieser Annahme sollen mit Hilfe der Simulation von Szenarien mit verschiedenen geographischen Zielgebietsverteilungen evaluiert werden.

Bei der *distanzabhängigen Zielgebietsverteilung* wird eine starke Lokalität der Zielgebiete angenommen, das heißt, ein Sender adressiert vor allem Zielgebiete in seiner näheren Umgebung und selten entfernte Zielgebiete. Abbildung 3.29 zeigt die Verteilung der geographischen Entfernung vom Sender zum jeweils adressierten Zielgebiet. Diese Verteilung folgt einer exponentiellen Funktion die kurze Distanzen stark favorisiert. Ungefähr 90% aller Nachrichten werden an Zielgebiete versendet, die höchstens 50 km vom Sender entfernt sind.

Bei der *distanzunabhängigen Zielgebietsverteilung* ist die Distanz zwischen Sendern und Zielgebiet dagegen gleichverteilt. Das bedeutet, Nachrichten an entfernte Zielgebiete besitzen die gleiche Wahrscheinlichkeit wie Nachrichten an nahe Zielgebiete. Abbildung 3.29 zeigt neben der distanzabhängigen auch die distanzunabhängige Zielgebietsverteilung. In dieser Abbildung ist zu sehen, dass die tatsächlich verwendeten Verteilungen von der jeweils idealen Verteilung abweichen. Insbesondere die distanzunabhängige Verteilung zeigt für größere Zielgebietsabstände Abweichungen von einer idealen (linearen) Gleichverteilung. Diese Abweichung ist durch die tatsächliche geographische Verteilung der Message-Server beziehungsweise ihrer Dienstgebiete begründet. Insbesondere für größere Abstände ist es nicht immer möglich, für einen gewählten Sender ein Zielgebiet zu wählen, das einen bestimmten geforderten Abstand aufweist.

Neben der geographischen Verteilung von Zielgebieten spielt auch die Größe des Zielgebiets eine Rolle für die Effizienz des Verfahrens. Direktverbindungen optimieren vor allem die erste Phase der Weiterleitung durch Verkürzung des Nachrichtenpfades zum

designierten Geocast-Router des Zielgebiets. Die zweite Phase der Verteilung der Nachricht an alle Router im Zielgebiet bleibt von Direktverbindungen unbeeinflusst, da hier die Nachricht entlang der Vater-Kind-Verbindungen des Baumes weitergeleitet wird. Je nach Größe und Entfernung des Zielgebiets überwiegt somit der Einfluss der ersten oder zweiten Phase.

Um die Zielgebietsgröße zu berücksichtigen, werden zwei verschiedene Szenarien betrachtet. Im ersten Szenario werden *kleine Zielgebiete* von der Größe eines Stadtteils adressiert. Hierbei handelt sich in der zugrunde liegenden Lokationshierarchie um die Blattniveau der Hierarchie. Im zweiten Szenario werden *große Zielgebiete* von der Größe eines Staates adressiert.

Sowohl die Szenarien mit unterschiedlicher geographischer Zielgebietsverteilungen als auch die Szenarien mit unterschiedlicher Zielgebietsgrößen werden miteinander kombiniert, so dass sich insgesamt vier Evaluationsszenarien ergeben:

1. distanzabhängige Zielgebietsverteilung, kleine Zielgebiete
2. distanzunabhängige Zielgebietsverteilung, kleine Zielgebiete
3. distanzabhängige Zielgebietsverteilung, große Zielgebiete
4. distanzunabhängige Zielgebietsverteilung, große Zielgebiete

Jeder Simulationslauf besteht aus 10.000 Nachrichten. Für jede Nachricht wird zunächst ein zufälliger Message-Server ausgewählt, der als Message-Server des Senders und somit als Startpunkt der globalen Vermittlung dient. Entsprechend der zu analysierenden geographischen Zielgebietsverteilung und Zielgebietsgröße wird dann ein Zielgebiet ausgewählt und die Nachricht über das Geocast-Overlay-Netz vermittelt. Das Geocast-Overlay-Netz ist entsprechend der statischen Direktverbindungsheuristik aus Abschnitt 3.6.2.1 strukturiert. Das heißt, jeder Router besitzt neben den Verbindungen des Basis-Router-Baums zum Vater- und seinen Kind-Routern weitere Verbindungen zu seinen Vorfahren und den direkten Kindern seiner Vorfahren.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse für kleine Zielgebiete gefolgt von den Ergebnissen für große Zielgebiete beschrieben.

Pfadlänge bei kleinen Zielgebieten

Als Leistungsmetrik zur Bewertung der Länge von Nachrichtenpfaden dient der so genannte *Dehnungsfaktor* (engl. *stretch factor*). Der Dehnungsfaktor, im Folgenden mit *stretch* bezeichnet, gibt an, um welchen Faktor der durch Vermittlung im Overlay-Netz resultierende Nachrichtenpfad p_{overlay} im unterlagerten IP-Netz länger ist als der optimale Pfad p_{opt} im IP-Netz. Die Pfadlängen sowohl von p_{overlay} als auch p_{opt} werden dabei jeweils durch die Anzahl der IP-Router bestimmt, die im IP-Netz von einer Geocast-Nachricht traversiert werden, bis sie von den Message-Servern im Zielgebiet empfangen wird:

$$\text{stretch} = \frac{\text{length}(p_{\text{overlay}})}{\text{length}(p_{\text{opt}})} \quad (3.19)$$

Ein Dehnungsfaktor von zwei bedeutet somit beispielsweise einen im Vergleich zum Optimum doppelt so langen Pfad und entsprechend doppelt so viele Pakete und somit Last im IP-Netz. Die Pfadlänge ist somit nicht nur eine Metrik für die Verzögerung sondern insbesondere für die resultierende Last im Netz.

Der theoretisch optimale Pfad mit der geringsten resultierenden Netzlast wird durch einen so genannten Steiner-Baum im unterlagerten IP-Netz definiert, das heißt, einem gewichtsminimalen Baum, der den sendenden Geocast-Message-Server mit den Geocast-Message-Servern im Zielgebiet verbindet. Allerdings erweist sich das Auffinden eines Steinerbaums in der Praxis bei einer größeren Menge an zu verbindenden Geocast-Message-Servern als problematisch, da das Steiner-Problem ein NP-vollständiges Problem ist. Daher wird der „optimale“ Pfad im Folgenden auf Grundlage eines Baums der kürzesten Pfade (engl. single source shortest path tree) mit dem Geocast-Message-Server des Senders als Wurzel definiert. Dieser Baum wird so beschnitten, dass er nur Pfade enthält, die zu Geocast-Message-Servern im Zielgebiet führen. Da ein solcher Baum auch das Resultat herkömmlicher IP-Multicast-Vermittlungsalgorithmen wäre, ermöglicht diese Definition von p_{opt} einen realistischeren Vergleich mit IP-Multicast-basierten Vermittlungsprotokollen als ein theoretisch optimaler Steiner-Baum.

Der optimale Pfad im IP-Netz mit $\text{stretch} = 1$ ist dabei im Allgemeinen durch ein Overlay-Netz-basiertes Vermittlungsverfahren nicht zu erreichen, wohl aber durch ein Vermittlungsverfahren, das im IP-Netz selbst implementiert wird, wie das in Abschnitt 3.5.2 beschriebene verzeichnisbasierte Verfahren mit IP-Multicast-basierter Vermittlung oder die in Abschnitt 3.8 beschriebene optimierte Nachrichtenvermittlung mittels eines quellenspezifischen IP-Multicast-Protokolls (SSM). Somit kann mit Hilfe des Dehnungsfaktors auch ein Vergleich der vorgestellten Overlay-Netz-basierten Verfahren mit den vorgestellten IP-Multicast-basierten Verfahren erfolgen, beziehungsweise der durch die vorgeschlagene Optimierung durch SSM erzielte Gewinn bewertet werden.

Abbildung 3.30 zeigt die kumulative Verteilung des durchschnittlichen Dehnungsfaktors für die verschiedenen geographischen Zielgebietsverteilungen. Im Durchschnitt werden Dehnungsfaktoren von 1,9 und 2,3 für die distanzabhängige beziehungsweise für die distanzunabhängige Zielgebietsverteilung erreicht. Für distanzabhängige Zielgebietsverteilungen werden somit geringere Dehnungsfaktoren erzielt. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass durch die gewählte statische Direktverbindungsstrategie kürzere Overlay-Netz-Verbindungen zu geographisch nahen Zielgebieten erreicht werden – die durchschnittliche Pfadlänge im Overlay-Netz beträgt 1,95 für die distanzabhängige Zielgebietsverteilung und 2,91 für gleichverteilte Zielgebiete. Eine Nachricht zu entfernten Gebieten muss somit mehr Geocast-Router im Overlay-Netz traversieren. Da jeder Vermittlungsschritt (engl. hop) im Overlay-Netz eine gewisse Anzahl an Vermittlungsschritten im IP-Netz erfordert, wächst der resultierende „Umweg“ bezüglich der direkten Vermittlung im IP-Netz an, wenn mehr Overlay-Router traversiert werden. Hieraus zeigt sich die Ausrichtung der verwendeten statischen Direktverbindungsstrategie auf entsprechende Szenarien mit lokaler Zielgebietsverteilung.

Ferner zeigt Abbildung 3.30, dass obwohl die Anzahl der Nachrichten mit großen Dehnungsfaktoren klein ist, trotzdem eine gewisse Anzahl an Nachrichten einen sehr hohen Dehnungsfaktor von zehn und mehr aufweisen. Insbesondere wenn der optimale Pfad im

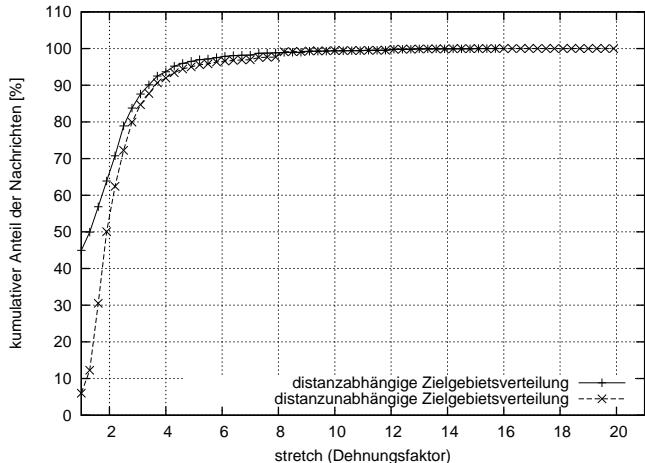


Abbildung 3.30: Kumulative Verteilung der Dehnungsfaktoren bei der Adressierung kleiner Zielgebiete (Stadtteile) in einem Overlay-Netz mit statischen Direktverbindungen.

unterlagerten IP-Netz sehr kurz ist, führt auch bereits eine kleine Anzahl von traversierten Overlay-Routern zu solch hohen Dehnungsfaktoren. Die absolute Pfadlänge im IP-Netz ist aber auch in diesem Fall relativ gering. In der Simulation wurden durchschnittliche absolute Pfadlängen im IP-Netz von 13,5 und 18,2 IP-Routern für distanzabhängige beziehungsweise distanzunabhängige Zielgebiete erreicht. Das Maximum lag bei 44 und 46 IP-Routern. Der optimale Pfad hatte im Durchschnitt eine Länge von 7,6 und 8,8 IP-Routern jeweils für distanzabhängig beziehungsweise distanzunabhängig verteilte Zielgebiete und eine maximalen Länge von 19 IP-Routern (unabhängig von der geographischen Zielgebiete Verteilung).

Pfadlänge bei großen Zielgebieten

Im vorangegangen Abschnitt wurden vergleichsweise kleine Zielgebiete von der Größe einzelner Stadtteile betrachtet, welche die Blattebene der exemplarischen Lokationshierarchie darstellen. Da pro Stadtteil im betrachteten Szenario genau ein Geocast-Message-Server zuständig ist, wurde die Nachricht auf einem einzelnen unverzweigten Pfad zu diesem Server weitergeleitet. Der Schwerpunkt der Weiterleitung lag somit auf der ersten Phase der Geocast-Nachrichtenvermittlung, also der Weiterleitung zum designierten Router der Zielgebetslokation. In diesem Abschnitt sollen dagegen größere Zielgebiet von der Größe ganzer Staaten betrachtet werden. Da jeder Staat mehrere Städte und jede Stadt wieder mehrere Stadtteile enthält, wird nun die zweite Phase der Nachrichtenvermittlung – die Verteilung der Nachricht im Teilbaum des designierten Routers der Ziellokation durch Weiterleitung entlang der Hierarchie – ein stärkeres Gewicht erlangen. Der Nachrichtenpfad spaltet sich somit beim designierten Router der Ziellokation auf und erzeugt eine größere Menge an Nachrichtenkopien in Phase 2.

Abbildung 3.31 zeigt die resultierenden Dehnungsfaktoren bei der Adressierung großer Stadtteile für Szenarien mit distanzabhängigen und -unabhängigen Zielgebets-

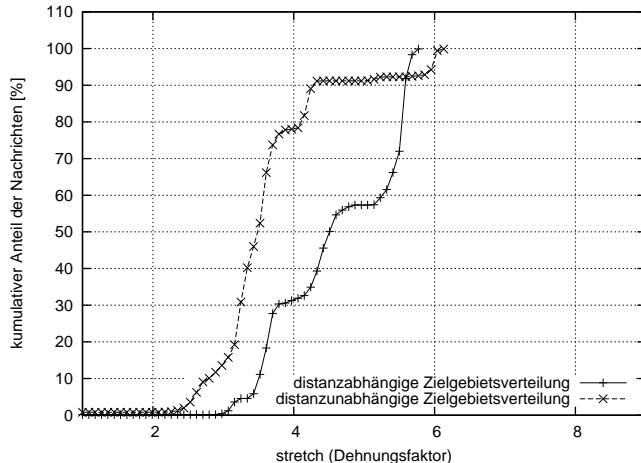


Abbildung 3.31: Kumulative Verteilung der Dehnungsfaktoren bei der Adressierung großer Zielgebiete (Staaten) in einem Overlay-Netz mit statischen Direktverbindungen.

verteilungen. Im Gegensatz zur Adressierung kleiner Zielgebiete führen bezüglich der geographischen Distanz zum Absender gleichverteilte Zielgebiete dieses Mal zu kleineren Dehnungsfaktoren. Dieses auf den ersten Blick überraschende Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass der Großteil der Pakete einer Nachricht nun in der zweiten Phase der Nachrichtenvermittlung auftritt, wenn die Nachricht vom designierten Router des Zielgebiets aus entlang des Router-Baumes an alle Geocast-Router im Zielgebiet verteilt wird. Der Dehnungsfaktor wird also primär von der Struktur des Teilbaum des adressierten Staates bestimmt, unabhängig davon, wie weit der Staat vom Sender entfernt liegt. Die Entfernung vom Sender und die Optimierung durch Direktverbindungen hat nur Einfluss auf die erste Phase, die in diesem Fall im Vergleich zur zweiten Phase nur wenige Pakete im IP-Netz auf dem Pfad vom Sender zum designierten Router des Zielgebiets erzeugt. Das heißt, Nachrichten an denselben Staat führen zu nahezu gleichen Dehnungsfaktoren, unabhängig von der Entfernung des Senders zum Zielgebiet. Im betrachteten Szenario führen beispielsweise Nachrichten an den Staat Virginia zu den größten Dehnungsfaktoren. Im Szenario werden 42% aller Nachrichten an den Staat Virginia gesendet. Dies führt in Abbildung 3.31 zum letzten steilen Anstieg, der vor allem in der Kurve der distanzabhängigen Zielgebiete deutlich zu sehen ist. Für distanzunabhängig verteilte Zielgebiete werden dagegen nur ca. 8% der Nachrichten an den Staat Virginia gesendet. Der letzte steile Anstieg fällt daher deutlich geringer aus. Insgesamt spiegelt die treppenförmige Kurve die einzelnen Staaten mit den jeweils charakteristischen Dehnungsfaktoren wieder, wobei die Höhe der Stufen durch den Anteil der Nachrichten bestimmt wird, die an den jeweiligen Staat gesendet werden.

Da die zweite Phase unabhängig von der Auswahlstrategie der Direktverbindungen ist, können die Ergebnisse für große Zielgebiete, bei denen die zweite Phase der Nachrichtenweiterleitung dominiert, auch auf die weiter unten evaluierten Geocast-Overlay-Netze mit dynamischen Direktverbindungen übertragen werden.

Insgesamt zeigt diese Bewertung, dass die Heuristik zur Auswahl statischer Direkt-

verbindung zu kurzen Nachrichtenpfaden führt, insbesondere, wenn Zielgebiete in der Nähe des Senders adressiert werden. Des Weiteren zeigt diese Evaluierung, dass die in Abschnitt 3.8 vorgeschlagene Optimierung durch ein IP-Multicast-Protokoll (SSM) Nachrichtenpfade im Durchschnitt um den Faktor zwei und mehr verbessern kann. Eine solche Optimierung zahlt sich vor allem dann aus, wenn viele oder große Nachrichten von einem Sender an ein bestimmtes Zielgebiet gesendet werden.

3.10.1.3 Bewertung dynamischer Direktverbindungen

Nachdem im vorigen Abschnitt eine Bewertung der Geocast-Overlay-Netze mit statischen Direktverbindungen durchgeführt wurde, soll in diesem Abschnitt eine entsprechende Bewertung der Overlay-Netze mit dynamischen Direktverbindungen, wie sie in Abschnitt 3.6.2.2 beschrieben wurden, erfolgen. Hierbei wird sowohl ein Vergleich der Overlay-basierten Vermittlung mit dynamischen Direktverbindungen zur optimalen IP-Multicast-basierten Vermittlung durchgeführt, als auch ein Vergleich mit dem Geocast-Overlay-Ansatz basierend auf statischen Direktverbindungen.

Szenarien

Der hier verwendete Simulationsaufbau entspricht dem bereits in Abschnitt 3.10.1.1 vorgestellten Aufbau, bestehend aus einem unterlagerten Netz von IP-Routern, basierend auf dem oben eingeführten Modell einer realen IP-Router-Infrastruktur und dem darauf aufbauenden Basis-Geocast-Overlay-Netz. Das Basis-Overlay-Netz besteht wiederum aus Länder-, Staaten-, Stadt- und Stadtteil-Geocast-Routern, die zunächst eine baumförmige Topologie bilden und die entsprechend der lokalen Platzierungsheuristik aufgrund ihres jeweiligen Dienstgebiets bei lokalen IP-Routern im unterlagerten IP-Netz platziert werden.

Um die Leistungsfähigkeit des in dieser Arbeit in Abschnitt 3.6.2.2 vorgeschlagenen Overlay-Netzes mit dynamischen Direktverbindungen – im Folgenden als *Adaptive Shortcut Routing* (ASR) bezeichnet – bewerten zu können, erfolgt ein Vergleich mit verschiedenen alternativen Geocast-Vermittlungsansätzen. Zum einen wird hierbei ein Vergleich mit der Multicast-basierten Vermittlung im IP-Netz vorgenommen. Der Multicast-basierte Ansatz wird hierbei nicht explizit als eigener Ansatz aufgeführt. Vielmehr erfolgt der Vergleich durch die in Gleichung 3.19 eingeführte Dehnungsfaktor-Leistungsmetrik. Die IP-Multicast-basierte Vermittlung erreicht dabei einen optimalen Dehnungsfaktor von 1; Overlay-Netz-basierte Ansätze erzielen im Allgemeinen Dehnungsfaktoren größer 1. Ein optimaler Dehnungsfaktor von 1 wird auch durch die vorgeschlagene IP-Multicast-basierte Optimierung aus Abschnitt 3.8 erzielt, so dass durch die Betrachtung des Dehnungsfaktors wiederum eine Bewertung des erzielbaren Gewinns durch den Einsatz dieser Optimierung erfolgen kann.

Zum anderen erfolgt ein Vergleich von ASR mit zwei weiteren Overlay-Netz-basierten Ansätzen zur Vermittlung symbolisch adressierter Nachrichten. Der erste dieser Vergleichsansätze benutzt ein rein baumförmiges Overlay-Netz ohne jegliche Direktverbindungen. Dieser Ansatz wird als *Basic Routing* (BR) bezeichnet. Der zweite Vergleichsansatz ist das Overlay-Netz mit statischen Direktverbindungen, wie es in Abschnitt 3.6.2.1

eingeführt und bereits im vorigen Abschnitt betrachtet wurde. Dieser Ansatz wird im Folgenden als *Static Shortcut Routing* (SSR) bezeichnet.

Der Vergleich von ASR mit SSR ist dabei von besonderem Interesse, da SSR auf ein bestimmtes Kommunikationsmuster hin optimiert wurde, nämlich Szenarien, in denen ein Sender hauptsächlich Zielgebiete in seiner Umgebung adressiert. Dasselbe gilt für BR, denn die Basis-Router-Hierarchie ohne Direktverbindungen weist ebenfalls eine Struktur auf, bei der nahe Zielgebiete über kürzere Wege im Overlay-Netz erreichbar sind als ferne Gebiete, bei denen Nachrichten zunächst weit in der Hierarchie auf- und dann wieder zum Zielgebiet hin absteigen. ASR hingegen passt seine Direktverbindungsziellokationen dynamisch an die Popularität von Zielgebieten an.

Um die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Ansätze zu bewerten, werden verschiedene Szenarien mit verschiedenen Kommunikationsmustern evaluiert. Zunächst wird hierzu die Popularität von Zielgebieten variiert, um insbesondere die Auswirkung auf ASR zu untersuchen, das sich dynamisch an diese Popularität anpasst. Es wird dabei zwischen drei verschiedenen ZielgebietssPopularitäten unterschieden:

Gleichverteilt: Alle potenziellen Zielgebiete besitzen die gleiche Popularität.

Konzentriert-1: Die Popularität der Zielgebiete folgt einer Zipf-Verteilung. Das heißt, die Popularität $P(X = x)$ einer Nachricht an das Zielgebiet τ_x mit $1 \leq x \leq N_{\text{targets}}$ wird definiert durch $P(X = x) = \frac{x^{-s}}{\sum_{n=1}^{N_{\text{targets}}} \frac{1}{n}}$. Die Anzahl potentieller Zielgebiete N_{targets} (Stadtteile) beträgt dabei 1271. Für Konzentriert-1 gilt $s = 1$. Jeder Sender definiert dabei seine Popularität unabhängig von den anderen Sendern. Er ordnet dazu alle Zielgebiete zufällig oder anhand der Distanz des Zielgebiets zum Sender (siehe unten) und berechnet die Popularität jedes Zielgebiets mit der entsprechenden Ord- nungsnummer x entsprechend der Funktion $P(X = x)$. Bei dieser Verteilung sendet ein Sender ca. 80% seiner Nachrichten an ca. 25% der Ziele (vgl. Abbildung 3.32).

Konzentriert-2: Die Popularität eines Zielgebiets wird durch eine Zipf-Verteilung mit $s = 2$ definiert. In diesem Fall sendet ein Sender ca. 95% seiner Nachrichten an ca. 1% der Ziele (vgl. Abbildung 3.32).

Die verschiedenen ZielgebietssPopularitäten sind nochmals in Abbildung 3.32 grafisch dargestellt. Diese Abbildung zeigt die kumulative Verteilung der Popularität. Alle möglichen Zielgebiete sind hierzu entlang der X-Achse entsprechend ihrer Popularität aufsteigend sortiert aufgelistet (Rangliste). In Y-Richtung ist die kumulative Popularität $P(X \leq x)$ aller Zielgebiete mit einem Rang kleiner gleich x aufgetragen.

Jeder Sender wählt dabei die Popularität der von ihm adressierten Zielgebiete unab- hängig. Ein Sender aus New York City favorisiert daher unter Umständen andere Zielge- biete als ein Sender in Arlington, Virginia.

Um den Einfluss der Annahme von SSR zu bewerten, dass ein Sender die meisten Nachrichten an Ziele in seiner Umgebung sendet, werden ähnlich wie bei der Evaluierung des Ansatzes mit statischen Direktverbindungen in Abschnitt 3.10.1.2 zwei unterschiedli- che geographische Zielgebetsverteilungen betrachtet:

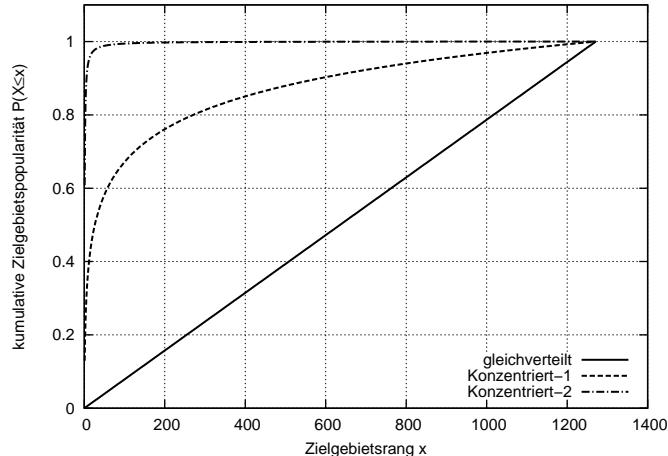


Abbildung 3.32: Kumulative Verteilung der Zielgebetspopularität.

Distanzabhängige Zielgebetsverteilung: Aus der Sicht eines Senders weisen nahe Zielgebiete eine höhere Relevanz auf als entfernte. Das heißt, die Popularität eines Zielgebiets sinkt mit steigender Entfernung zum Sender. Jeder Sender ordnet hierzu alle potenziellen Zielgebiete anhand ihrer jeweiligen geographischen Entfernung zum Sender. Die Popularität eines Zielgebiets wird dann entsprechend der oben eingeführten Popularitätsverteilungen (gleichverteilt, Konzentriert-1, Konzentriert-2) bestimmt.

Distanzunabhängige Zielgebetsverteilung: Aus Sicht eines Senders hängt die Popularität nicht von der geographischen Lage des Zielgebiets, genauer, seiner Entfernung zum Zielgebiet ab. Jeder Sender ordnet die potentiellen Zielgebiete zufällig und definiert die Popularität eines Zielgebiets entsprechend der oben eingeführten Popularitätsverteilungen (gleichverteilt, Konzentriert-1, Konzentriert-2).

Somit ergeben sich insgesamt fünf¹⁴ verschiedene Kommunikationsmuster beziehungsweise Zielgebetsverteilungen:

- Gleichverteilt
- Distanzabhängig/Konzentriert-1
- Distanzabhängig/Konzentriert-2
- Distanzunabhängig/Konzentriert-1
- Distanzunabhängig/Konzentriert-2

¹⁴Bei der gleichverteilten Zielgebetspopularität ergeben sich durch die Kombination mit den geographischen Zielgebetsverteilungen keine unterschiedlichen Verteilungen. Es wird daher im Folgenden nur allgemein von einer Gleichverteilung gesprochen.

Während der Simulation werden Nachrichten von Sendern in den verschiedenen Stadtteilen mit einer durchschnittlichen Nachrichtenrate von einer Nachricht pro Sekunde und Stadtteil verschickt. Für jede Nachricht wird wiederum ein zufälliger Message-Server ausgewählt, der als Message-Server des Senders und somit als Startpunkt der Vermittlung dient. Die Wahl des Zielgebiets erfolgt entsprechend der oben definierten Zielgebietsverteilungen. In den Simulationen wird dabei weiterhin nur die globale Geocast-Vermittlung vom Message-Server des Senders bis hin zu den Message-Servern im Zielgebiet betrachtet; die lokale Vermittlung in den lokalen Netzen der Geocast-Message-Server wird nicht bewertet.

Als Zielgebiete dienen dieses Mal nur kleine Gebiete von der Größe eines Stadtteils. Wie die Evaluierung in Abschnitt 3.10.1.2 bereits zeigte, hat die Auswahl der Direktverbindungen für große Zielgebiete praktisch keinen Einfluss auf die Leistung (Pfadlänge), da die größte Nachrichtenlast hier in Phase 2 (Verteilung im Zielgebiet) entsteht. Der Fokus liegt für die folgenden Simulationen daher auf Phase 1 der Vermittlung, das heißt, auf der Vermittlung vom Sender bis zum designierten Router des Zielgebiets.

Jede der im Folgenden dargestellten Kurven ist das gemittelte Ergebnis von fünf Simulationsläufen von je 200 s simulierter Dauer.

Pfadlänge: Einfluss der Puffergröße

Zunächst soll für ASR der Einfluss der Größe des Puffers B_{hot} für so genannte heiße Direktverbindungsziellokationen auf die erzielte Nachrichtenpfadlänge betrachtet werden. Um den Aufwand der Direktverbindungsverwaltung zu minimieren, besitzt B_{hot} wie in Abschnitt 3.6.2.2 im Detail beschrieben eine beschränkte Größe. Nur für Ziellokationen in B_{hot} werden tatsächlich Direktverbindungen eingerichtet. Es ist daher zu erwarten, dass für einen größeren Puffer die Pfadlänge abnimmt, da mehr Direktverbindungen eingerichtet werden können. Dieser Einfluss soll an dieser Stelle quantitativ untersucht werden.

Hierzu wird in der Simulation die Größe des Puffers B_{hot} variiert. B_{warm} , der für die Aufnahme sich aufwärmender oder abgekühlter Zielgebiete verwendet wird (vgl. Abschnitt 3.6.2.2), hat eine fixe Größe von 1000 Einträgen. Der Parameter λ , mit dem der Einfluss der Referenzierungshäufigkeit und -aktualität beeinflusst werden kann, hat einen Wert von $\lambda = 0,05$. Die Simulation wurde für distanzunabhängige Zielgebietsverteilungen durchgeführt. Andere Werte für λ und distanzabhängige Zielgebietsverteilungen ergeben nur minimal unterschiedliche Ergebnisse und werden daher hier nicht zusätzlich präsentiert.

Abbildung 3.33 zeigt die erzielten Dehnungsfaktoren für wachsende Größen von B_{hot} . Ohne jegliche Direktverbindungen ($|B_{hot}| = 0$) ist der Nachrichtenpfade um den Faktor 4,7 länger als der optimale Pfad. Wie erwartet nimmt der Dehnungsfaktor mit wachsender Puffergröße ab. Bereits kleine Puffergrößen von 20 Einträgen führen zu einer Pfadverkürzung um 50% bis zu 75% im Vergleich zu einem Overlay-Netz ohne Direktverbindungen. Bemerkenswerterweise werden Pfade für ein Puffergröße von $|B_{hot}| = 20$ auch für eine gleichverteilte Popularität – den schlechtesten Fall für eine popularitätsgesteuerte Heuristik zur Auswahl von Direktverbindungen – bezüglich ihrer Länge fast halbiert. In diesem Fall wird B_{hot} mit den (wenigen) Gebieten naher der Wurzel der Lokationshier-

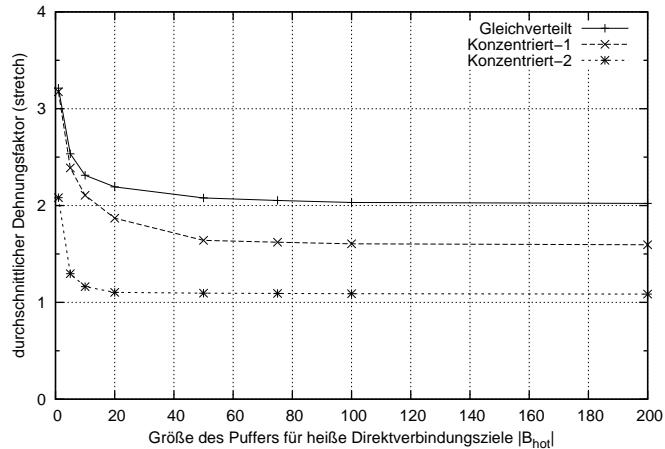


Abbildung 3.33: Dehnungsfaktoren unter Verwendung von ASR für verschiedene Größen des Puffers B_{hot} .

archie wie Ländern oder Staaten gefüllt, so dass für viele Nachrichten durch Direktverbindungen der Aufstieg in der Hierarchie mit einem einzelnen Vermittlungsschritt (engl. hop) durchgeführt werden kann.

Für die Verteilung Konzentriert-2 mit sehr stark ausgeprägten „Hotspots“ selektiert ASR dagegen die (wenigen) sehr populären Zielgebiete als Direktverbindungsziele. Hierdurch kann für diese Gebiete nahezu die gesamte Hierarchie umgangen und die Geocast-Nachricht direkt in einem Schritt zum Zielgebiet übertragen werden. Bereits für eine Puffergröße von 20 Einträgen ergibt sich in diesen Fall ein nahezu optimaler Dehnungsfaktor nahe 1,0. Für die Verteilung Konzentriert-1 mit weniger stark ausgeprägten Hotspots wird die optimale Leistung für ca. 50 Puffereinträge erreicht. In den folgenden Simulationen wird die Puffergröße daher auf 50 Einträge festgelegt.

Pfadlängen: Vergleich von ASR, SSR und BR

In diesem Abschnitt erfolgt ein Vergleich der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Overlay-Netz-basierten Geocast-Vermittlungsverfahren ASR, SSR und BR. ASR wird hierzu wie folgt parametrisiert: $|B_{hot}| = 50$, $|B_{warm}| = 1000$, $\lambda = 0,05$. Die simulierte Zeit beträgt 200 s. Zu Beginn der Simulation haben die Geocast-Router bei der Verwendung von ASR keine Direktverbindungen eingerichtet, das heißt, B_{hot} ist zu Beginn leer. ASR richtet entsprechend der Popularität der adressierten Ziellokationen im Laufe der Simulation Direktverbindungen ein. Bei der Verwendung von SSR sind die statischen Direktverbindungsziellokationen fest vorgegeben und somit bereits zu Beginn der Simulation bekannt und während der Simulation unveränderlich. Entsprechende Direktverbindungen sind daher bereits zum Start der Simulation durch SSR nutzbar.

Die drei Abbildungen 3.34–3.36 zeigen die ermittelten Dehnungsfaktoren für die drei betrachteten *distanzunabhängigen Zielgebietsverteilung* (Gleichverteilung¹⁵,

¹⁵Da die Gleichverteilung zu keiner lokalen Präferenz von Zielgebieten führt, wird sie im Folgenden den

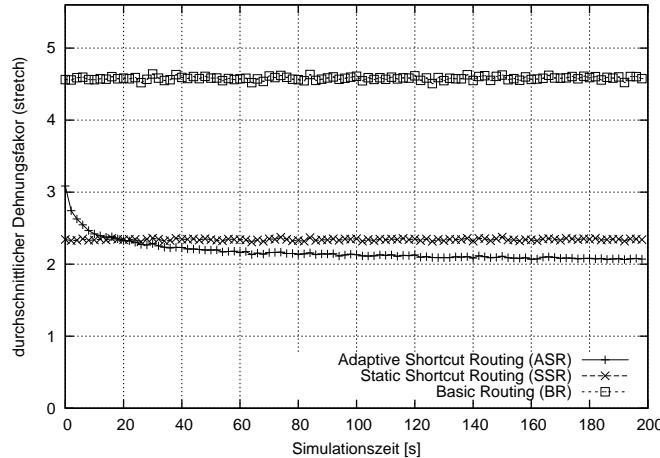


Abbildung 3.34: Dehnungsfaktoren von BR, SSR und ASR – Zielgebietsverteilung: Gleichverteilung.

Distanzunabhängig/Konzentriert-1, Distanzunabhängig/Konzentriert-2) aufgetragen über der Simulationszeit. Die Ergebnisse zeigen bei der Verwendung von SSR einen über die Zeit unveränderlichen Dehnungsfaktorverlauf, da die durch SSR verwendeten Direktverbindungsziellokationen durch die Auswahlheuristik fest vorgegeben und somit die Direktverbindungen in der Simulation unveränderlich sind. Für ASR nimmt der Dehnungsfaktor dagegen rasch im Laufe der Simulation durch Population des Direktverbindungsbuffers B_{hot} und Einrichtung der entsprechend selektierten Direktverbindungen ab. Für die distanzunabhängigen Zielgebietsverteilungen erreicht SSR jeweils einen Dehnungsfaktor von ca. 2,3. Da bei dieser Verteilung ein größerer Teil der Geocast-Nachrichten an vom Sender entfernte Zielgebiete gerichtet ist, kann SSR oft nur Direktverbindungen zu Routern an der Spitze der Hierarchie verwenden, beispielsweise zu Staaten-Routern. ASR passt dagegen die Direktverbindungen ständig an und erreicht dadurch geringere Dehnungsfaktoren, insbesondere für stark ausgeprägte Hotspots (vgl. Zielgebietsverteilung Konzentriert-2, Abbildung 3.36). Für die Gleichverteilung von Zielgebieten erzielt ASR Nachrichtenpfade, die im Durchschnitt ca. 10% kürzer sind als für SSR (vgl. Abbildung 3.34). Für stärker ausgeprägte Hotspots (Konzentriert-1 und Konzentriert-2) erreicht ASR deutlich geringere Dehnungsfaktoren mit Nachrichtenpfaden, die im Durchschnitt zwischen 30% und 50% kürzer als bei der Verwendung von SSR sind (vgl. Abbildungen 3.35, 3.36). Im Vergleich zur rein baumbasierten Vermittlung mittels BR sind die Pfade sowohl bei der Verwendung von SSR als auch bei ASR deutlich kürzer. ASR erreicht im Vergleich zu BR Nachrichtenpfade, die um 55% bis zu 75% kürzer sind.

Die Ergebnisse bei Verwendung *distanzabhängiger Zielgebietsverteilungen* sind in den Abbildungen 3.37 und 3.38 dargestellt. Hierbei ist zunächst anzumerken, dass es sich hierbei um die Szenarien handelt, für die SSR und zu einem gewissen Grad auch BR entworfen

distanzunabhängigen Verteilungen zugerechnet.

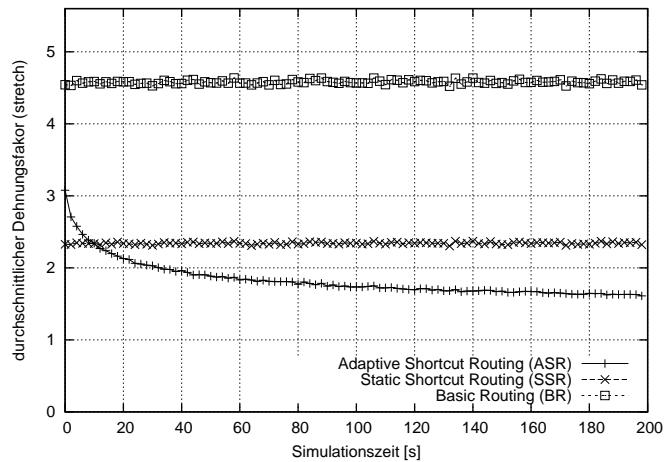


Abbildung 3.35: Dehnungsfaktoren von BR, SSR und ASR – Zielgebietsverteilung: Distanzunabhängig/Konzentriert-1.

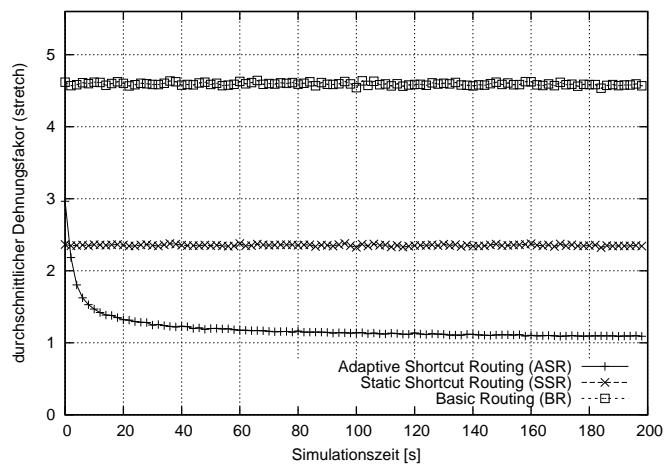


Abbildung 3.36: Dehnungsfaktoren von BR, SSR und ASR – Zielgebietsverteilung: Distanzunabhängig/Konzentriert-2.

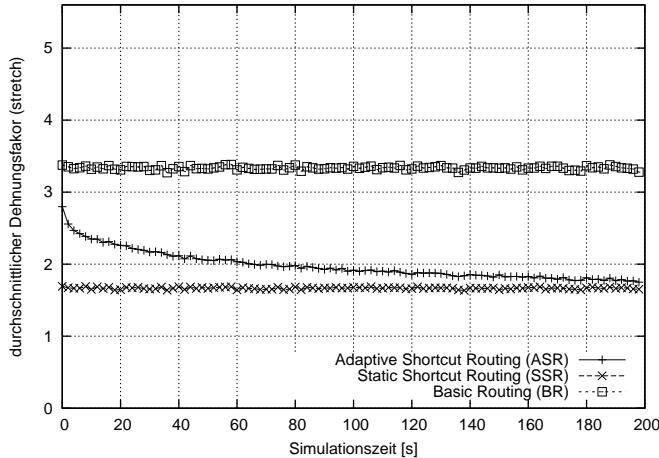


Abbildung 3.37: Dehnungsfaktoren von BR, SSR und ASR. Zielgebietsverteilung: Distanzabhängig/Konzentriert-1.

wurden, nämlich Szenarien, in denen die meisten Nachrichten an Gebiete nahe des Senders adressiert werden. Der bei den distanzunabhängigen Zielgebietsverteilungen relativ große Unterschied von ASR im Vergleich zu BR und SSR wird somit geringer, beziehungsweise SSR führt sogar zu kürzeren Pfaden als ASR. Bemerkenswerterweise erreicht ASR rasch die Pfadlänge von SSR durch Anpassung der Direktverbindungen an die adressierten Zielgebiete, obwohl ASR im Vergleich zu SSR nur relativ wenige Direktverbindungen einrichtet – 50 bei ASR im Vergleich zu über 500 bei SSR.

Distanzabhängige Kommunikationsmuster sind auch für BR von Vorteil, da der Router-Baum entsprechend der räumlichen Inklusionsbeziehung zwischen Dienstgebieten strukturiert ist und somit im Allgemeinen zwischen benachbarten Gebieten kürzere Pfade im Baum existieren als zu entfernten Gebieten, bei denen Nachrichten weit in der Hierarchie auf- und absteigen müssen. Trotzdem führt BR im Vergleich zu SSR und BR in diesem Fall noch zu doppelt so langen Nachrichtenpfaden.

Kommunikationsaufwand zur Einrichtung dynamischer Direktverbindungen

Im Gegensatz zu BR und SSR erfordert ASR einen zusätzlichen Kommunikationsaufwand, um Direktverbindungen dynamisch zu installieren. Einerseits verursacht die Verwendung dynamischer Direktverbindungen also einen zusätzlichen Kommunikationsaufwand. Andererseits wird durch diese Direktverbindungen die Netzlast durch optimierte Nachrichtenpfade mit kleinerem Dehnungsfaktor reduziert.

In diesem Abschnitt wird zunächst die durch TargetRouterSolicited-Nachrichten hervorgerufene zusätzliche Netzlast bei der Verwendung von ASR evaluiert. Im nächsten Abschnitt sollen dann sowohl die zusätzliche Netzlast zur Einrichtung von dynamischen Direktverbindungen als auch die reduzierte Netzlast durch optimierte Nachrichtenpfade betrachtet und die resultierende Gesamtlast von ASR mit denen von BR und SSR verglichen werden.

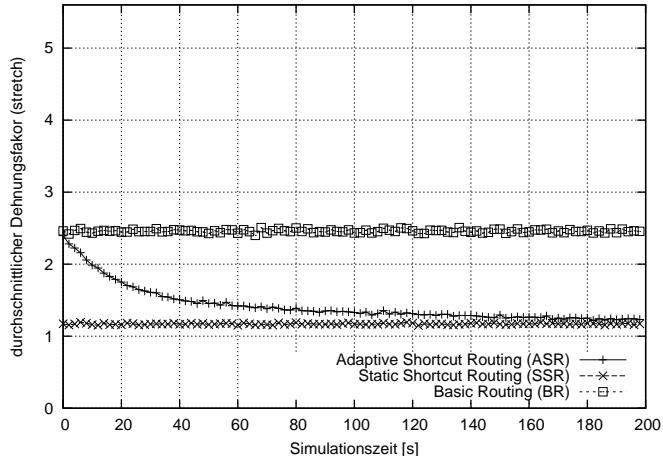


Abbildung 3.38: Dehnungsfaktoren von BR, SSR und ASR. Zielgebietsverteilung: Distanzabhängig/Konzentriert-2.

TargetRouterSolicited-Nachrichten werden gesendet, wenn eine Direktverbindung zum ersten Mal eingerichtet wird oder wenn eine Direktverbindung erneut eingerichtet wird, nachdem sie zuvor aus dem Direktverbindungsbuffer entfernt wurde (vgl. Abschnitt 3.6.2.2). Wie in Abschnitt 3.6.2.2 beschrieben, führen dabei vor allem so genannte flüchtige Direktverbindungen (engl. volatile shortcut), die aus dem Direktverbindungsbuffer entfernt werden, *bevor* sie tatsächlich genutzt werden konnten, zu einem unnötigen zusätzlichen Kommunikationsaufwand. Mit dem in Abschnitt 3.6.2.2 eingeführten Stabilitätstest soll dieser Aufwand durch das Vermeiden von flüchtigen Direktverbindungen minimiert werden. An dieser Stelle soll auch die Effektivität dieses Stabilitätstests untersucht werden.

Die folgenden Simulationen wurden hierzu mit und ohne Stabilitätstest ausgeführt. B_{hot} hat dabei eine Größe von 50 Einträgen; B_{warm} hat eine Größe von 1000 Einträgen. Es wurde ein Lambda-Wert von 0,05 und die Zielgebietsverteilung Distanzunabhängig/Konzentriert-1 verwendet.

Abbildung 3.39 zeigt die Gesamtrate von TargetRouterSolicited-Nachrichten aufgetragen über der Simulationszeit. Für $\text{minref} = 1$ wird dabei kein Stabilitätstest durchgeführt, das heißt, ein Zielgebiet kann sofort zu einem heißen Zielgebiet mit eingerichteter Direktverbindung werden, sobald es die Bedingung für heiße Zielgebiete erfüllt (vgl. Abschnitt 3.6.2.2). Für $\text{minref} > 1$ wird ein Stabilitätstest durchgeführt, wobei dieser Test für größere Werte strikter ist und somit die Stabilität der Auswahl von Direktverbindungen steigt, das heißt, es werden weniger flüchtige Direktverbindungen installiert. Hierbei ist zu beachten, dass nur die Antworten auf diese Anfragen tatsächlich einen zusätzlichen Kommunikationsaufwand bedeuten. Die Anfrage selbst wird auf weitergeleitete Geocast-Nachrichten aufgesattelt.

Zunächst ist zu erkennen, dass die Nachrichtenrate ohne Stabilitätstest ($\text{minref} = 1$) deutlich größer ist als mit Test ($\text{minref} > 1$). Bereits bei einem Stabilitätstest, bei dem nur zwei aufeinanderfolgende Zugriffe notwendig sind, um die Stabilitätsbedingung zu erfüllen,

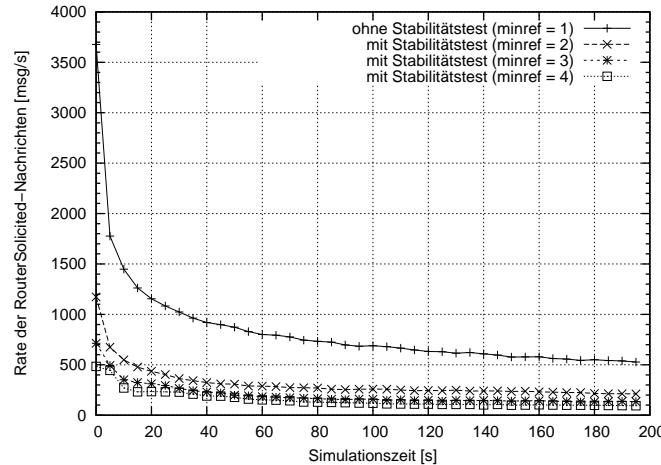


Abbildung 3.39: Durchschnittliche Nachrichtenrate von TargetRouterSolicited-Nachrichten zur Einrichtung dynamischer Direktverbindungen.

len ($minref = 2$), beträgt das Nachrichtenaufkommen nur 30% im Vergleich zur Simulation ohne Stabilitätstest. Hierbei ist zu beachten, dass der relativ große Puffer für warme Ziele das Problem der flüchtigen Direktverbindungen abmildert. Direktverbindungen, die zuvor heiß waren, dann aber durch andere Ziele vom heißen in den warmen Pufferbereich verdrängt wurden, bleiben gültig, bis sie endgültig aus dem Puffer entfernt werden. Wenn eine solche warme Direktverbindung allerdings vor der endgültigen Verdrängung aus dem Puffer wieder heiß wird, so ist der Ziel-Router der Verbindung noch immer gültig, und es muss kein neues Ziel durch eine erneute TargetRouterSolicited-Nachricht ermittelt werden. Ein kleinere warmer Pufferbereich, wie er zur Reduktion des lokalen Speicheraufwands wünschenswert sein kann, würde den Nutzen durch den eingeführten Stabilitätstest noch weiter erhöhen.

Ferner kann in Abbildung 3.39 beobachtet werden, dass größere Werte von $minref > 2$ das Nachrichtenaufkommen im Vergleich zu einem Stabilitätstest mit $minref = 2$ nur noch marginal verringern. Da der Test nicht nur die Stabilität von Direktverbindungen erhöht, sondern auch die Reaktivität auf mögliche Änderungen der Popularität von Zielen verringert, ist es wünschenswert, einen möglichst kleinen Wert für $minref$ zu wählen, der einen akzeptablen Kompromiss zwischen Nachrichtenreduktion und Reaktivität darstellt. Im simulierten Szenario wäre ein solcher Kompromiss bereits für einen Wert von $minref = 2$ gegeben.

Das Nachrichtenaufkommen erreicht rasch einen stabilen Wert von ca. 225 Nachrichten pro Sekunde für $minref = 2$. Zu diesem Zeitpunkt ändert sich der Großteil der aufgrund ihrer Popularität erkannten Direktverbindungsziele nicht mehr, und es werden somit nur noch wenige Router als Ziel-Router für neue Direktverbindungen mittels TargetRouterSolicited-Nachrichten angefordert. Die TargetRouterSolicited-Nachrichtenrate beträgt in diesem Zustand ca. 15% des Gesamtnachrichtenaufkommens bestehend aus Geocast-Nachrichten und TargetRouterSolicited-Nachrichten. Dieser Aufwand wird durch den Gewinn durch kürzere Nachrichtenpfade und somit weniger Pa-

keten im unterlagerten Netz bei weitem kompensiert, wie die Evaluation im folgenden Abschnitt zeigt.

Gesamtnetzlast

Einerseits reduzieren ASR durch dynamische Direktverbindungen die Netzlast durch kürzere Nachrichtenpfade. Andererseits führt ASR zur Installation von dynamischen Direktverbindungen einen gewissen zusätzlichen Kommunikationsaufwand durch TargetRouterSolicited-Nachrichten ein, wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde. Es stellt sich somit die Frage, ob Direktverbindungen – insbesondere dynamische Direktverbindungen wie sie ASR einsetzt – die *Gesamtkommunikationslast* im Netz verringert. Diese Frage wird im Folgenden durch Vergleiche der Gesamtnetzlast bei Verwendung von ASR, SSR und BR beantwortet.

Als Leistungsmetrik wird die *relative Netzlast*, bezeichnet durch RNL , betrachtet, die wie folgt definiert ist. Es seien n_{ASR} , n_{SSR} und n_{BR} die jeweilige Gesamtanzahl der UDP-Pakete die durch ASR, SSR beziehungsweise BR gesendet werden. n_{ASR} enthält dabei die aus normalen Geocast-Nachrichten resultierenden Pakete *und* die zusätzlich durch TargetRouterSolicited-Nachrichten eingeführten Pakete. Die relativen Netzlasten RNL_{ASR} und RNL_{SSR} der Vermittlungsverfahren ASR und SSR relativ zu BR sind dann wie folgt definiert:

$$RNL_{ASR} = \frac{n_{ASR}}{n_{BR}} \quad (3.20)$$

$$RNL_{SSR} = \frac{n_{SSR}}{n_{BR}} \quad (3.21)$$

Für einen Wert kleiner 1.0 werden somit im Vergleich zur rein baumbasierten Vermittlung ohne Direktverbindungen (BR) insgesamt weniger Pakete erzeugt. Für einen Wert größer 1.0 ist der durch die Verwaltung von Direktverbindungen eingeführte zusätzliche Kommunikationsaufwand größer als deren Nutzen. Ziel von ASR und SSR ist somit eine möglichst kleine relative Netzlast, die den Nutzen maximiert und den Aufwand minimiert.

Die Abbildungen 3.40–3.44 zeigen die relative Netzlast über der Simulationszeit für die *distanzunabhängigen Zielgebietsverteilungen* (Gleichverteilt, Distanzunabhängig/Konzentriert-1 und Distanzunabhängig/Konzentriert-2). ASR startet dabei wieder zu Beginn der Simulation ohne Direktverbindungen, die dann im Laufe der Simulation aufgrund der beobachteten Zielgebietspopularitäten eingerichtet werden; bei Verwendung von SSR sind alle statischen Direktverbindungen wiederum von Anfang an eingerichtet.

Zu Beginn ist die relative Netzlast von ASR im Vergleich zu BR und SSR vergleichsweise hoch, da hier viele TargetRouterSolicited verschickt werden (vgl. Evaluierung der zusätzlichen Netzlast zur Einrichtung dynamischer Direktverbindungen im vorigen Abschnitt). Sobald eine stabile Menge von Direktverbindungen gefunden wurde, bleibt die relative Last von ASR praktisch konstant.

Die Ergebnisse im stabilen Zustand zeigen einen ähnlichen Trend, wie er bereits bei der Evaluierung der entsprechenden Pfadlängen beobachtet werden konnte. Bei einer

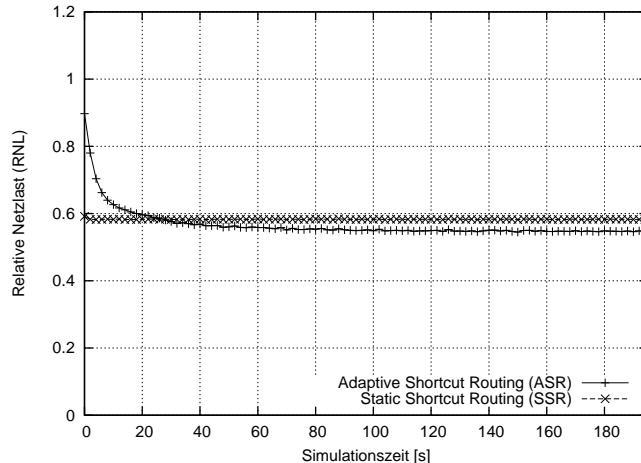


Abbildung 3.40: Relative Netzlast von ASR und SSR relativ zu BR (RNL_{ASR} , RNL_{SSR}) – ZielgebieteVerteilung: Gleichverteilt.

Gleichverteilung der Zielgebiete (Abbildung 3.40) führt ASR zu einer ungefähr gleichen Netzlast wie SSR, da aufgrund der gleichverteilten ZielgebietssPopularitäten keine ausgezeichneten Hotspots durch ASR identifiziert werden können. Stattdessen werden Direktverbindungen zu Lokationen an der Spitze der Hierarchie (Staaten) eingerichtet, die ebenso auch bei SSR vorhanden sind. Für ausgeprägte Hotspots (ZielgebieteVerteilungen Konzentriert-1 und Konzentriert-2, Abbildungen 3.41 und 3.42) kann ASR dagegen die Gesamtnetzlast im Vergleich zu SSR deutlich durch die Einrichtung von Direktverbindungen zu entfernten Lokationen senken. Aufgrund der lokalen Präferenz der Direktverbindungsauswahlstrategie von SSR kann SSR für Nachrichten an entfernte Ziele dagegen nur Direktverbindungen zu übergeordneten Zielen an der Spitze der Hierarchie verwenden. ASR führt so bei den ZielgebieteVerteilungen Konzentriert-1 und Konzentriert-2 zu ca. 21% beziehungsweise 40% weniger Netzlast als SSR. Sowohl SSR als auch ASR können die Netzlast im Vergleich zu BR signifikant senken: SSR im Durchschnitt um ca. 42%, ASR um 42% bis zu 65%.

Auch für *distanzabhängige ZielgebieteVerteilungen* ergibt sich ein ähnlicher Verlauf (Abbildungen 3.43, 3.44), wie er bereits bei der Bewertung der Pfadlängen deutlich wurde. SSR erzielt aufgrund des lokalen Charakters des Geocast-Verkehrs etwas bessere Ergebnisse als ASR, das durch Adaption der gewählten Direktverbindungen allerdings dem Ergebnis von SSR sehr nahe kommt. Sowohl SSR als auch ASR verringern die relative Netzlast im Vergleich zu BR deutlich um 37% und 24% für die Verteilungen Konzentriert-1 beziehungsweise Konzentriert-2. Bemerkenswerterweise ist der durch ASR und SSR erzielte Gewinn in diesem Fall für ausgeprägte Hotspots (ZielgebieteVerteilung Konzentriert-2) geringer, als für weniger ausgeprägte Hotspots (ZielgebieteVerteilung Konzentriert-1). Bei sehr ausgeprägten *lokalen* Hotspots sind die durch einen einfachen Baum (BR) gewählten Nachrichtenpfade bereits sehr kurz, da die Nachricht meist nur eine Ebene im Baum aufsteigen muss oder Nachrichten direkt vom lokalen Router des Senders vermittelt werden können. Entsprechend wenige Vermittlungsschritte können daher eingespart werden.

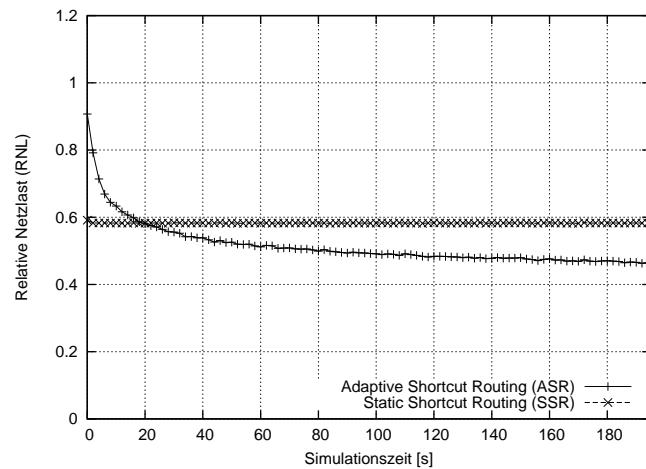


Abbildung 3.41: Relative Netzlast von ASR und SSR relativ zu BR (RNL_{ASR} , RNL_{SSR}) – Zielgebietsverteilung: Distanzunabhängig/Konzentriert-1.

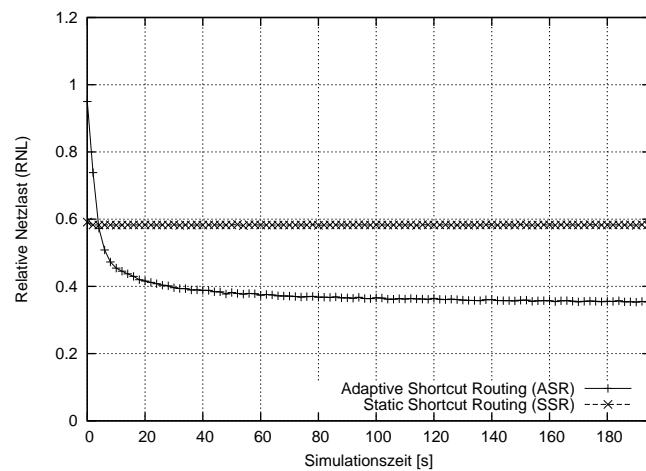


Abbildung 3.42: Relative Netzlast von ASR und SSR relativ zu BR (RNL_{ASR} , RNL_{SSR}) – Zielgebietsverteilung: Distanzunabhängig/Konzentriert-2.

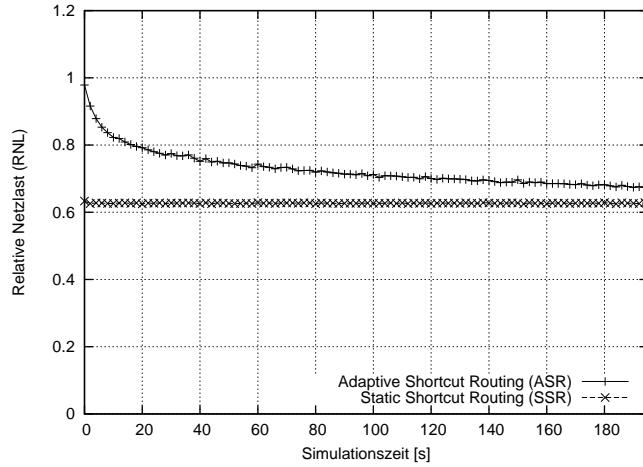


Abbildung 3.43: Relative Netzlast von ASR und SSR relativ zu BR (RNL_{ASR} , RNL_{SSR}) – Zielgebietsverteilung: Distanzabhängig/Konzentriert-1.

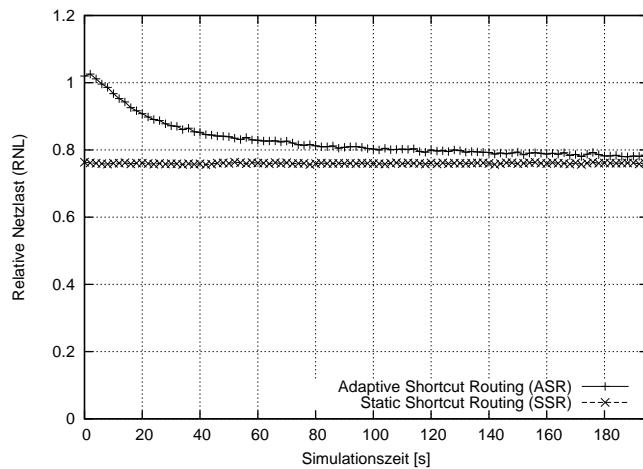


Abbildung 3.44: Relative Netzlast von ASR und SSR relativ zu BR (RNL_{ASR} , RNL_{SSR}) – Zielgebietsverteilung: Distanzabhängig/Konzentriert-2.

Netzlast bei Router-Fehlern

Bisher wurden nur stabile Overlay-Netze ohne Router-Ausfälle betrachtet. Die in Abschnitt 3.6.2.2 vorgestellten Mechanismen zur Reaktion auf Router-Ausfälle führen beim Eintreten von Fehlern allerdings zu einem zusätzlichen Kommunikationsaufwand zur Validierung beziehungsweise Aktualisierung von Direktverbindungsziel-Routern. Dieser Kommunikationsaufwand soll im Folgenden analysiert werden.

Der Ausfall eines Routers führt durch zwei unterschiedliche Nachrichten zu zusätzlichem Kommunikationsaufwand. Zunächst wird eine `RouterFailed`-Nachricht durch Fluten im Overlay-Netz verteilt. Hieraus resultieren $n - 1$ Nachrichtenkopien, da die `RouterFailed`-Nachricht an jeden verfügbaren Overlay-Router entlang des Basis-Router-Baumes weitergeleitet wird.

Die `RouterFailed`-Nachricht invalidiert bestimmte Direktverbindungen, von denen die Korrektheit des Ziel-Router nicht mehr sichergestellt werden kann. Diese invalidierten Direktverbindungen führen später zu zusätzlichen `TargetRouterSolicited`-Nachrichten. Hierbei ist zu beachten, dass diese zusätzlichen `TargetRouterSolicited`-Nachrichten über einen längeren Zeitraum verteilt auftreten, da sie auf weitergeleitete Nachrichten aufgesattelt werden. So lange also eine invalidierte Direktverbindung nicht verwendet wird, wird sie auch nicht aktualisiert, um zu vermeiden, dass zwischenzeitlich abgekühlte Direktverbindungen aufwendig erneuert werden, obwohl sie nicht mehr als nützliche erachtet werden.

Um den zusätzlichen Kommunikationsaufwand zu bewerten, werden im Folgenden zwei Extreme betrachtet. Als erstes wird der Ausfall des Wurzel-Routers der Router-Hierarchie simuliert, das heißt, des USA-Landes-Routers im betrachteten Szenario.¹⁶ Hierbei wird eine distanzunabhängige Zielgebietsverteilung angenommen. Für diese Verteilung stellt der Ausfall des Wurzel-Routers den schlimmsten Fall in Bezug auf den resultierenden Aufwand dar. Der Fehler des Wurzel-Routers partitioniert den Router-Baum in zwei große Teile. Somit muss jede Direktverbindung von einem Teil der Partition in den anderen invalidiert werden. Das heißt, ca. 50% aller Direktverbindungen müssen erneuert werden.

Das zweite Extrem ist der Ausfall eines Blatt-Routers der Hierarchie, das heißt, eines Stadtteil-Routers im betrachteten Szenario. In diesem Fall müssen nur die (wenigen) Direktverbindungen aktualisiert werden, die einen Quell-Router mit den ausgefallenen Ziel-Router direkt verbinden.

Abbildung 3.45 zeigt den Verlauf der relativen Netzlast über der Simulationszeit bei Verwendung von ASR, wobei sowohl Geocast-Nachrichten als auch `TargetRouterSolicited`- und `RouterFailed`-Nachrichten betrachtet werden. Zum Zeitpunkt $t = 100$ s fällt dabei der USA-Landes-Router beziehungsweise ein zufällig¹⁷ ausgewählter Stadtteil-Router aus.

Wie erwartet steigt die Netzlast zum Zeitpunkt des Ausfalls ($t = 100$ s) zunächst aufgrund der `RouterFailed`-Nachrichten an und bleibt vor allem aufgrund der zeitlich ver-

¹⁶Da die Simulation nur Router in den USA betrachtet, hat ein Ausfall des USA-Landes-Routers den gleichen Effekt wie ein Ausfall des globalen Routers.

¹⁷Da alle Stadtteile bei der distanzunabhängigen Zielgebietsverteilung gleich populär sind, kann ohne Beschränkung der Allgemeinheit ein beliebiger Stadtteil-Router ausgewählt werden.

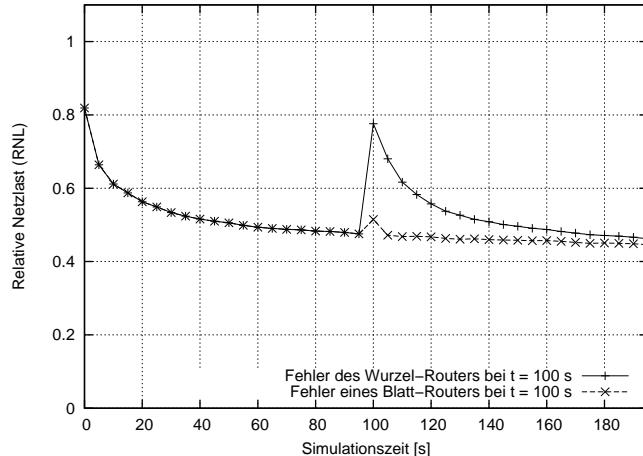


Abbildung 3.45: Netzlast von ASR relativ zu BR (RNL_{ASR}) bei einem Routerausfall zum Zeitpunkt $t = 100$ s.

teilten TargetRouterSolicited-Nachrichten noch eine Zeit lang erhöht, bis sie wieder den normalen Verlauf erreicht. Hierbei erhöht der Ausfall des Wurzel-Routers die Last deutlich stärker als der Ausfall eines Stadtteil-Routers, dessen Ausfall nur sehr geringen Einfluss auf die Netzlast hat. Bemerkenswerterweise überschreitet auch beim Ausfall des Wurzel-Routers die Lastspitze nicht den Wert von BR ($RNL = 1,0$). Vor allem die zeitliche Verteilung der TargetRouterSolicited-Nachrichten aufgrund der verzögerten (engl. lazy) Reaktion der Router verhindert einen größeren Anstieg der Lastspitze. Des Weiteren fällt die Last nach der Lastspitze wieder rasch ab, nachdem die betroffenen Direktverbindungen aktualisiert wurden.

Insgesamt kann ASR somit auch Router-Ausfällen ohne gravierende Leistungseinbußen widerstehen.

Router-Last

Die Skalierbarkeit der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Vermittlungsalgorithmen ist neben der oben evaluierten resultierenden Last im unterlagerten Kommunikationsnetz auch von der Last der einzelnen Geocast-Router des Overlay-Netzes abhängig. Ein Geocast-Router beziehungsweise seine direkte Netzanbindung kann durch ein zu hohes Aufkommen an weiterzuleitenden Nachrichten zum Flaschenhals im System werden.

Zum einen kann dabei die Rechenleistung des Routers zum Engpass werden. In diesem Fall ist der Geocast-Router nicht mehr in der Lage, Weiterleitungsentscheidungen (engl. forwarding decision) schnell genug zu treffen, wenn die Nachrichtenrate einen bestimmten Wert überschreitet. Als Resultat laufen Nachrichtenpuffer voll und Nachrichten müssen schließlich verworfen werden. Hierbei spielt auch die Komplexität des Vermittlungsalgoritmus eine wesentliche Rolle, die im Detail Gegenstand des Abschnitts 3.10.2 ist.

Zum anderen kann die Netzanbindung des Geocast-Routers überlastet werden. Hier-

bei ist zu beachten, dass in einem Overlay-Netz-basierten Ansatz verschiedene logische Verbindungen zu anderen Geocast-Routern im Overlay-Netz durch eine oder wenige physische Netzanbindungen realisiert werden. Das heißt, relevant für die physische Netzanbindung ist die Nachrichtenrate aller Geocast-Nachrichten eines Geocast-Routers, unabhängig vom Empfänger (Zielgebiet) der Nachricht.

Sowohl die notwendige Rechenleistung als auch die Last der physischen Netzanbindung hängen somit von einem wichtigen Faktor ab, nämlich der Nachrichtenrate eines Geocast-Routers. Deshalb wird im Folgenden die *Nachrichtenrate* eines Geocast-Routers, das heißt, die Anzahl an weiterzuleitenden Geocast-Nachrichten pro Sekunde, als Leistungsmetrik evaluiert.

Hierarchische Vermittlungsverfahren bergen typischerweise die Gefahr der Überlastung der Router an der Spitze der Hierarchie. Im Allgemeinen existieren an der Spitze der Hierarchie deutlich weniger Geocast-Router als auf den tieferen Ebenen der Hierarchie. Zum Beispiel gibt es in den vorgeschlagenen Ansätzen nur vergleichsweise wenige Länder- oder Staaten-Router, während eine Vielzahl von Stadt- oder Stadtteil-Routern existieren. Daher konzentriert sich die folgende Evaluierung auf die Router an der Spitze der Hierarchie, im konkreten Szenario also den Landes-Router (USA-Router) und die Staaten-Router innerhalb der USA.¹⁸

Neben der Pfadverkürzung ist die Entlastung der Router des Basis-Router-Baumes ein wesentliches Ziel der Einführung von Direktverbindungen. Durch sie werden vor allem die (wenigen) Router an der Spitze der Hierarchie durch Direktverbindungen zwischen (den vielen) Routern auf den tieferen Ebenen entlastet. Ziel der folgenden Evaluierung ist daher auch die Effektivität der durch Direktverbindungen erzielten Entlastung der Router auf den oberen Ebenen der Hierarchie (Landes- und Staaten-Router) nachzuweisen. Hierfür werden wiederum die oben eingeführten Szenarien mit den verschiedenen Zielgebetsverteilungen evaluiert. Verglichen werden wiederum die Geocast-Vermittlungsverfahren ASR, SSR und BR, wobei letzteres wieder als Referenz eines rein hierarchischen Verfahrens ohne optimierende Direktverbindungen dient.

Zunächst werden *distanzunabhängige Zielgebetsverteilungen* betrachtet. Abbildung 3.46 zeigt den zeitlichen Verlauf der Router-Last des Landes-Router (USA-Router) für die verschiedenen Routing-Algorithmen und eine Gleichverteilung der Zielgebiete. Es ist deutlich zu sehen, dass dieser einzelne Router bei der Verwendung eines rein hierarchischen Verfahrens eine sehr hohe Last aufweist (ca. 900 Nachrichten/s bei einer Gesamt-nachrichtenraten von 1271 Nachrichten/s). Bei Verwendung von ASR ist die Nachrichtenlast zunächst auch relativ hoch, fällt dann aber schnell auf einen geringen Wert von ca. 15 Nachrichten/s ab. Im eingeschwungenen Zustand traversieren also ca. 1% der Nachrichten noch den Landes-Router. Dieser Verlauf kann wiederum dadurch erklärt werden, dass ASR zu Beginn wieder ohne Direktverbindungen startet, die dann im Verlauf der Simulation aufgrund der Popularität von Zielgebieten erstellt werden. Obwohl durch die gleichverteilte Popularität keine ausgezeichneten Ziele (Hotspots) auf tieferen Ebene der Lokationshierarchie ermittelt werden können, so werden trotzdem Direktverbin-

¹⁸Da im betrachteten Szenario nur Nachrichten innerhalb der USA verschickt werden, wird der globale Wurzel-Router auf oberster Ebene nie traversiert und seine Last ist immer null. Im Szenario nimmt daher der Landes-Router der USA die Rolle des Wurzel-Routers ein.

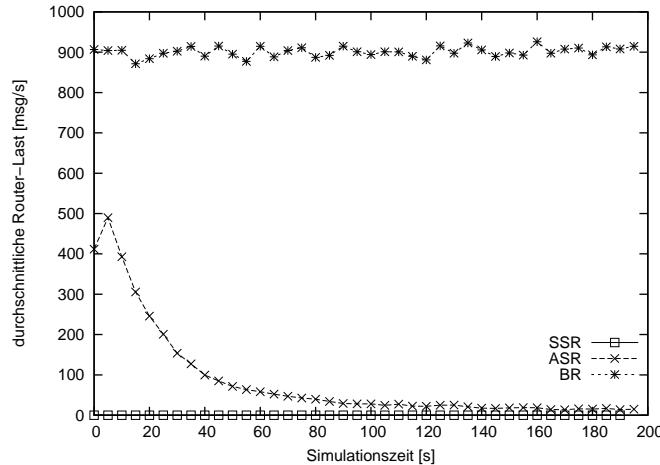


Abbildung 3.46: Router-Last des Landes-Router (Country Router USA) – ZielgebieteVerteilung: Gleichverteilt.

dungen zu den übergeordneten Zielen (im Szenario Staaten) eingerichtet, die zumindest den Landes-Router umgehen. SSR richtet entsprechend der statischen Auswahlheuristik für Direktverbindungsziele Direktverbindungen zu allen Staaten-Routern ein (Kinder des Vorfahren „USA“). Somit wird der Landes-Router für Nachrichten innerhalb der USA immer umgangen und seine Last ist somit gleich null.

Betrachtet man dasselbe Szenario mit gleichverteilten Zielgebieten für die Staaten-Router (Abbildung 3.47), so erkennt man zunächst, dass im Allgemeinen hier die absolute Last der Staaten-Router im Vergleich zum Landes-Router deutliche geringer ist, da sich die Gesamtlast auf mehrere Staaten-Router verteilt. Dieser Effekt ist auch bei BR vorhanden, bei dem ein einzelner Staaten-Router im Durchschnitt nur 180 Nachrichten/s weiterzuleiten hat anstatt ca. 900 Nachrichten/s, wie es für den Landes-Router der Fall war. Trotzdem können die Verfahren mit zusätzlichen Direktverbindungen (ASR und SSR) auch hier eine deutliche Reduktion der Last der Staaten-Router im Vergleich zu BR erzielen. Für SSR ist dieser Effekt dadurch zu erklären, dass Nachrichten innerhalb eines Staates von zusätzlichen Direktverbindungen profitieren, die durch die statische Heuristik erzeugt werden – mit SSR richtet z.B. jeder Stadt-Router eine Direktverbindung zu allen anderen Städten innerhalb seines Staates ein, so dass Nachrichten an Ziele im gleichen Staat nie den Staaten-Router traversieren müssen. ASR kann in diesem Fall von einem vergleichsweise kleinen Szenario profitieren, das nur wenige Staaten enthält. Somit können auch zusätzliche Direktverbindungen zu Städten installiert werden. In einem größeren Szenario mit mehr Staaten würde für ASR die Last der Staaten-Router ansteigen, während sie für SSR gleich bliebe.

Betrachtet man ein Szenario mit ausgeprägten Hotspots wie es für die ZielgebieteVerteilung Distanzunabhängig/Konzentriert-2¹⁹ gegeben ist, so ergibt sich für den Landes-

¹⁹Die Verteilung Distanzunabhängig/Konzentriert-1 führt zu ähnlichen Ergebnissen mit weniger ausgeprägten Effekten für ASR.

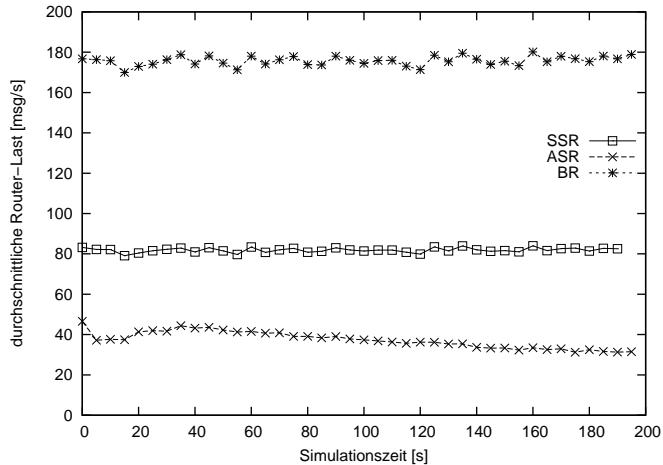


Abbildung 3.47: Router-Last der Staaten-Router – Zielgebietsverteilung: Gleichverteilt.

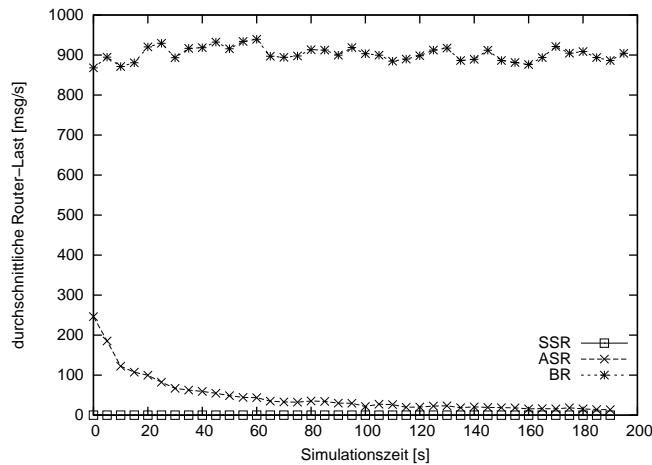


Abbildung 3.48: Router-Last der Landes-Router (Country Router USA) – Zielgebietsverteilung: Distanzunabhängig/Konzentriert-2.

Router ein ähnliches Bild (Abbildung 3.48) wie im oben beschriebenen Falle ohne Hotspots. Da der Landes-Router bereits ohne ausgeprägte Hotspots von den Direktverbindungen von ASR und SSR umgangen wurde, ist kein zusätzlicher Effekt in Form einer zusätzlichen Last-Reduktion zu erkennen.

Betrachtet man dagegen dasselbe Szenario mit ausgeprägten Hotspots auf der Ebene der Staaten-Router (Abbildung 3.49), so erkennt man im Falle von ASR eine deutliche Lastreduktion. ASR ist nun in der Lage, Direktverbindungen zwischen entfernten Routern auf unterster Ebene (im Szenario der Stadtteilebene) einzurichten. Diese Direktverbindungen umgehen die Staaten-Router vollständig und entlasten sie somit stark. SSR kann dagegen von solch ausgeprägten Hotspots im Falle einer distanzunabhängigen Zielgebietsverteilung nicht profitieren und erzielt somit dieselbe Router-Last wie ohne Hots-

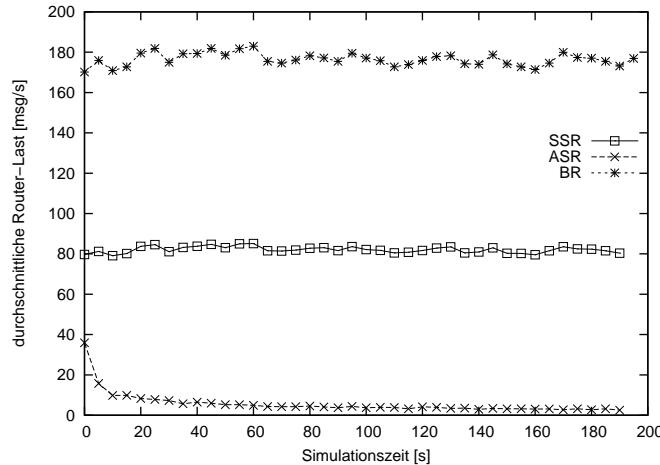


Abbildung 3.49: Router-Last der Staaten-Router – Zielgebietsverteilung: Distanzunabhängig/Konzentriert-2.

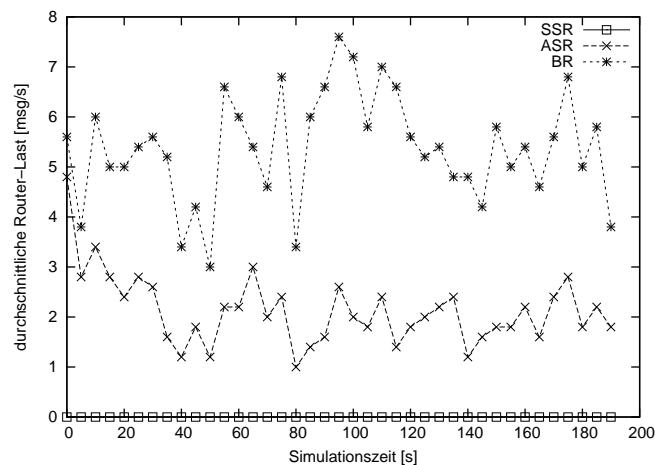


Abbildung 3.50: Router-Last der Landes-Router (Country Router USA) – Zielgebietsverteilung: Distanzabhängig/Konzentriert-2.

pots.

Schließlich werden im Folgenden Szenarien mit *distanzabhängigen Zielgebietsverteilungen* betrachtet. Abbildung 3.50 zeigt die Last des Landes-Routers für stark ausgeprägte lokale Hotspots (Zielgebietsverteilung Distanzabhängig/Konzentriert-2). Deutlich ist zu erkennen, dass nun bereits für BR ohne Direktverbindungen eine sehr geringe Last des Landes-Routers (ca. 5 Nachrichten/s) im Vergleich zu der entsprechenden distanzunabhängigen Zielgebietsverteilung (ca. 900 Nachrichten/s) vorliegt. Offensichtlich kann nun die Mehrzahl der Nachrichten über tiefere Ebenen im Router-Baum vermittelt werden, ohne den Landes-Router zu traversieren.

Für Staaten-Router ergibt sich eine ähnlich starke Reduktion der Last im Falle von

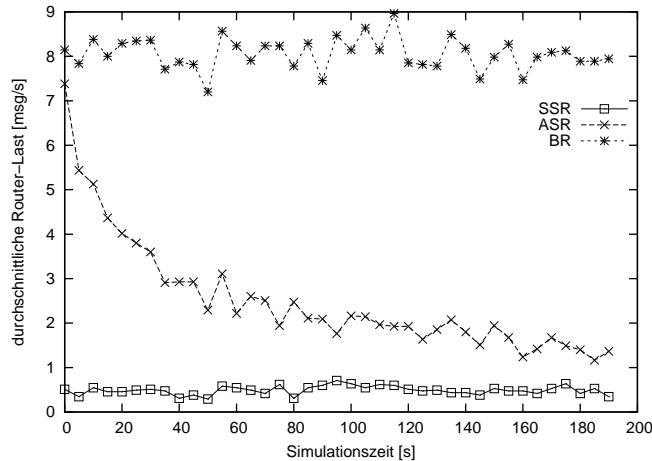


Abbildung 3.51: Router-Last der Staaten-Router – Zielgebietsverteilung: Distanzabhängig/Konzentriert-2.

BR (vgl. Abbildung 3.51). In diesem Fall profitiert auch SSR von der distanzabhängigen Hotspotverteilung und reduziert somit die Last der Staaten-Router im Vergleich zu BR nochmals signifikant. War es SSR für stark ausgeprägte aber distanzunabhängige Hotspots noch nicht möglich, die statischen Direktverbindungen zu nutzen – im Gegensatz zu ASR (siehe oben) –, so können Staaten-Router nun durch die SSR-Direktverbindungen zwischen Städten im gleichen Staat und Stadtteilen in der gleichen Stadt umgehen werden. ASR passt seine Direktverbindungen ebenfalls im Laufe der Simulation an diese distanzabhängige Zielgebietsverteilung und erzielt damit ähnliche Ergebnisse wie im distanzunabhängigen Fall. Hierdurch wird erneut die Fähigkeit von ASR gezeigt, sich an beliebige Hotspotverteilungen unabhängig von der geographischen Verteilung populärer Ziele anzupassen.

3.10.2 Verbandsbasierte Geocast-Overlay-Netze

In diesem Abschnitt wird abschließend der in Abschnitt 3.7 eingeführte verbandsbasierte Vermittlungsansatz evaluiert, der im Gegensatz zu den oben betrachteten rein baumförmigen Modellen auch Schnittlokationen im zugrunde liegenden Lokationsmodell und der entsprechenden Overlay-Netztopologie erlaubt. Hierbei steht vor allem die Bewertung der lokalen Implementierung des Vermittlungsalgorithmus hinsichtlich der Vermittlungsgeschwindigkeit und des Speicheraufwands für die Vermittlungstabelle im Vordergrund. Im Vergleich zur baumbasierten Vermittlung sind diese Faktoren bei der verbandsbasierten Vermittlung kritisch, da der Vermittlungsalgorithmus die im Vergleich zu baumförmigen Overlay-Netzen komplexere Struktur des Verbandes berücksichtigen muss und hierbei nicht auf vergleichsweise einfache Präfixvergleichsoperationen zurückgreifen kann, wie sie beim baumbasierten Ansatz verwendet werden. Vergleichbar sind dagegen die resultierenden Pfadlängen. Wie der baumbasierte Ansatz, so erlaubt auch der verbandsbasierte Ansatz die Optimierung der grundsätzlich hierarchischen Vermitt-

lung durch zusätzliche Direktverbindungen, wobei ebenfalls statische und dynamische Strategien zur Auswahl zusätzlicher Verbindungen eingesetzt werden können. Für eine Bewertung dieser Strategien und der resultierenden Pfadlänge wird daher auf die vorherigen Abschnitte verwiesen.

3.10.2.1 Vergleich der Implementierungen des Vermittlungsalgorithmus

Zunächst sollen an dieser Stelle die Leistungen verschiedener Implementierungen des verbandsbasierten Vermittlungsalgorithmus aus Abschnitt 3.7.0.6 miteinander verglichen werden. Als Leistungsmetrik wird die *Zeit für Weiterleitungsentscheidungen* (engl. *forwarding decision*) betrachtet, die ein weiterleitender Router benötigt, um den nächsten Router auf dem Pfad zum Ziel zu bestimmen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die weiterzuleitende Nachricht einschließlich Nachrichtenkopf und Zielgebietsadresse bereits empfangen und die Zielgebietsadresse dekodiert wurde. Die Zeit für Weiterleitungsentscheidungen misst die sich anschließende Zeitspanne, die vergeht, bis der weiterleitende Router auf Grundlage seiner lokalen Sicht auf den Router-Verband den nächsten Router ermittelt hat. Diese Zeit wird wesentlich durch die Struktur des Verbandes und die für das Auffinden notwendigen Operationen bestimmt.

Um rasche Weiterleitungsentscheidungen zu treffen, ist insbesondere die effiziente Implementierung zweier Operationen in Phase 1 der Vermittlung – der Vermittlung zum designierten Router r_τ des Zielgebiets τ – notwendig. Zum einen muss jeder weiterleitende Router r das Supremum $\sup_{r, r_\tau} = \hat{r}_\check{p}$ berechnen, um den Scheitelpunkt $\hat{r}_\check{p}$ des Pfads \check{p} mit dem geringsten Anstieg zu ermitteln, der r mit r_τ im Router-Verband verbindet. Zum anderen muss jeder weiterleitende Router bei der Suche nach dem Router, der r_τ auf diesem Pfad am nächsten liegt, im Allgemeinen mehrere Lokationen aufgrund der Relation $<$ miteinander vergleichen. Phase 2, in der die Nachricht im Zielgebiet verteilt wird, ist dagegen vergleichsweise einfach, da jeder Router die Nachricht nur an seine Kinder im Verband weiterleiten muss. Der Fokus der Evaluierung liegt daher im Folgenden auf Phase 1 und den Operationen \sup und $<$.

Um diese Operationen umzusetzen, kommen die bereits in Abschnitt 3.7.0.6 eingeführten zwei Verfahren zum Einsatz, die an dieser Stelle nun im Detail evaluiert werden. *Implementierung 1 (IMP1)* arbeitet auf einer Graphrepräsentation der Verbandsstruktur. \sup_{r, r_τ} wird durch das Aufzählen der gemeinsamen Vorfahren $\text{ancestors}(s(r)) \cap \text{ancestors}(\tau)$ durch Traversieren des Graphen und der anschließenden Selektion des kleinsten Elements dieser Menge bezüglich der Verbandsstruktur berechnet. Zum Vergleich $l_1 < l_2$ zweier Lokationen l_1 und l_2 des Verbandes werden die jeweiligen Mengen der Vorfahren $\text{ancestors}(l_1)$ beziehungsweise $\text{ancestors}(l_2)$ bestimmt und anschließend überprüft, ob $l_1 \in \text{ancestors}(l_2)$ oder $l_2 \in \text{ancestors}(l_1)$ gilt. Offensichtlich wird die Leistung von IMP1 wesentlich durch die Anzahl der Vorfahren beeinflusst. In einem Verband können dabei mehrere Pfade von der Spitze (Top-Element) des Verbandes zu einer Lokation führen, wobei Schnittlokationen mehr als eine Vaterlokation aufweisen. Um den Einfluss der Verbandsstruktur zu evaluieren und insbesondere die Anzahl an Vorgängern zu variieren, wurde in den Messungen das Verhältnis von Lokationen mit nur einer Vaterlokation zu (Schnitt-)Lokationen mit mehr als einer Vaterlokation (Multi-Vater-

Lokationen) variiert. Hierbei wurde mit einer reinen Baumstruktur begonnen (0% Multi-Vater-Lokationen) und schrittweise zusätzlich Verbindungen zufällig zum Verband hinzugefügt mit der Randbedingung, eine korrekte Verbandsstruktur zu erhalten.

Implementierung 2 (IMP2) nutzt das Verfahren von Ganguly et al. [GMR94] zur Kodierung der Verbandsstruktur in Bit-Folgen in einem der Vermittlung vorangehenden Verarbeitungsschritt, der nicht Teil der Vermittlung selbst ist und somit nicht in die Bestimmung der Zeit für Weiterleitungsentscheidungen einfließt. Auf Grundlage des kodierten Verbandes können die Operationen während der Vermittlung durch effiziente Kodewortvergleiche implementiert werden. Die Anzahl der Schnittlokationen beeinflusst auch diesen Ansatz, da für einen Verband mit vielen Schnittlokationen im Allgemeinen längere Kodeworte erzeugt werden. An dieser Stelle sei nochmals angemerkt, dass die der Vermittlung vorausgehende Kodierung der Verbandsstruktur, obwohl hier nicht näher betrachtet, ein vergleichsweise aufwändiger Prozess ist, der vor allem bei dynamischen Verbandsstrukturen zeitlich kritisch ist. Im Folgenden wird daher davon ausgegangen, dass die Verbandsstruktur stabil ist und diese bereits ausschnittsweise entsprechend des topologischen Wissens eines Routers in kodierter Form beim jeweils weiterleitenden Router vorliegt.

Neben dem generellen Aufbau der Verbandsstruktur, der vor allem durch die Anzahl an Multi-Vaterlokationen bestimmt wird, spielt die Größe des Ausschnitts der globalen Router-Topologie, der dem weiterleitenden Router vorliegt, eine wesentliche Rolle in Bezug auf die Geschwindigkeit des Weiterleitungsvorgangs. Um die Größe dieses Ausschnitts zu variieren, wurden zwei Extreme betrachtet: Die Weiterleitung auf Basis des minimalen topologischen Wissens und auf Basis des vollständigen topologischen Wissens. Das *minimale topologische Wissen* ist entsprechend Abschnitt 3.7.0.6 definiert und beschreibt den minimalen Ausschnitt der Topologie, der für einen korrekten Vermittlungsprozess notwendig ist. Hierbei kennt der weiterleitende Router im Wesentlichen seine physischen Vater- und Kind-Router im Verband sowie die seinem Dienstgebiet übergeordnete virtuelle Router-Topologie. Das *vollständige Wissen* ist ein Sonderfall des in Abschnitt 3.7.0.6 definierten erweiterten topologischen Wissens, bei dem ein Router neben dem minimalen Wissen zusätzliche Ausschnitte des Router-Verbandes kennt. Beim vollständigen Wissen kennt jeder Router die vollständige globale Router-Topologie, das heißt, er kann jeder Lokation direkt den designierten physischen Router zuordnen. Die Vermittlung in Phase 1 kann also in einem einzigen Schritt erfolgen, wobei an dieser Stelle nicht die resultierende Pfadlänge sondern der Einfluss des lokalen topologischen Wissens auf die notwendige Zeit für Weiterleitungsentscheidungen im Vordergrund steht.

Das der folgenden Evaluierung zugrunde gelegte Lokationsmodell besteht aus sieben Ebenen einschließlich der Top- und Bottom-Ebene. Jede Lokation (ausschließlich der Bottom-Lokation) hat dabei 16 Kind-Lokationen. Somit besteht das Lokationsmodell insgesamt aus 1.118.481 Lokationen. Ein Geocast-Router mit dem vollständigen topologischen Wissen kennt alle diese Lokationen und die zugeordneten physischen Router; ein Router mit minimalem topologischem Wissen kennt dagegen nur einen kleinen Ausschnitt der Router-Verbandes entsprechend der Definition in Abschnitt 3.7.0.6.

Die Zeit für Weiterleitungsentscheidungen wurden mit prototypischen Implementierungen von IMP1 und IMP2 gemessen. Die Messungen erfolgten auf Routern der Ebene 5

(Top: Ebene 0, Bottom: Ebene 6), das heißt, der untersten Ebene des Router-Verbandes. Router auf dieser Ebene haben typischerweise die meisten Vorgänger im Verband, und so mit ist auf dieser Ebene mit der längsten Zeit für das Treffen von Weiterleitungentscheidungen zu rechnen. Aus dem gleichen Grund wurde als Zielgebiet jeweils eine Lokation auf der untersten Ebene (Ebene 5) gewählt. Jeder Punkt der unten dargestellten Abbildung ist das Resultat von 100.000 Messungen. Für jede Messung wurde ein zufälliger Ebene-5-Router als weiterleitender Router und ein zufälliges Zielgebiet auf Ebene 5 ausgewählt und die Zeit zum Treffen der Weiterleitungentscheidung gemessen und schließlich gemittelt. Alle Messungen wurden auf einer Workstation mit einem 1,2 GHz Sun UltraSPARC III Prozessor durchgeführt.

Abbildung 3.52 zeigt die Zeiten für Weiterleitungentscheidungen der verschiedenen Implementierungen und lokale Ausschnitte des Router-Verbandes mit einer variierenden Anzahl an Schnittlokalen. Wie erwartet wächst die von IMP1 benötigte Zeit mit der Anzahl der Schnittlokalen, insbesondere für Router mit minimalem topologischem Wissen. Bemerkenswerterweise benötigt IMP1 dabei mit vollständigem topologischem Wissen eine geringere Zeit für Weiterleitungentscheidungen. Dieses Ergebnis überrascht auf den ersten Blick, führt das vollständige Wissen doch zu einer wesentlich größeren lokalen Verbandsstruktur mit einer Vielzahl von Routern und Lokationen. Allerdings ist die Anzahl der Lokationen im Verband, die bei der Berechnung von \sup_{r,r_t} und \langle tatsächlich durch den weiterleitenden Router r berücksichtigt werden müssen, identisch für das minimale und vollständige topologische Wissen, da bereits das minimale Wissen alle Lokationen $l \geq s(r)$ enthält. Zusätzlich hat das vollständige Wissen den Vorteil, dass der dem Zielgebiet am nächsten liegende Router in einem Schritt gefunden werden kann, da der designierte Router des Zielgebiets τ dem weiterleitenden Router bekannt ist. Im Falle des minimalen topologischen Wissens müssen dagegen alle Lokationen auf dem Pfad des geringsten Anstiegs von τ nach $s(r)$ nach einem bekannten physischen Router durchsucht werden, bis schließlich ein Vater-Router von r als nächster Router identifiziert wird. Diese Suche führt insbesondere zu vielen Ausführungen der Operation \langle . Daher reduziert mehr Wissen über physische Router effektiv die Suchzeit von IMP1.

Abbildung 3.52 zeigt des Weiteren, dass IMP2 im Falle des minimalen topologischen Wissens die notwendige Zeit für Weiterleitungentscheidungen signifikant im Vergleich zu IMP1 reduziert. Zwar wächst auch hier die Zeit mit der Anzahl an Multi-Vater-Lokationen durch längere Kodeworte, allerdings im Vergleich zu IMP1 nur minimal. Dieses für IMP2 zunächst positive Bild ändert sich allerdings bei Betrachtung größerer lokaler Ausschnitte der Verbandsstruktur. Bei vollständigem topologischem Wissen benötigt IMP2 für baumförmige Modelle (0% Multi-Vater-Lokationen) im Durchschnitt 53 ms (nicht in Abbildung 3.52 dargestellt). Messungen mit Verbandsstrukturen mit Multi-Vater-Lokationen konnten aufgrund des benötigten Hauptspeicherbedarfs, der die zur Verfügung stehenden 4 GB überschritt, nicht mehr durchgeführt werden. Hieraus kann geschlossen werden, dass die Kodierung der Verbandsstruktur aufgrund der Platzkomplexität nur bei kleinen lokalen Ausschnitten (geringem topologischem Wissen) nützlich ist.

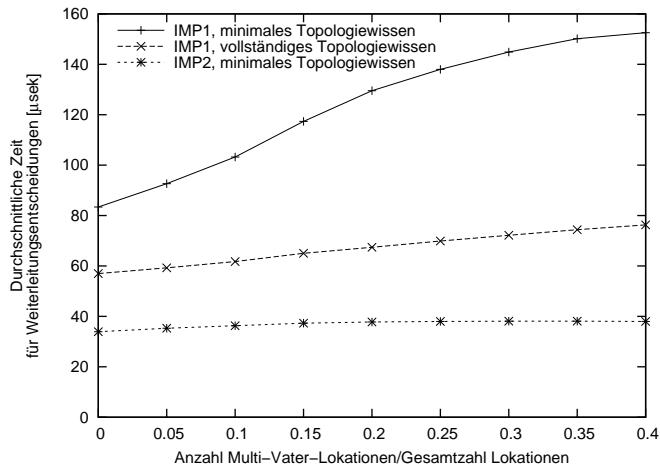


Abbildung 3.52: Durchschnittliche Zeit für Weiterleitungsentscheidungen pro Geocast-Router.

3.10.2.2 Vergleich symbolischer und geometrischer Vermittlungsalgorithmen

Abschließend soll die Leistung von symbolischen und geometrischen Vermittlungsalgorithmen verglichen werden. Als Leistungsmetrik wird dabei wieder die Zeit für das Treffen von Weiterleitungsentscheidungen betrachtet. Es werden die jeweiligen Zeiten der beiden Implementierungen IMP1 und IMP2 des symbolischen Vermittlungsalgorithmus mit einem geometrischen Verfahren basierend auf der Berechnung des Schnitts von geometrischen Figuren (Polygone) verglichen. Wir gehen dabei von einem Szenario aus, in dem Router nur das minimale topologische Wissen besitzen. Außerdem wird wiederum nur Phase 1 der Vermittlung betrachtet, da geometrische und symbolische Vermittlungsverfahren basierend auf hierarchischen Overlay-Netztopologien sich in Phase 2 praktisch nicht unterscheiden; in beiden Fällen erfolgt eine einfache Weiterleitung an alle Kind-Router ohne weitere Überprüfung der symbolischen oder geometrischen Dienstgebiete.

IMP1 und IMP2 bestimmen den nächsten Router durch Traversieren der Verbandsstruktur beziehungsweise Vergleich von kodierten symbolischen Lokationen wie oben beschrieben. Für die geometrische Vermittlung gehen wir ebenfalls von einer Router-Hierarchie aus. Ein geometrischer Geocast-Router bestimmt den nächsten Router in der Hierarchie durch Vergleich der (geometrischen) Dienstgebiete seiner Vater- und Kind-Router mit dem Zielgebiet. Dienstgebiete und Zielgebiet sind in diesem Fall jeweils durch Polygone definiert die für Weiterleitungsentscheidungen auf Überschneidung geprüft werden.

Für baumförmige Modelle (0% Multi-Vater-Lokationen) erreichen IMP1 und IMP2 durchschnittliche Zeiten für das Treffen von Weiterleitungsentscheidungen von $83\mu s$ beziehungsweise $34\mu s$. Das heißt, ein Geocast-Router kann ca. 12.000 beziehungsweise 29.400 Weiterleitungsentscheidungen treffen. Auf demselben Rechner benötigt der Schnitt zweier Polygone mit 4 und 20 Knoten $44\mu s$ beziehungsweise $227\mu s$. In unserem Szenario muss ein geometrischer Router r zwischen einem Vergleich im besten Fall

(Dienstgebiet von r) und 18 Vergleichen im schlechtesten Fall (Dienstgebiete von r , ein Vater-Router und 16 Kind-Routern) durchführen. Das bedeutet, für Polygone mit vier Knoten ist IMP1 zwischen ca. 0,5 und 9,5 Mal schneller als die geometrische Vermittlung; IMP2 ist ca. 1,3 bis 23,3 Mal schneller als das geometrische Verfahren. Für Polygone mit 20 Knoten ist IMP1 ca. 2,7 bis 49,2 Mal und IMP2 ca. 6,7 bis 120,2 Mal schneller als der geometrische Algorithmus. Hierbei ist zu beachten, dass ein Polygon mit nur vier Knoten ein Ziel- beziehungsweise Dienstgebiet nur relativ grob approximiert. In diesem Fall kann es zu unnötig weitergeleiteten Nachrichten an Router außerhalb des tatsächlichen Zielgebiets kommen. Genauere Approximierungen gehen mit den oben gemessenen steigenden Zeiten für Weiterleitungsentscheidungen einher. Eine symbolische Repräsentation verwendet dagegen immer das exakte Zielgebiet (kann allerdings auch nur solch vordefinierte Gebiete beschreiben).

Insgesamt demonstrieren die zwei Implementierungen des vorgeschlagenen symbolischen Vermittlungsalgorithmus eine hohe Leistungsfähigkeit auch im Vergleich zu geometrischen Verfahren.

3.10.3 Abschließende Bewertung

Abschließend sollen die aus der Evaluierung gewonnenen Erkenntnisse an dieser Stelle kurz zusammengefasst werden.

Insgesamt hat die Evaluierung gezeigt, dass die Einrichtung von Direktverbindungen mit den in dieser Arbeit vorgeschlagenen Heuristiken im Vergleich zur baumbasierten Vermittlung ohne Direktverbindungen eine deutliche Steigerung der Effizienz und somit der Skalierbarkeit ermöglicht. Zum einen werden durch Direktverbindungen die Nachrichtenpfade deutlich verkürzt. Zum zweiten führt die Verkürzung von Nachrichtenpfaden direkt zu einer Reduktion der Kommunikationslast im unterlagerten IP-Netz. Zum dritten kann auch die Last von Geocast-Overlay-Routern durch Direktverbindungen deutlich reduziert und somit die Nachteile rein hierarchischer Vermittlungsansätze (Überlastung der Router auf hohen Ebenen) beseitigt werden.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass sich der Kommunikationsmehraufwand zur Einrichtung von dynamischen Direktverbindungen im Vergleich zu statisch vordefinierten Direktverbindungen vor allem in Szenarien auszahlt, in denen häufig entfernte Zielgebiete adressiert werden und stärker ausgeprägte Hotspots existieren. In Szenarien mit lokalem Nachrichtenverkehr führt, wie durch die zugrunde liegenden Entwurfsentscheidung beabsichtigt, die vorgeschlagene statische Auswahlstrategie für Direktverbindungen bereits zu einer starken Reduktion der Netzlast und Verkürzung der Nachrichtenpfade. Es bietet sich daher an, eine statische Direktverbindungsheuristik wie die von SSR verwendete mit einer dynamischen Heuristik wie der von ASR verwendeten zu kombinieren. Die statischen Direktverbindungen von SSR optimieren dabei primär die Pfade zu nahen Zielgebieten beziehungsweise dem allgemein vorherrschenden und vorhersagbaren Nachrichtenmuster. Dynamische Direktverbindungen optimieren Pfade zu ausgezeichneten Zielgebieten (Hotspots) mit hoher Popularität, unabhängig von deren geographischen Lage, die sich im Laufe der Zeit auch dynamisch ändern kann.

Schließlich hat diese Evaluierung gezeigt, dass die für die verbandsbasierten Vermitt-

lung notwendigen Operationen (Berechnung des Supremums, Vergleich von Lokationen bezüglich ihrer Position im Verband) effizient implementiert werden können. Diese Operationen, deren Implementierung im Vergleich zur Implementierung der Operationen rein baumbasierten Modelle (Präfixvergleich) eine höhere Komplexität aufweist, sind insbesondere für das rasche Treffen von Weiterleitungsentscheidungen kritisch. Es konnte gezeigt werden, dass mit einem graphbasierten Algorithmus und einem Algorithmus zur Kodierung der Verbandsstruktur zwei effiziente Verfahren existieren, die auch in größeren Verbänden die effiziente Bestimmung des nächsten Routers erlauben.

3.11 Zusammenfassung

In diesem Kapitel der Arbeit wurden zwei verschiedene Klassen von Vermittlungsansätzen für symbolisch adressierte Geocast-Nachrichten einschließlich der notwendigen Netzstrukturen und Protokolle im Detail vorgestellt: Verzeichnisbasierte Ansätze und symbolische Vermittlungsansätze.

Die verzeichnisbasierten Ansätze bilden zunächst die symbolische Geocast-Adresse auf eine Menge von IP-Adressen ab, welche in einem zweiten Schritt für die Vermittlung genutzt werden. Hierbei können im zweiten Schritt die Nachrichten sowohl per IP-Unicast als auch IP-Multicast zugestellt werden. Insbesondere bei größeren Empfängergruppen bietet sich IP-Multicast für die effiziente Vermittlung an. Allerdings stellt Geocast aufgrund der großen Anzahl an notwendigen Multicast-Gruppen für ein feingranulares globales Lokationsmodell entsprechende Anforderungen an die verwendeten Multicast-Protokolle. Es wurde daher die Verwendung von explizitem Multicast (Xcast) vorgeschlagen, das sich insbesondere für eine große Anzahl an kleineren Gruppen eignet.

Die symbolische Vermittlung verwendet anstatt eines zweistufigen Vermittlungsprozesses direkt symbolische Adressen für die Weiterleitung von Geocast-Nachrichten. Hierfür wurden entsprechende dem IP-Netz überlagerte Overlay-Netzstrukturen vorgeschlagen. Diese Netze bestehen aus einer Menge spezieller Geocast-Router, welche symbolische Adressen interpretieren und daraus die nächsten Geocast-Router auf dem Weg ins Zielgebiet bestimmen können. Die Grundidee ist dabei die Abbildung des hierarchischen symbolischen Lokationsmodells auf eine entsprechende logische hierarchische Overlay-Netzstruktur. Das heißt, jeder Geocast-Router wird mit einem bestimmten symbolisch definierten Dienstgebiet assoziiert und die Geocast-Router bilden eine Hierarchie entsprechend der räumlichen Inklusionsbeziehung zwischen ihren Dienstgebieten. Entsprechend der vorgeschlagenen hierarchischen Lokationsmodelle wurde ein baumförmiges und eine verbandsbasiertes Geocast-Overlay-Netz entworfen, einschließlich der notwendigen Mechanismen zur Verwaltung (Hinzufügen/Entfernen von Geocast-Routern, Behandlung von Router-Fehlern) der Netze. Als Optimierung der grundsätzlich hierarchischen Netzstrukturen wurden verschiedene Strategien zur Ergänzung der hierarchischen Netze durch zusätzliche Direktverbindungen entworfen. Direktverbindungen entlasten dabei vor allem Geocast-Router an der Spitze der Hierarchie, die im Allgemeinen nur dünn besetzt und somit anfällig für Überlastungen ist. Im Einzelnen wurde eine Heuristik zur Einrichtung statischer Direktverbindungen vorgeschlagen, die unabhängig vom tat-

sächlichen Nachrichtenaufkommen sind, und eine dynamische Heuristik, welche Direktverbindungen aufgrund der Popularität von Zielgebieten einrichtet. Als weitere optionale Optimierung wurde die Integration eines quellspezifischen IP-Multicast-Protokolls vorgeschlagen. Schließlich wurden Ansätze zur Vermittlung von Nachrichten an mobile Zielgebiet wie Züge vorgeschlagen.

In der Evaluierung wurde die Effizienz der vorgeschlagenen Ansätze vor allem hinsichtlich der erzielten Nachrichtenpfadlänge nachgewiesen. Als beste Strategie erwies sich dabei die Kombination der statischen und dynamischen Strategie zur Einrichtung von Direktverbindungen. Hierdurch konnten Nachrichtenpfade im Overlay-Netz erzielt werden, die nur geringfügig länger waren, als die Pfade, welche durch einen (optimalen) IP-Multicast-basierten Ansatz erzielt werden können.

Kapitel 4

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse dieser Arbeit kurz zusammengefasst. Anschließend erfolgt ein Ausblick auf mögliche zukünftige Erweiterungen.

4.1 Zusammenfassung

Diese Arbeit befasste sich mit der Konzipierung und Implementierung von ortsbezogenen Kommunikationsmechanismen (Geocast), mit denen ortsbezogene Anwendungen und Systeme in die Lage versetzt werden, Nachrichten an Teilnehmer zu versenden, die sich an bestimmten Orten aufhalten. Wie an verschiedenen Stellen dargestellt wurde, sind die Anwendungen für einen solchen Geocast-Kommunikationsmechanismus sehr vielfältig und reichen von der Verteilung von Warnhinweisen in gefährdeten Gebieten, über die Verteilung von Veranstaltungsinformationen bis hin zur ortsbezogenen Werbung. Ermöglicht wird die praktische Realisierung eines entsprechenden Geocast-Mechanismus durch verschiedene aktuelle Technologietrends, insbesondere leistungsfähige mobile Kommunikationstechnologien und die großflächige Verfügbarkeit von Positionierungssystemen, die eine Bestimmung der Position von mobilen Teilnehmern sowohl im Freien als auch innerhalb von Gebäuden ermöglichen.

Zur Realisierung eines globalen und universell einsetzbaren Geocast-Dienstes leistete diese Arbeit zwei Hauptbeiträge. Zum einen wurde ein *feingranulares Lokationsmodell* vorgeschlagen, das insbesondere die Anforderungen der ortsbezogenen Kommunikation erfüllt, nämlich die Beschreibung von Zielgebieten, Empfängerpositionen und deren Vergleich zur Feststellung, welche Empfänger sich jeweils im Zielgebiet einer Geocast-Nachricht befinden. Dieses hybride Lokationsmodell vereinigt die Möglichkeit zur geometrischen und symbolischen Modellierung von Lokationen. Das hybride Modell basiert auf einer symbolischen Lokationshierarchie, die aufgrund der räumlichen Inklusionsbeziehung zwischen Lokationen definiert ist. Unterstützt werden dabei sowohl einfache Lokationsbäume als auch Lokationsverbände, die im Gegensatz zu Bäumen auch partiell überlappende Lokationen darstellen können. Lokationen können neben symbolischen, hierarchisch strukturierten Namen auch geometrische Ausdehnungen zugewiesen werden, sowohl in Form zweidimensionaler als auch 2,5-dimensionaler Figuren.

Neben der grundsätzlichen Fähigkeit dieses hybriden Modells, sowohl symbolische als auch geometrische Lokationen abzubilden, sind insbesondere die folgenden Eigenschaften hervorzuheben. So erlaubt das Modell die Integration lokaler symbolischer und geometrischer Teilmodelle und Referenzsysteme. Zusätzlich müssen Lokationen nicht exakt modelliert werden, sondern können auch durch approximierte Ausdehnungen beschrieben werden. Durch das Konzept der Vererbung von geometrischen Beschreibungen kann insbesondere jeder symbolischen Lokation ein (approximiertes) geometrisches Modell zugewiesen werden. Zusätzlich können mit Hilfe von Transformationsvorschriften Koordinaten eines lokalen Teilmodells in Koordinaten eines anderen Teilmodells übersetzt werden. Somit wird insgesamt sichergestellt, dass alle Formen von Zielgebieten und Empfängerpositionen – exakte und approximierte geometrisch oder symbolisch Beschreibungen sowie Beschreibungen aus verschiedenen Teilmodellen – miteinander verglichen werden können.

Neben der Modellierung stationärer Modelle wurden ferner Konzepte zur Integration mobiler Objekte und ihrer Teilmodell in das globale Lokationsmodell vorgeschlagen. Diese Integration beruht ebenfalls auf dem oben erwähnten Konzept der lokalen Teilmodelle und ermöglicht somit auch die Adressierung von Lokationen innerhalb von mobilen Objekten, zum Beispiel eines bestimmten Wagens eines Zuges.

Als zweiter Hauptbeitrag dieser Arbeit wurden *skalierbare Geocast-Vermittlungsverfahren* vorgeschlagen, mit einem Schwerpunkt auf der Vermittlung symbolisch adressierter Nachrichten und Nachrichten an mobile Zielgebiete. Ziel waren insbesondere Ansätze, die ohne Modifikation der bestehenden IP-Router-Infrastruktur realisiert werden können. Beschrieben wurden dabei einerseits verzeichnisbasierte Ansätze als auch dedizierte Geocast-Overlay-Netze.

Die Grundidee der verzeichnisbasierten Ansätze war dabei die Ermittlung der IP-Adressen aller Empfänger im spezifizierten Zielgebiet mit Hilfe eines Verzeichnisses. Im zweiten Schritt wurde die Geocast-Nachricht diesen Empfängern mittels IP-Unicast oder IP-Multicast zugestellt. Für die Verwendung von IP-Multicast wurde dabei der Einsatz von explizitem Multicast (Xcast) vorgeschlagen, einem Verfahren, das in der Lage ist, mit einer großen Menge an Multicast-Gruppen, wie sie für die geographische Kommunikation benötigt werden, umzugehen.

Der zweite Geocast-Vermittlungsansatz beruht auf der IP-Infrastruktur überlagerten Overlay-Netzen. Die Grundidee ist hierbei, eine Overlay-Netz-Topologie zu erstellen, die eine Vermittlung von Geocast-Nachrichten direkt auf Basis der symbolischen Zielgebietsadressen erlaubt. Hierfür wurde zunächst eine hierarchische Basistopologie definiert, die anschließend durch zusätzliche Direktverbindungen strukturell optimiert wurde, um insbesondere zu vermeiden, dass Overlay-Router an der Spitze der Hierarchie überlastet werden. Gleichzeitig erhöhen diese Direktverbindung die Skalierbarkeit durch kürzere Pfade, und verringern damit die Last auf der unterlagerten IP-Netz. Für die Selektion geeigneter Direktverbindungen wurden zwei Strategien vorgeschlagen. Zum einen eine statische Heuristik. Die Grundidee dieses Heuristik ist die Einrichtung vergleichsweise vieler (kurzer) Verbindungen zu nahen Orten und von wenigen (langen) Verbindungen zu entfernten Orten, wobei die Ziellokationen der Direktverbindungen statisch vorbestimmt werden. Die komplementäre dynamische Heuristik zur Selektion von Direktverbindun-

gen wählt dagegen Ziele aufgrund deren Popularität, das heißt, Direktverbindungen zu häufig adressierten Gebieten werden bevorzugt eingerichtet. Die Auswahl erfolgt dynamisch durch ein dezentrales Verfahren, bei dem jeder Overlay-Router individuell aufgrund der beobachteten weitergeleiteten Nachrichten Direktverbindungsziele auswählt.

Neben der Unterstützung von Lokationsbäumen durch entsprechende baumförmige Basisnetztopologien wurde außerdem eine verbandsbasierte Netzstruktur beschrieben, die mit dem verbandsbasierten Lokationsmodell kompatibel ist. Hierfür wurden ebenfalls geeignete Vermittlungsalgorithmen entworfen.

Neben der reinen Overlay-Netz-basierten Vermittlung wurde außerdem eine Multicast-basierte Optimierung der Nachrichtenvermittlung vorgeschlagen. Mit Hilfe von so genanntem Source-specific Multicast (SSM) können hierbei für bestimmte Zielgebiete, an die große Datenvolumina über einen längeren Zeitraum gesendet werden sollen, bei Bedarf IP-Multicast-Gruppen und die entsprechenden Verteilstrukturen auf der Vermittlungsschicht erstellt werden. Dieser Ansatz zeichnet sich dadurch aus, dass er die allgemeinen Nachteile der Multicast-basierten Ansätze vermeidet. Insbesondere wird durch die bedarfsgtriebene Einrichtung der Gruppen vermieden, eine größere Zahl an Multicast-Verteilstrukturen ständig aufrechterhalten zu müssen. Ferner wird dadurch das Problem des vor allem bei IPv4 für Geocast zu kleinen Adressraums der IP-Multicast-Adressen vermieden. Da IP-Multicast bei diesem Ansatz nur als Optimierung eingesetzt wird, ist außerdem auch eine Vermittlung in Situationen möglich, in denen von den Netzanbietern keine globale IP-Multicast-Unterstützung angeboten wird.

Schließlich wurden verschiedene Konzepte zur Vermittlung von Nachrichten an mobile Zielgebiete vorgeschlagen. Mit Hilfe der so genannten Stellvertretervermittlung kann ein lokaler Server im mobilen Objekt – zum Beispiel innerhalb eines Zuges – Nachrichten an (stationäre) Zielgebiete entgegennehmen, in denen sich das Objekt gerade aufhält. In einem zweiten Schritt können diese Nachrichten dann an alle mobilen Objekt verteilt werden, die ein Zugangsnetz des mobilen Objekts verwenden, zum Beispiel alle Passagiere des Zuges, die über ein zuginternes WLAN angebunden sind. Mit den Konzepten des Geocast-in-Geocast-Tunnels und der Mobilen-Geocast-Kommunikation können dagegen Nachrichten an Zielgebiete innerhalb des mobilen Objekts selbst zugestellt werden, zum Beispiel an alle Passagiere in einem bestimmten Wagen des Zuges. Der Geocast-in-Geocast-Tunnel kapselt hierzu die eigentliche Nachricht in eine weitere Geocast-Nachricht an ein stationäres Gebiet, das die aktuelle Position des mobilen Objekts enthält. Die so an das mobile Objekt zugestellte Nachricht kann von einem dedizierten Server im Zug entpackt und über das lokale Netz an lokale Teilnehmer zugestellt werden. Mobile-Geocast ist ein alternativer Vermittlungsansatz, der zur Zustellung der Nachricht an das mobile Objekt ein IP-basiertes Vermittlungsprotokoll wie Mobile-IP mit Mobilitätsunterstützung verwendet.

Mit Hilfe diverser Simulationen konnte schließlich gezeigt werden, dass die vorgeschlagenen Vermittlungsverfahren effizient arbeiten. Insbesondere wurde gezeigt, dass die Optimierung der Overlay-Netze durch zusätzliche Direktverbindungen zu kurzen Pfaden und somit einer geringen Netzlast führt.

4.2 Ausblick

Als Fortführung dieser Arbeit sind verschiedene Erweiterungen der vorgestellten ortsbezogenen Kommunikationsmechanismen denkbar.

Erweiterung des Adressierungskonzepts – von der orts- zur kontextbezogenen Kommunikation:

An erster Stelle ist hier die Erweiterung des Adressierungskonzepts zu nennen. In dieser Arbeit wurde ein detailliertes Konzept zur feingranularen ortsbezogenen Adressierung von Nachrichten vorgeschlagen, um damit die gezielte Verteilung ortsbezogener Informationen zu ermöglichen. Obwohl der Ort allgemein als eine wichtige primäre Kontextinformationen angesehen wird [RDD⁺03], so existieren neben dem Ort weitere Kontextinformationen, die zur Charakterisierung der Situation eines Empfängers herangezogen werden können. Als Beispiele können hier der Typ der adressierten Empfänger (Fußgänger, Fahrzeuge, usw.) und weitere Empfängerattribute wie Alter, Beruf, Interessen, usw. genannte werden. Durch Integration allgemeiner Kontextinformationen in das vorgestellte, bisher rein ortsbezogene Adressierungskonzept ließe sich somit die ortsbezogene Kommunikation (Geocast) zur *kontextbezogenen Kommunikation (Contextcast)* erweitern, die Sender in die Lage versetzt, allgemeine kontextbezogene Informationen selektiv zu verteilen.

Neben der Erweiterung des zugrunde liegenden Adressierungskonzepts durch geeignete Kontextattribute sind zur Realisierung von Contextcast auch neue skalierbare Verteilmechanismen erforderlich, die neben dem Ort auch weitere Kontextattribute bei der Nachrichtenvermittlung unterstützen. Die in dieser Arbeit betrachteten verzeichnisbasierten Ansätze und die Ansätze zur Vermittlung von Geocast-Nachrichten in Overlay-Netzen können hierbei als Grundlage dienen.

Der verzeichnisbasierte Ansatz ist dabei grundsätzlich auf Contextcast übertragbar, setzt allerdings ein entsprechend mächtiges Verzeichnis voraus, das neben dem Ort auch weitere Kontextattribute der Empfänger abbildet. Zusätzlich bleibt im Falle der Verwendung von IP-Multicast als Vermittlungsprotokoll die Schwierigkeit der Abbildung allgemeiner Empfängerkontakte auf die Gruppenadressen der Empfänger erhalten bzw. wird sogar weiter durch die kombinatorische Vielfalt von Empfängerkontexten erschwert. Explizite Multicast-Protokolle könnten auch hier eine Lösung darstellen, mit der dadurch gegebenen Einschränkung auf kleine und mittlere Empfängergruppen.

Zur Vermittlung kontextbezogener Nachrichten erscheint es daher sinnvoll, spezielle Verteilstrukturen in Form von Overlay-Netzen zu definieren, um in diesen Netzen Nachrichten unmittelbar anhand von Kontextinformationen weiterzuleiten. Diese *kontextbezogene Vermittlung* kann als eine Erweiterung der geographischen Vermittlung aufgrund von Ortsinformationen angesehen werden. Da sich die Topologie der Geocast-Overlay-Netze bisher nur am zugrunde liegenden Lokationsmodell orientiert, ist es eine bisher offene Frage, wie zusätzliche Kontextattribute in diese Topologie integriert werden können.

Die allgemeine kontextbezogene Adressierung muss außerdem nicht auf den aktuellen Kontext eines Empfängers beschränkt bleiben. Es ist auch denkbar, Nachrichten an

Empfänger zu senden, die in der Vergangenheit einen bestimmten Kontext hatten. So könnte beispielsweise Nachrichten an alle Personen gesendet werden, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort aufgehalten haben. Solche Nachrichten an historische Kontexte könnten verwendet werden, um beispielsweise Zeugen eines Unfalls zu ermitteln, die sich zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Nähe des Unfallortes aufgehalten haben, oder um alle Besucher einer öffentlichen Veranstaltung zu informieren. Da die aktuellen Verteilmechanismen nur aktuelle Empfängerpositionen berücksichtigen, wäre hierfür die Integration einer Komponente zur Verwaltung historischer Empfängerkontakte erforderlich.

Symbolische Geocast-Protokolle für Ad-hoc-Netze:

Der Fokus dieser Arbeit lag auf ortsbezogenen Kommunikationsmechanismen für infrastrukturbasierte Systeme wie dem Internet. Die Verteilung ortsbezogener Informationen spielt allerdings auch in lokalen, infrastrukturlosen Systemen eine wichtige Rolle. Ein Beispiel für solche Systeme sind insbesondere mobile Ad-hoc-Netze (MANET), die spontan durch eine Menge von mobilen Endgeräten gebildet werden und deren Topologie sich ständig aufgrund der Mobilität der Benutzer ändert. Ein weiteres Beispiel sind drahtlose vermaschte Netze (Wireless Mesh Network), die für die kostengünstige Vernetzung von kleineren Gebieten wie Gebäuden bis hin zu ganzen Städten verwendet werden. Hierbei bilden stationäre oder mobile Mesh-Router ein drahtloses Ad-hoc-Netz. Hierbei kommen typischerweise ähnliche Vermittlungsprotokolle wie in MANETs zum Einsatz.

Für Ad-hoc-Netze existieren bereits diverse Geocast-Ansätze zur Vermittlung geometrisch adressierter Nachrichten (vergleiche Abschnitt 3.2.2.5). Die effiziente Vermittlung von symbolisch adressierten Nachrichten ist allerdings eine noch offene Frage. Hierbei sind geometrische Verfahren nicht ohne Weiteres übertragbar, da diese meist auf positionsbasierten Vermittlungsansätzen beruhen. Vereinfacht ausgedrückt vergleicht eine weiterleitender Knoten hierbei die Position seiner unmittelbar benachbarten Knoten mit der Position des Zielgebiets um festzustellen, in welche Richtung die Nachricht weiterzuleiten ist. Dieser Vergleich ist auf symbolischen Koordinaten nicht ohne Weiteres möglich. Ein Ansatz könnte die Verwendung eines geeigneten symbolischen Lokationsmodells sein, aus dem sich die entsprechenden Richtungsinformationen ableiten lassen. Im Gegensatz zu dieser Arbeit, in der ein rein hierarchisches Modell verwendet wurde, bietet sich in diesem Fall ein graphbasiertes oder hybrides Modell an, das neben der räumlichen Inklusion auch die Konnektivität zwischen Lokationen abbildet.

Schließlich ist die Integration von infrastrukturbasierten und infrastrukturlosen Systemen ein mögliches Ziel zukünftiger Arbeiten. Ad-hoc-Netze könnten beispielsweise als Zugangsnetze mit unter Umständen dynamischen Abdeckungen als Blätter in die vorgeschlagene hierarchische Geocast-Infrastruktur integriert werden, um somit einen Übergang zwischen dem Geocast-Overlay-Netz und den einzelnen Ad-hoc-Netzen zu schaffen und ein durchgängiges Geocast-System zu realisieren.

Literaturverzeichnis

[ADD⁺04] ARBTER, B., T. DROSDOL, F. DÜRR, M. GROSSMANN, N. HÖNLE und S. VOLZ: *Das Nexus Relationen- und Topologiekonzept*. SFB-Schriftenreihe, Sonderforschungsbereich 627, Universität Stuttgart, 2004.

[ANS05] ADAMS, A., J. NICHOLAS und W. SIADAK: *Protocol Independent Multicast - Dense Mode (PIM-DM): Protocol Specification (Revised)*, Januar 2005. Internet Engineering Taskforce RFC 3973.

[Bal97a] BALLARDIE, A.: *Core Based Trees (CBT) Multicast Routing Architecture*, September 1997. Internet Engineering Taskforce RFC 2201.

[Bal97b] BALLARDIE, A.: *Core Based Trees (CBT version 2) Multicast Routing*, September 1997. Internet Engineering Taskforce RFC 2189.

[BB02] BACHIR, A. und A. BENSLIMANE: *A Multicast Protocol in Ad Hoc Networks, Inter-Vehicle Geocast*. In: *Proceedings of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference*, 2002.

[BBR01] BAUER, M., C. BECKER und K. ROTHERMEL: *Location Models from the Perspective of Context-aware Applications and Mobile Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the Workshop on Location Modeling for Ubiquitous Computing*, Atlanta, Georgia, USA, September 2001.

[BC05] BOUDANI, A. und B. COUSIN: *An hybrid explicit multicast/recursive unicast approach for multicast routing*. Computer Communications, 28(16):1814–1834, 2005.

[BCSW98] BASAGNI, S., I. CHLAMATAC, V. SYROTIUK und B. WOODWARD: *A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)*. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM Mobicom 1998)*, 1998.

[BCT01] BOLENG, J., T. CAMP und V. TOLETY: *Mesh-based Geocast Routing Protocols in an Ad Hoc Network*. In: *Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium*. IEEE Computer Society, 2001.

[BD05] BECKER, C. und F. DÜRR: *On Location Models for Ubiquitous Computing*. Personal and Ubiquitous Computing, 9:20–31, 2005.

[BDG⁺00] BENEDICTO, J., S.E. DINWIDDY, G. GATTI, R. LUCAS und M. LUGERT: *GA-LILEO: Satellite System Design and Technology Developments*. Technischer Bericht, European Space Agency, November 2000.

[BDG⁺04] BAUER, M., F. DÜRR, J. GEIGER, M. GROSSMANN, N. HÖNLE, J. JOSWIG, D. NICKLAS und T. SCHWARZ: *Information Management and Exchange in the Nexus Platform*. Technischer Bericht 2004/04, Sonderforschungsbereich 627, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2004.

[BFC93] BALLARDIE, T., P. FRANCIS und J. CROWCROFT: *Core based trees (CBT) – An architecture for scalable inter-domain multicast routing*. In: *Proceedings of the 1993 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications (ACM SIGCOMM 1993)*, San Francisco, California, USA, September 1993.

[BFI⁺01] BOIVIE, R., N. FELDMAN, Y. IMAI, W. LIVENS, D. OOMS und O. PARIDAENS: *Explicit Multicast (Xcast) Basic Specification*, März 2001. Internet Engineering Taskforce Internet Draft.

[Bha03] BHATTACHARYYA, S.: *An Overview of Source-Specific Multicast (SSM)*, Juli 2003. Internet Engineering Taskforce RFC 3569.

[BKMN02] BAHN, H., K. KOH, S. L. MIN und S. H. NOH: *Efficient Replacement of Non-uniform Objects in Web Caches*. Computer, 35(6):65–73, 2002.

[BS01] BRUMITT, B. und S. SHAFER: *Topological World Modeling Using Semantic Spaces*. In: *Proceedings of the Workshop on Location Modeling for Ubiquitous Computing, UbiComp 2001*, Seiten 55–62, September 2001.

[CCT01] CHANG, C.-Y., C.-T. CHANG und S.-C. TU: *Obstacle-free Geocasting Protocols for Single/Multi-destination Short Message Services in Ad Hoc Networks*. Wireless Networks, 9(2), 2001.

[CDKR02] CASTRO, M., P. DRUSCHEL, A.-M. KERMARREC und A. ROWSTRON: *SCRIBE: A Large-scale and Decentralized Application-level Multicast Infrastructure*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (J-SAC), Special Issue on Network Support for Group Communication, 20(8):1489–1499, Oktober 2002.

[Cha03] CHAWATHE, Y.: *Scattercast: An Adaptable Broadcast Distribution Framework*. ACM Multimedia Systems, 9, 2003.

[CRD02] COSCHURBA, P., K. ROTHERMEL und F. DÜRR: *A Fine-Grained Addressing Concept for GeoCast*. In: *Proceedings of the International Conference on Architecture of Computing Systems 2002 (ARCS 2002)*, Seiten 101–113, Karlsruhe, Germany, April 2002.

[CRSZ03] CHU, Y.-H., S. G. RAO, S. SESHAN und H. ZHANG: *A case for end system multicast*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (J-SAC), Special issue on network support for group communication, 2003.

[DBR03] DÜRR, F., C. BECKER und K. ROTHERMEL: *On a Location Model for Fine-Grained Geocast*. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2003)*, Seiten 18–35, Seattle, Washington, USA, Oktober 2003.

[DBR05] DÜRR, F., C. BECKER und K. ROTHERMEL: *Efficient Forwarding of Symbolically Addressed Geocast Messages*. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2005)*, Seiten 77–85, San Diego, California, USA, Oktober 2005.

[DC90] DEERING, S. E. und D. E. CHERITON: *Multicast Routing in Datagram Internetworks and Extended LANs*. ACM Transactions on Computer Systems, 8(2):85–110, Mai 1990.

[DEF⁺96] DERRING, S., D. L. ESTRIN, D. FARINACCI, V. JACOBSON, C.-G. LIU und L. WEI: *The PIM architecture for wide-area multicast routing*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 4(2), 1996.

[DHN⁺04] DÜRR, F., N. HÖNLE, D. NICKLAS, C. BECKER und K. ROTHERMEL: *Nexus – A Platform for Context-Aware Applications*. Informatik-Bericht der Fernuniversität Hagen, Juni 2004.

[DOD00] U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE – NATIONAL IMAGERY AND MAPPING AGENCY: *World Geodetic System 1984*, Third Edition Auflage, 2000. nuTR8350.2.

[DOD08] U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE: *Global Positioning System – Standard Positioning Service – Performance Standard*, September 2008.

[DPG⁺08] DÜRR, F., J. PALAURO, L. GEIGER, R. LANGE und K. ROTHERMEL: *Ein kontextbezogener Instant-Messaging-Dienst auf Basis des XMPP-Protokolls*. Schriftenreihe der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg, September 2008. 5. GI/ITG KuVS Fachgespräch Ortsbezogene Anwendungen und Dienste.

[DR06] DÜRR, F. und K. ROTHERMEL: *An Overlay Network for Forwarding Symbolically Addressed Geocast Messages*. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2006)*, Seiten 427–434, Arlington, Virginia, USA, Oktober 2006.

[DR08] DÜRR, F. und K. ROTHERMEL: *An Adaptive Overlay Network for World-wide Geographic Messaging*. In: *Proceedings of the 22nd IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2008)*, Seiten 875–882, Gino-wan, Okinawa, Japan, März 2008.

[Dro03] DROSDOL, T.: *Unterstützung symbolischer Koordinaten im Lokationsmanagement*. Diplomarbeit, Institut für Parallelle und Verteilte Systeme, Universität Stuttgart, 2003.

[EF91] EGENHOFER, M. und R. FRANZOSA: *Point-Set Topological Spatial Relations*. Journal of Geographical Information Systems, 5(2), 1991.

[EH90] EGENHOFER, M. und J. HERRING: *A Mathematical Framework for the Definition of Topological Relationships*. In: *Proceedings of the Fourth International Symposium on Spatial Data Handling*, Seiten 803–813, Zurich, Switzerland, 1990.

[EH91] EGENHOFER, M. und J. HERRING: *Categorizing Binary Topological Relationships Between Regions, Lines, and Points in Geographic Databases*. Technischer Bericht, Department of Surveying Engineering, University of Maine, Orono, Maine, USA, 1991.

[ESM93] EGENHOFER, M. J., J. SHARMA und D. M. MARK: *A critical comparison of the 4-intersection and 9- intersection models for spatial relations: formal analysis*. Auto-Carto, 11, 1993.

[FAA01] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – FEDERAL AVIATION ADMINISTRATIVE: *Specification for the Wide Area Augmentation System (WAAS)*, August 2001. FAA-E-2892B.

[Fed09] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION. URL: <http://www.fcc.gov/pshs/services/911-services/>, September 2009.

[FHHK06] FENNER, B., M. HANDLEY, H. HOLBROOK und I. KOUVELAS: *Protocol Independent Multicast – Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification (Revised)*, August 2006. Internet Engineering Taskforce RFC 4601.

[Fra00] FRANCIS, P.: *Yoid: Extending the Internet Multicast Architecture*. Technischer Bericht, International Computer Science Institute (ICSI), Berkeley, California, USA, 2000.

[GI99] GOEL, S. und T. IMIELINSKI: *Data Space – Querying and Monitoring Deeply Networked Collections in Physical Space: Part II – Protocol Details*. Technischer Bericht DCS-TR-400, Rutgers University, Department of Computer Science, Oktober 1999.

[GLN09] GU, Y., A. LO und I. NIEMEGEERS: *A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks*. IEEE Communications Surveys & Tutorial, 11(1):13–32, 2009.

[GMR94] GANGULY, D.D., C.K. MOHAN und S. RANKA: *A Space and Time Efficient Coding Algorithm for Lattice Computations*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 6(5):819–829, Oktober 1994.

[GMVTB01] GAUTHIER, L., P. MICHEL, J. VENTURA-TRAVESET und J. BENEDICTO: *EGNOS: The First Step of the European Contribution to the Global Navigation Satellite System*. ESA Bulletin 105, European Space Agency, Februar 2001.

[HB01] HIGHTOWER, J. und G. BORRIELLA: *Location Systems for Ubiquitous Computing*. IEEE Computer, 34(8):57–66, 2001.

[HC06] HOLBROOK, H. und B. CAIN: *Source-Specific Multicast for IP*, August 2006. Internet Engineering Taskforce RFC 4607.

[Hed88] HEDRICK, C.: *Routing Information Protocol*, Juni 1988. Internet Engineering Taskforce RFC 1058.

[Heu02] HEUTELBECK, D.: *Context Spaces – Self-Structuring Distributed Networks for Contextual Messaging and Resource Discovery*. In: *Proceedings of the Tenth International Conference on Cooperative Information Systems (CoopIS 2002)*, Seiten 248–265, 2002.

[Heu05] HEUTELBECK, D.: *Distributed Space Partitioning Trees and their Application in Mobile Computing*. Doktorarbeit, Fernuniversität Hagen, 2005.

[HJ02] HELDER, D.A. und S. JAMIN: *End-host Multicast Communication Using Switch-Tree Protocols*. In: *Proceedings of the Second Workshop on Global and Peer-to-Peer Computing on Large-Scale Distributed Systems (GP2PC 2002)*, 2002.

[HKL⁺99] HOHL, F., U. KUBACH, A. LEONHARDI, K. ROTHERMEL und M. SCHWEHM: *Next Century Challenges: Nexus – An Open Global Infrastructure for Spatial-Aware Applications*. In: *Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 1999)*, Seiten 249–255, Seattle, Washington, USA, August 1999.

[HWLW07] HOFMANN-WELLENHOF, B., H. LICHTENEGGER und E. WASLE: *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo & more*. Springer, November 2007.

[HWWL03] HOFMANN-WELLENHOF, B., M. WIESER und K. LEGAT: *Navigation: Principles of Positioning and Guidance*. Springer, Oktober 2003.

[IB01] INGENSAND, H. und P. BITZI: *Technologien der GSM Positionierungsverfahren*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 8–9, 2001.

[IG99] IMIELINSKI, T. und S. GOEL: *Data Space – Querying and Monitoring Deeply Networked Collections in Physical Space: Part I – Concepts and Architecture*. Technischer Bericht DCS-TR-381, Rutgers University, Department of Computer Science, Oktober 1999.

[IN96a] IMIELINSKI, T. und J. C. NAVAS: *GPS-Based Addressing and Routing*, November 1996. RFC 2009.

[IN96b] IMIELINSKI, T. und J. C. NAVAS: *GPS-Based Addressing and Routing*, November 1996. Internet Engineering Taskforce RFC 2009.

[IN99] IMIELINSKI, T. und J.C. NAVAS: *GPS-Based Geographic Addressing, Routing, and Resource Discovery*. Communications of the ACM, 42(4):86–92, 1999.

[Int96] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): *Information Technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model*, Juni 1996. Standard Number ISO/IEC 7498-1.

[JGJ⁺00] JANNOTTI, J., D.K. GIFFORD, K.L. JOHNSON, M.F. KAASHOEK und J.W. O'TOOL JR.: *Overcast: Reliable Multicasting with an Overlay Network*. In: *Proceedings of the Fourth Usenix Symposium in Operating Systems Design and Implementation (OSDI 2000)*, 2000.

[JPA04] JOHNSON, D., C. PERKINS und J. ARKKO: *Mobility Support in IPv6*, Juni 2004. Internet Engineering Taskforce RFC 3775.

[JS02] JIANG, C. und P. STEENKISTE: *A Hybrid Location Model with a Computable Location Identifier for Ubiquitous Computing*. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2002)*, Seiten 246–263, Gothenburg, Sweden, September 2002.

[KK00] KARP, B. und H.T. KUNG: *Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks*. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MOBICOM 2000)*, 2000.

[Kle00] KLEINBERG, J.: *The Small-world Phenomenon: an Algorithm Perspective*. In: *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, Seiten 163–170, Portland, Oregon, USA, 2000.

[KLS07] KOVACHEVIĆ, A., N. LIEBAU und R. STEINMETZ: *Globase.KOM – A P2P Overlay for Fully Retrievable Location-based Search*. In: *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing*, Seiten 87–94, 2007.

[KSU99] KRANAKIS, E., H. SINGH und J. URRUTIA: *Compass Routing on Geometric Networks*. In: *Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry*, 1999.

[KV98] KO, Y.-B. und N.H. VAIDYA: *Location-aided routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MOBICOM 1998)*, 1998.

[KV99] KO, Y.-B. und N.H. VAIDYA: *Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks: Location-based Multicast Algorithms*. In: *Proceedings of the Second Workshop on Mobile Systems and Applications*. IEEE Computer Society, 1999.

[KV00] KO, Y.-B. und N.H. VAIDYA: *GeoTORA: A Protocol for Geocasting in Mobile Ad Hoc Networks*. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Network Protocols (ICNP 2000)*, 2000.

[KWZZ03] KUHN, F., R. WATTENHOFER, Y. ZHANG und A. ZOLLINGER: *Geometric Ad Hoc Routing: of Theory and Practice*. In: *Proceedings of the 22nd ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC 2003)*, 2003.

[LCG⁺09] LANGE, R., N. CIPRIANI, L. GEIGER, M. GROSSMANN, H. WEINSCHROTT, A. BRODT, M. WIELAND, S. RIZOU und K. ROTHERMEL: *Making the World Wide Space Happen: New challenges for the Nexus Context Platform*. In: *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2009)*, Galveston, Texas, USA, März 2009.

[LCP⁺05] LUA, K., J. CROWCROFT, M. PIAS, R. SHARMA und S. LIM: *A Survey and Comparison of Peer-to-Peer Overlay Network Schemes*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 7(2):72–93, 2005.

[Leo98] LEONHARDT, U.: *Supporting Location-Awareness in Open Distributed Systems*. Doktorarbeit, Imperial College London, Department of Computing, 1998.

[Leo03] LEONHARDI, A.: *Architektur eines verteilten skalierbaren Lokationsdienstes*. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, 2003.

[Lia00] LIAO, W.H.: *GeoGRID: A Geocasting Protocol for Mobile Ad Hoc Networks Based on GRID*. Journal of Internet Technology, 1(2), 2000.

[LLN03] LILJENSTAM, M., J. LIU und D.M. NICOL: *Development of an internet backbone topology for large-scale network simulations*. In: *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, Seiten 694–702, New Orleans, Los Angeles, USA, Dezember 2003.

[LM03] LI, Z. und P. MOHAPATRA: *Hostcast: A New Overlay Multicast Protocol*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC 2003)*, 2003.

[Luo04] LUO, X.: *Entwurf von Protokollen für die geographische Kommunikation basierend auf symbolischen Koordinaten*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2004.

[Mai04] MAIHÖFER, C.: *A Survey on Geocast Routing Protocols*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 6(2), 2004.

[MFE03] MAIHÖFER, C., W. FRANZ und R. EBERHARDT: *Stored Geocast*. In: *Proceedings of Kommunikation in Verteilten Systemen (KiVS 2003)*, 2003.

[MH01] MAUVE, M. und J. WIDMER H. HARTENSTEIN: *A Survey on Position-based Routing in Mobile Ad-hoc Networks*. IEEE Network, 15(6):30–39, November 2001.

[Moy94] MOY, J.: *Multicast Extensions to OSPF*, März 1994. Internet Engineering Taskforce RFC 1584.

[Moy98] MOY, J.: *OSPF Version 2*, April 1998. Internet Engineering Taskforce RFC 2328.

[Nav01] NAVAS, J.C.: *Geographic Routing in a Datagram Internetwork*. Doktorarbeit, Rutgers University, Department of Computer Science, Mai 2001.

[NGSV01] NICKLAS, D., M. GROSSMANN, T. SCHWARZ und S. VOLZ: *A Model-Based, Open Architecture for Mobile, Spatially Aware Applications*. In: *Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial and Temporal Databases (SSTD 2001)*, Redondo Beach, CA, Juli 2001.

[ns09] *The Network Simulator – ns-2*. URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, November 2009.

[NT97] NAVAS, J.C. und T. IMIELINSKI: *GeoCast – Geographic Addressing and Routing*. In: *Proceedings of the Third Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 1997)*, Seiten 66–76, Budapest, Hungary, September 1997.

[Ope07] OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM INC.: *OpenGIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard*, August 2007. Version 3.2.1.

[Per02] PERKINS, C.: *IP Mobility Support for IPv4*, August 2002. Internet Engineering Taskforce RFC 3344.

[PSVW01] PENDARAKIS, D., S. SHI, D. VERMA und M. WALDVOGEL: *ALMI: An application level multicast infrastructure*. In: *Proceedings of the 3rd Usenix Symposium on Internet Technologies and Systems (USITS 2001)*, 2001.

[RC89] RANDELL, D. A. und A. G. COHN: *Modelling Topological and Metrical Properties in Physical Processes*. In: *Proceedings of the First International Conference on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, Seiten 55–66, Los Altos, 1989.

[RDD⁺03] ROTHERMEL, K., D. DUDKOWSKI, F. DÜRR, M. BAUER und C. BECKER: *Ubiquitous Computing – More than Computing Anytime Anyplace*. In: *Proceedings of the 49th Photogrammetric Week*, Stuttgart, Germany, September 2003.

[RFH⁺01] RATNASAMY, S., P. FRANCIS, M. HANDLEY, R. KARP und S. SCHENKER: *A Scalable Content-addressable Network*. In: *Proceedings of the 2001 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communication (ACM SIGCOMM 2001)*, Seiten 161–172, San Diego, California, USA, 2001.

[RHKS01] RATNASAMY, S., M. HANDLEY, R. KARP und S. SHENKER: *Application-level Multicast Using Content-addressable Networks*. In: *Proceedings of the Third International Workshop on Networked Group Communication (NGC 2001)*, 2001.

[RM06] RISSON, J. und T. MOORS: *Survey of Research Towards Robust Peer-to-Peer Networks: Search Methods*. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 50(17):3485–3521, Dezember 2006.

[Rot03] ROTH, J.: *Semantic Geocast Using a Self-Organizing Infrastructure*. In: *Innovative Internet Community Systems (I2CS)*, Seiten 216–228, Leipzig, Germany, Juni 2003.

[Rot05] ROTH, J.: *A Decentralized Location Service Providing Semantic Locations*. Informatik Bericht 323, Habilitationsschrift, Fernuniversität Hagen, Januar 2005.

[RSA02] RUSSIAN SPACE AGENCY: *Global Navigation Satellite System GLONASS – Interface Control Document*, 2002.

[SMLN⁺03] STOICA, I., R. MORRIS, D. LIBEN-NOWELL, D.R. KARGER, M.F. KAASHOEK, F. DABEK und H. BALA: *Chord: a Scalable Peer-to-Peer Lookup Protocol for Internet Applications*. IEEE/ACM Transactions on Networking, 11(1):17–32, Februar 2003.

[SRL01] STOJMENOVIC, I., A.P. RUHIL und D.K. LOBIYAL: *Voronoi Diagram and Convex Hull-based Geocasting and Routing in Wireless Networks*. In: *Proceedings of the 8th IEEE Symposium on Computers and Communications*, 2001.

[Sta73] STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Springer, 1973.

[Sta09] STATISTICS FINLAND: *Telecommunications Statistics*. URL: http://www.stat.fi/til/tvie/index_en.html, Juni 2009.

[STE00] STOICA, I. und H. ZHANG T.S. EUGENE NG: *REUNITE: A Recursive Unicast Approach to Multicast*. In: *Proceedings of the Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom 2000)*, Tel-Aviv, Israel, März 2000.

[SWKD07a] SATERNUS, M., T. WEIS, M. KNOLL und F. DÜRR: *A Middleware for Context-Aware Applications and Services Based on Messenger Protocols*. In: *Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerComW 2007)*, Seiten 467–471, März 2007.

[SWKD07b] SATERNUS, M., T. WEIS, M. KNOLL und F. DÜRR: *Symstry: Ein P2P-System für Ortsbezogene Anwendungen*. In: *Proceedings of 15. ITG/GI-Fachtagung (KiVS 2007)*, Februar 2007.

[UBL02] U-BLOX AG: *GPS Navigation Performance of TIM GPS Receivers – Application Note*, April 2002. Document ID GPS.G2-X-01001.

[Val99] VALKÓ, A. G.: *Cellular IP: A New Approach to Internet Host Mobility*. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 29(1), Januar 1999.

[van98] VAN DIGGELEN, F.: *GPS Accuracy: Lies, Damn Lies, and Statistics*. GPS World, 9(1):41–45, November 1998.

[van09] VAN DIGGELEN, F.: *A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS*. Artech House, März 2009.

[WPD98] WAITZMAN, D., C. PARTRIDGE und S. DEERING: *Distance Vector Multicast Routing Protocol*, November 1998. Internet Engineering Taskforce RFC 1075.

[WS05] WEI, XINFA und KAORU SEZAKI: *GNet: A Peer-to-Peer Protocol for Internet Scale Location-Based Applications*. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Software and Systems*, Xi'an, China, Dezember 2005.

[XOW04] XU, B., A. OUKSEL und O. WOLFSON: *Opportunistic Resource Exchange in Inter-vehicle Ad-hoc Networks*. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM 2004)*, Seiten 4–12, Berkeley, CA, Januar 2004.

[ZZJ⁺01] ZHUANG, S.Q., B.Y. ZHAO, A.D. JOSEPH, R. KATZ und J. KUBIATOWICZ: *Bayeux: An Architecture for Scalable and Fault-tolerant Wide-area Data Dissemination*. In: *Proceedings of the 11th Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV 2001)*, 2001.