

Mitteilung 335

**Abschlußbericht zum
DFG-Projekt „DLS“
(NE 279/8-1/-2)**

FBI-HH-M-335/05

Volker Haarslev
Concordia University
Montreal, Quebec, Canada

Ralf Möller
Michael Wessel
Technische Universität
Hamburg-Harburg

Bernd Neumann
Universität Hamburg
Fachbereich Informatik

Dezember 2005

Abschlußbericht zum DFG-Projekt
“DLS”
(NE 279/8-1/-2)

Volker Haarslev[†], Ralf Möller[†]
Bernd Neumann[§], Michael Wessel[‡]

[†]Concordia University
1455 de Maisonneuve Blvd. W., Montreal
Quebec H3G 1M8, Canada

[‡]Technische Universität Hamburg-Harburg
Harburger Schloßstr. 20
21079 Hamburg, Germany

[§]Universität Hamburg
Vogt-Kölln-Str. 30
22527 Hamburg, Germany

Zusammenfassung

Im Projekt wurde untersucht, wie die Modellierung räumlicher Konzepte in Beschreibungslogiken integriert werden kann, und zwar auf terminologischer Ebene (in der TBox), für Beschreibungen von Individuen (in der ABox) und auf semantischer Ebene (Modellstrukturen). Die wesentlichen Ergebnisse sind: Auf TBox-Ebene lassen sich räumliche Strukturen bei minimal ausdrucksstarken Beschreibungslogiken kaum sinnvoll integrieren. In dem Projekt wurde trotz dieser Schwierigkeiten (siehe die diversen Unentscheidbarkeitsbeweise) ein 2-Ebenen-Architekturansatz für die Verwaltung von ABoxen entwickelt, der räumlich-thematische Anfragen in wirkungsvoller Weise unterstützt.

In dem Projekt wurde als ein zentraler Bestandteil der Forschungsmethodik die Bereitstellung eines praktisch verwendbaren Systems (Racer) gewählt. Ausgehend von Leitanwendungen wurden Anforderungen an die Architektur eines solchen Systems aufgestellt. Die Anforderungen bestimmen, welche Repräsentationssprachen für ein Spektrum von ähnlichen Anwendungen benötigt werden. Wie in dem Projekt deutlich wurde, kann der Anspruch der adäquaten Problemformulierung dadurch umgesetzt werden, daß ein guter Kompromiß zwischen Ausdrucksstärke der Repräsentationssprachen, Entscheidbarkeit und Verhalten der Implementierung im mittleren Fall gefunden wird. Die Realisierung von Optimierungen auf algorithmischer Ebene, verbunden mit der Bereitstellung in einem Server-basierten System (Racer) hat sich bewährt, bedingt aber einen großen Aufwand. Nachteile der längeren Systementwicklung (im Kontext des Forschungsprojekts) im Vergleich zur direkten Entwicklung eines deduktiven GIS oder der direkten Implementierung eines Bildverstehenssystems werden allerdings durch die Vorteile aufgewogen. Die These, daß die entwickelte Beschreibungslogik-Technologie auch für andere Forschungsprojekte in ganz anderen Anwendungskontexten bedeutsam ist, wird durch die vielen Racer-Nutzer bestärkt. Mit den durch das DLS-Projekt erzielten Ergebnissen kann eine weitere Phase der Nutzung mit neuen Anwendungsperspektiven möglich werden.

1 Ziele des Projektes

Die Ziele des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Forschungsprojekts "DLS" (Description Logics for Spatial Applications, Fördernummer NE 279/8-1 und NE 279/8-2) umfassen die Weiterentwicklung der Theorie und Praxis von Beschreibungslogiken. Die Ziele lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Untersuchung von Sprachkonstrukten zur integrierten konzeptuellen Modellierung von begrifflichen (thematischen) und räumlichen Strukturen
 - auf terminologischer Ebene (TBox),
 - auf Ebene der Aussagen über einzelne Individuen und ihren wechselseitigen Beziehungen (ABox).
 - auf der Ebene der betrachteten Modellstrukturen (Semantik).
2. Grundlagenforschung zur Sicherstellung der praktischen Verwendbarkeit der betrachteten Modellierungskonstrukte durch Entwicklung von Optimierungstechniken für Anfragesprachen für beschreibungslogische Repräsentationssysteme.
3. Nutzbarmachung der praktischen Einsichten für andere Forschergruppen, d.h. Integration von erprobten optimierten Algorithmen und Datenstrukturen in das beschreibungslogische Inferenzsystem Racer [9], das in vielen internationalen Forschungsprojekten als Grundlage dient.

Für alle Inferenzprobleme wird Entscheidbarkeit angestrebt, da davon ausgegangen wird, daß im Zusammenhang einer soliden Informatikarchitektur einfache Inferenzdienste zu höheren kombiniert werden (müssen) und innerhalb der Gesamtarchitektur der Effekt von unvollständigen bzw. nicht terminierenden (also in der Praxis unvollständigen) Basisbausteinen nicht abgeschätzt werden kann. Erfahrungen mit praktischen Anwendungen und dem Racer-System belegen, daß diese These gerechtfertigt ist.

Anwender sollen mit den in dem Projekt bereitgestellten Modellierungsstrukturen und Inferenzverfahren Systeme erstellen können, in denen beispielsweise folgende Arten von Anfragen verarbeitet werden können:

- "Finde alle Wohngebiete, die (jeweils) an einer Grünfläche liegen, welche einen Teich oder See enthält." (Anfragebeispiel 1)
- "Finde alle Wohngebiete, die (jeweils) an einer Grünfläche liegen, welche einen Teich oder See enthält; das Wohngebiet soll zudem an einem Gewerbegebiet liegen (zum Einkaufen)." (Anfragebeispiel 2)

In diesen Beispielen kommen qualitative räumliche Relationen vor, doch auch andere räumliche Aspekte wie z.B. Richtungen oder relative Orientierungen sind in diesem Kontext wichtig und wurden im Projekt untersucht.

Zu beachten ist, daß die hier als Beispiel verwendeten Arten von Anfragen in der Systemarchitektur intern (als Basisbaustein) oder auch extern (als Endbenutzerdienst) verwendet werden können. Im Kontext von Informationssystemen kann allerdings eventuell aus Endbenutzersicht auf Vollständigkeit der Recherche verzichtet werden, die Menge von aus Systemsicht gleichwertigen Antworten (Recall) ist vielleicht bei unpräzisen Anfragen ohnehin schon sehr groß. Es bleibt aber anzumerken, daß i.a. die "restlichen" von vollständigen Verfahren zusätzlich generierten Antworten eventuell besonders "interessante" Lösungen darstellen.

Rechercheanfragen der oben beispielhaft illustrierten Art spielen eine wichtige Rolle in zukünftigen Informationssystemen (siehe die Vision des "Semantic Web") sowie auch Interpretationssystemen (z.B. aus dem Bereich Wissensbasierter Bildverarbeitung). In den im Projekt untersuchten, für diesen Zweck besonders geeigneten beschreibungslogischen Inferenzsystemen wurden bei Projektstart Anfragen dieser Art überlicherweise über den Inferenzdienst "Instanzrecherche" angeboten: Finde alle Individuen aus einer ABox, die Instanz eines gegebenen Konzeptes Q sind. Hierbei wird eine Terminologie (TBox) entsprechend berücksichtigt. Zur Erzielung einer hohen Präzision wiederum ist eine hohe Ausdruckskraft für die Bildung möglicher Recherchekonzepte Q sowie für die Form der referenzierten TBox notwendig.

2 Ausdrucksstarke Sprachkonstrukte, Inferenzdienste und optimierte Inferenzsysteme

In dem Projekt DLS wurden von den Mitarbeitern und Projektleitern zur Erreichung der Ziele Arbeiten in folgenden Bereichen durchgeführt:

- Erhöhung der Ausdrucksstärke der Modellierungssprache auf terminologischer Ebene um räumliche Strukturen,
- Ausdrucksstarke ABox-Anfragesprachen, Regelsysteme, Defaults
- Optimierungstechniken und Architekturmodelle für den Umgang mit praxisgerechten "Datenmengen"

Die Arbeitspunkte stimmen im Wesentlichen mit dem im Projektplan aufgestellten Arbeitsplan überein. Wir fassen die Ergebnisse der Arbeiten im folgenden kurz zusammen. Auf die Untersuchung von Anwendungsszenarien z.B. im Bereich GIS oder Bildverarbeitung wird anschließend im Detail in Kapitel 3 eingegangen.

2.1 Terminologische Ebene

Ein möglicher Ansatz, z.B. qualitative räumliche Relationen (RCC8-Relationen: DisCrete, EQual, Tangential Proper Part, NonTangential Proper Part, External Connected und die entsprechenden Inversen [24]) in Beschreibungslogiken zu integrieren, ist der $\mathcal{ALCRP}(\mathcal{D})$ -Ansatz [7]. Bei diesem als Ausgangspunkt verwendeten Ansatz werden definierte Relationen eingeführt, wobei die Definition mithilfe sogenannter "konkrete Domänen"¹ erfolgt. Für räumliche Repräsentationsanforderungen wäre z.B. eine spezielle konkrete Domäne für RCC-Relationen geeignet definierbar. Bedingt durch die starken Syntaxeinschränkungen für TBox-Axiome zur Erzielung der Entscheidbarkeit ist die praktische Bedeutung von $\mathcal{ALCRP}(\mathcal{D})$ bislang nicht übermäßig hoch. Allerdings stellt $\mathcal{ALCRP}(\mathcal{D})$ einen "generischen" Ansatz dar, d.h. im Beschreibungslogik-Teil wird die Raumsemantik der qualitativen Relationen nicht betrachtet. Untersuchungen zur direkten "hybriden" Integration z.B. von RCC-Relationen in Beschreibungslogiken ohne Syntaxeinschränkungen wurden im DLS-Projekt durchgeführt (Sprache \mathcal{ALC}_{RCC}). Erste Unentscheidbarkeitsbeweise für zunächst mächtigere Sprachen aus dem Projekt [38, 35, 36, 39, 32] motivierten andere Forscher zu einem Unentscheidbarkeitsbeweis für die Sprache \mathcal{ALC}_{RCC} (die Unentscheidbarkeit folgt aus einer aus Sicht der Modallogik entwickelten Arbeit [19]). Entscheidbare Subsprachen sind in [33, 37] aufgezeigt.

Allerdings wurde in dem DLS-Projekt erkannt, daß die räumlichen Zusammenhänge auch bei \mathcal{ALC}_{RCC} nicht in der Semantik der Logik verankert sind. Im Sinne einer adäquaten Raum-Semantik ist in jedem räumlichen Objekt ein weiteres Objekt enthalten (räumliche Objekte sind beliebig teilbar, die Teile müssen existieren). Nun ist die Existenz von Teilen nicht in jedem Fall in der Logik \mathcal{ALC}_{RCC} forciert (nur wenn ein entsprechender Existenzquantor vorgesehen ist, existieren Subregionen). Bedingt durch bekannte Ergebnisse aus dem Bereich der zeitlichen Relationen [15], die für eine Semantik, in der Teile (von Intervallen) immer existieren, ebenfalls Unentscheidbarkeit nachweisen, mußte dieser Forschungszweig als wenig gewinnbringend für praktische Systeme eingestuft werden. Ein Unentscheidbarkeitsbeweis für räumliche Strukturen (z.B. RCC) wurde schließlich, wie schon erläutert, in [19] aufgezeigt.

Motiviert durch die Verwendung von qualitativen räumlichen Relationen wie z.B. RCC-Relationen in GIS-Datenmodellen wurden auch andere räumliche Relationen untersucht. Insbesondere wurden Richtungsangaben wie z.B. nordöstlich, südwestlich usw. (Cardinal Directions, erstmals unter-

¹Konkrete Domänen umfassen eine Grundmenge (Domäne) und eine Menge von Prädikaten. Es muß ein Entscheidungsverfahren für die Erfüllbarkeit von Konjunktionen von Prädikaten existieren. Man spricht von einer *konkreten* Domäne, da bei der Erfüllbarkeit die Existenz konkreter Werte aus der Domäne (z.B. die reellen Zahlen) nachgewiesen wird, die ein gegebenes Prädikat (oder eine Konjunktion von Prädikaten) erfüllen.

sucht von Frank [4]) und Relative Orientierungen wie etwa “rechts von einer gedachten Linie zwischen Lübeck und Berlin” (Freksa [5]) betrachtet. Letztere Konstrukte bedingen die Erweiterung von beschreibungslogischen Sprachen um dreistellige Relationen, da neben dem Referenzobjekt mehr als ein Bezugsobjekt (hier also z.B. Lübeck und Hamburg) benötigt wird. Ein Entscheidungsverfahren für die kombinierte Sprache aus Cardinal Directions-Algebra und Algebra der Relativen Orientierungen wurde im Projekt entwickelt und in [17] skizziert. Die untersuchte Sprache $ACCRP^3(\mathcal{D})$ erweitert bestehende Ansätze aus der Beschreibungslogik ($ACCRP(\mathcal{D})$, siehe den vorigen Absatz) um die Möglichkeit, mehrstellige räumliche Relationen in die Modellierung einbeziehen zu können. Es wurde in dem Projekt festgestellt, daß für die anzustrebende Definition einer kompositionalen Semantik eine Syntax notwendig ist, die sich an die Beschreibungslogik DLR [3] anlehnt. In [18] wurden die erzielten Ergebnisse veröffentlicht. Allerdings ergab sich aus den Arbeiten die Einsicht, daß zur Gewährleistung der Entscheidbarkeit recht schwer verständliche Syntaxeinschränkungen für mögliche TBoxen einzuhalten sind, so daß die Modellierung mit Konstrukten zwar möglich ist, aber in Anwendungen vermutlich kaum Verbreitung finden wird. Daher wurde für $ACCRP^3(\mathcal{D})$ keine Implementierung erstellt.

Als Ergänzung zu dem im vorigen Absatz diskutierten qualitativen Relationen spielen bei der Betrachtung von Raum auch quantitative Konstrukte eine große Rolle. So ist z.B. das Wissen, daß sich ein Fußballspieler im Mittelkreis befindet, mit quantitativen Einschränkungen für seine räumliche Position verbunden. “Die restlichen Spieler im Mittelkreis beim Elfmeterschießen” sollten als Konzept repräsentierbar sein (alle Spieler einer Mannschaft, außer dem Schützen). Die hier aufgeführten Beispiele belegen die Notwendigkeit von nichtlinearen (ggf. multivariaten) Ungleichungen, ein in der Mathematik wohluntersuchtes Thema. In beschreibungslogischen Inferenzsystemen werden Beweiser für externe Repräsentationskonstrukte wie etwa nichtlineare Ungleichungen über konkrete Domänen eingebunden (siehe die obige Diskussion). Eine Zusammenfassung der nicht-trivialen mathematischen Grundlagen einer konkreten Domäne für nichtlineare multivariate Ungleichungen über reelle Zahlen wurde als Bericht im DLS-Projekt erstellt [30]. Für eine Teilklasse der Konstrukte wurde in Racer eine verfügbare Implementierung des sogenannten Buchberger-Algorithmus für Gröbner-Basen integriert (die verwendete Implementation nach [31] ist in [28] beschrieben). Die Implementierung in Racer umfaßt zur Zeit Konstrukte für nichtlineare Gleichungen über komplexe Zahlen (damit läßt sich angenähert so etwas repräsentieren wie “auf dem Mittelkreis oder darüber”). In [30] ist aufgelistet, in welcher Weise die Implementierung zu ergänzen ist, um Ungleichungen über reellen Zahlen (“im Mittelkreis und auf dem Rasen”) zu unterstützen. Mit der Implementierung wurden Arbeiten durchgeführt, die untersuchen, inwieweit bestehende Beschreibungslogiksysteme mit extrem laufzeitintensiven Systemen für nichtlineare (Un-)Gleichungen gekoppelt werden können.

Im Kontext der Modellierung von Raum sind allerdings auch auch lineare Einschränkungen besonders wichtig (z.B. für den Torraum). Obwohl die Algorithmen für lineare Ungleichungen eine geringere Komplexität haben als die oben diskutierten Algorithmen für nichtlineare (multivariate) Ungleichungen, ergaben die Arbeiten in beiden Fällen, daß neuartige Optimierungstechniken für die praxisgerechte Verarbeitung von TBoxen mit konkreten Domänen notwendig waren. Die im Projekt DLS erarbeiteten Techniken zur Optimierung des Schließens mit konkreten Domänen sind in [10] dargestellt (siehe auch [8] für den Umgang mit großen TBoxen). Mit einer Integration in das System Racer werden die Ergebnisse anderen Forschern direkt zu Verfügung gestellt.

Damit fassen wir zusammen: Die Arbeiten im DLS-Projekt zeigen auch ohne Implementierung der letzten Feinheiten im Bereich nichtlinearer multivariater Ungleichungen über den reellen Zahlen, daß sehr ausdrucksstarke quantitative Repräsentationskonstrukte auf terminologischer Ebene aus praktischer Sicht effizient in beschreibungslogische Inferenzsysteme integriert werden können. Auch ausdrucksstarke *quantitative* Repräsentationsformen können bei den in der Praxis verwendete TBoxen effizient unterstützt werden. Die Einsicht der Arbeiten zu *qualitativen* terminologischen Konstrukten ist, daß im Bereich des qualitativen terminologischen Wissens aus Sicht der Einbeziehung der Raumsemantik mit "schwachen" konzeptuellen Datenmodellen gearbeitet werden muß. Es scheint kaum möglich, qualitative räumliche Relationen zu verwenden (und z.B. darüber innerhalb der Beschreibungslogik zu quantifizieren) und dabei die notwendige Axiomatik der Relationen innerhalb des konzeptuellen Schließens mit zu berücksichtigen. Die Modellierung von räumlichen Einschränkungen im Kontext von Beschreibungslogiken ist weiterhin nicht trivial, da diese Repräsentationssysteme auf einer variablenfreien Syntax beruhen. Dieser Umstand macht es nach den Erkenntnissen aus dem DLS-Projekt schwierig, adäquate konzeptuelle Datenmodelle (TBoxen) mit räumlichen Relationen zu erstellen. Konform mit dem Projektplan wurden in dem DLS-Projekt die Untersuchungen auf den Bereich des assertorischen Wissens, der ABoxen, fokussiert. In den betrachteten Anfragesprachen können Variablen verwendet werden, so daß den Anforderungen für räumliche Aspekte besser Genüge getan werden kann. Die Ergebnisse werden im nachfolgenden Abschnitt beleuchtet.

2.2 Assertorische Ebene (ABox-Ebene)

In ABoxen können über assertorische Axiome Aussagen für einzelne Objekte des Universums und deren Beziehungen gemacht werden (die Namen dieser Objekte werden Individuen genannt). In ABoxen können qualitative räumliche Relationen zwischen bestimmten Individuen etabliert werden (z.B. Hamburg und Bremen). Geht man davon aus, daß für die betrachteten Individuen quantitative räumliche Daten gegeben sind, kann man in

einem Vorverarbeitungsschritt die jeweiligen qualitativen Beziehungen (z.B. RCC8-Beziehungen) bestimmen und jedes Individuum mit jedem anderen durch eine genau bestimmte RCC8-Relation verbinden.

In einer ABox werden jedoch nur ein endliche Menge von Objekten des Universums durch Individuen benannt. Mit einer TBox kann die Existenz weiterer Objekte gefordert werden, die aber in der ABox – aus welchen Gründen auch immer – keinen Namen bekommen haben. Diese “anonymen” Objekte, die auch existieren müssen, sind aber bei dem oben beschriebenen Prozeß der Verbindung von jedem Individuum mit jedem anderen Individuum nicht betrachtet worden. Bei klassischen konzeptbasierten Anfragen (instance retrieval) führt dieses zur Unvollständigkeit (die anonymen Objekte sind offensichtlich nicht vollständig mit den Individuen “vermascht”).

Wie im vorigen Abschnitt erläutert, ergaben die Arbeiten während des DLS-Projekts, daß die Ausdruckskraft auf Konzept- und TBox-Ebene bezüglich einer “starken” Raumsemantik begrenzt bleiben muß, um Entscheidbarkeit zu gewährleisten. Weiterhin fehlt aufgrund der variablenfreien Syntax die Möglichkeit, bestimmte Anfragen adäquat zu formulieren. Standard-Instance-Retrieval-Anfragen haben also, im Kontext von räumlichen Relationen, kein übermäßig großes Anwendungspotential. Im DLS-Projekt haben wir nach anderen Lösungen gesucht.

Nun sollen in einer Recherche-Anfragesprache räumliche und terminologische Aspekte kombiniert werden. Im Gegensatz zu klassischen Retrieval-Sprachen für Beschreibungslogiken, die auf Konzepttermen basieren (siehe z.B. [9]) und eine hohe Ausdruckskraft für die Konzeptbildungssprache erfordern, wurde im DLS-Projekt eine ABox-Anfragesprache untersucht (angelehnt an “Conjunctive Queries”), die auch Variablen beinhaltet, um eine adäquate Ausdrucksstärke zu erzielen. Die Anfragesprache (nRQL, new Racer Query Language) wurde so definiert, daß nur in der ABox erwähnte Objekte (Individuen) in der Lösungsmenge auftreten sollen (active domain semantics). Die Semantik der Sprache wurde in [12, 14] vorgestellt. Letztere Veröffentlichung zeigt auch weitere Anwendungsgebiete auf, auf wir hier nicht näher eingehen können. Inspiriert wurde die Anfragesprache auch durch die mit dem System Loom [20] untersuchte Anfragesprache, die bei Anwendern sehr geschätzt wurde. Allerdings wurde für die Anfragesprache von Racer eine formale Semantik definiert, die Algorithmen zur Anfragebeantwortung sind bezüglich der definierten Semantik vollständig. Die Integration von Relationen mit RCC8-Semantik in Racer darf als neu eingestuft werden.

Die zentralen Ideen der entwickelten Anfragesprache lassen sich durch Betrachtung der eingangs erwähnten Leitbeispiele vermitteln. Das Anfragebeispiel 1 aus der Einleitung läßt sich in nRQL wie folgt repräsentieren.

```
(retrieve (?x ?y ?z)
  (and (?x wohngebiet)
```

```
(?x ?y ec)
(?y gruenflaeche)
(?y ?z ppi)
(?z (or teich see)))
```

Als Ergebnis wird eine Menge von Variablenbindungen für die im Kopf aufgeführten Variablen geliefert (weitere Variablen im Rumpf gelten als existenzquantifiziert). Die Ergänzung um die Anforderungen mit dem angrenzenden Gewerbegebiet lassen sich wie folgt hinzufügen.

```
(retrieve (?x ?y ?z ?u)
  (and (?x wohngebiet)
    (?x ?y ec)
    (?y gruenflaeche)
    (?y ?z ppi)
    (?z (or teich see))
    (?x ?u ec)
    (?u gewerbe))))
```

Selbstverständlich können in Anfragen auch Konzeptterme verwendet werden, es müssen nicht nur Namen verwendet werden. Wir sehen hier ein Beispiel, in dem über die Relation *EC* quantifiziert wird. Offensichtlich können in Konzepten auch Negationen verwendet werden.

```
(retrieve (?wohngebiet ?gebaeude ?kirche ?u-bahn-station ?teich)
  (and (?wohngebiet wohngebiet)
    (?wohngebiet (ALL EC (not (or industrie gewerbe))))
    (?wohngebiet ?gebaeude contains)
    (?gebaeude gebaeude)
    (*?kirche *?wohngebiet (inside-epsilon 200))
    (?u-bahn-station u-bahn-station)
    (*?u-bahn-station *?wohngebiet (inside-epsilon 100))
    (?wohngebiet ?teich contains)
    (?teich (or teich see))
    (?kirche kirche)))
```

Es sei hervorgehoben, daß bei der Anfragebeantwortung die Axiome der TBox berücksichtigt werden, bei der Anfragebeantwortung wird also das konzeptuelle Datenmodell verwendet. Wir gehen aber davon aus, daß RCC-Relationen nicht in den TBox-Axiomen auftreten. Die TBox repräsentiert also thematisches, nicht aber räumliches Wissen. Anfragebeantwortung muß trotz Active Domain Semantik aufgrund der TBox durch Deduktion erfolgen und kann nicht wie bei Datenbanken durch Model-Checking gelöst werden. Für Details zu nRQL verweisen wir auf die umfangreiche und ausführliche nRQL-Spezifikation, die anderen Forschergruppen zugänglich gemacht wird

[13]. Hervorzuheben ist noch, daß auch eine Negation as Failure-Semantik für Negationen unterstützt wird, da dieses in vielen Anwendungsszenarien gewünscht wird.

In den betrachteten Anwendungskontexten (z.B. deduktive GIS) sind die Mengen von ABox-Assertionen nicht unerheblich groß. Optimierungstechniken für sogenannte Conjunctive Queries (mit active domain semantics) wurden aus dem Datenbankbereich erarbeitet, implementiert, getestet und innerhalb von Racer der Forschungsgemeinde zur Verfügung gestellt, siehe [12] für eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Die Strategien zur Beantwortung von Conjunctive Queries führen das Problem auf die oben beschriebenen "einfachen" Standard-Rechercheanfragen zurück (konzeptbasierte Rechercheanfragen). Neue, verbesserte Optimierungstechniken für konzeptbasierte Anfragen (u.a. durch Ausnutzung von Query-Subsumption) wurden für den Umgang mit praxisgerechten ABoxen daher ebenfalls in dem DLS-Projekt entwickelt. Die Ergebnisse sind in [11] veröffentlicht.

Die Explizitmachung der räumlichen Beziehungen durch "Vorverarbeitung" und Etablierung von Relationen zwischen jedem möglichen Objekt, wie wir sie oben skizziert haben, beinhaltet allerdings auch einige Nachteile. Bedingt durch die notwendige Kombinatorik kommt es zu einem quadratischen Anwachsen der Relationenassertionen in einer ABox (schon in kleinen Karten kommen schnell mehr als 100000 Objekte vor). Dieses stellt für aktuelle Beschreibungslogik-Systeme eine große Hürde dar. Man muß auch bedenken, daß für jede ABox noch eine TBox hinzukommt, die die Menge der Formeln der Theorie noch erheblich vergrößert.

Ein Vergleich mit einem Datenbanksystem illustriert, inwiefern ABox-Beweiser aufwendigere Verfahren beinhalten. Eine Datenbankinstanz kann angesehen werden als eine endliche (logische) Modellstruktur, die die Integritätsbedingungen aus dem konzeptuellen Datenmodell erfüllt. Anfragebeantwortung bedeutet nun, daß ohne Zugriff auf das konzeptuelle Datenmodell nach Elementen der (endlichen) Grundmenge der Modellstruktur gesucht wird, die eine gegebenen Formel erfüllen. Wichtig ist die Einsicht, daß hierbei das Datenmodell unter bestimmten Umständen nicht verwendet zu werden braucht: Es handelt sich um ein Model-Checking-Problem, das eine geringere Komplexität aufweist. In dem Projekt wurde der Frage nachgegangen, ob sich eine ähnliche Problemreduktion auch im Kontext der Anfragebeantwortung mit ABoxen erreichen läßt.

2.3 Modellstrukturebene: 2-Ebenen-Ansatz

Die in einer ABox explizit gegebenen Assertionen definieren, was allen Modellstrukturen (also den semantischen Strukturen, die die Einschränkungen durch TBox und ABox erfüllen) gemeinsam ist (modulo Umbenennung der Objekte für die die Individuen in der ABox stehen). Die Assertionen einer ABox lassen sich also als eine partielle Modellstruktur deuten. Nehmen wir

an, wir machen diese wiederum explizit und repräsentieren sie als Datenstruktur. Es entstehen also zwei Ebenen, die Ebene der (partiellen) Modellstruktur (Ebene-1) und die Ebene der ABox (Ebene-2). Auf beiden Ebenen lassen sich die Informationen als Graphstrukturen deuten. Jeder "Knoten" auf Ebene-1 korrespondiert eineindeutig mit einem ganz bestimmten Knoten auf Ebene 2.

Die zentrale Idee besteht nun darin, bei der Anfragebeantwortung eine Vorfilterung der möglichen Variablenbindungen über klassische Datenbanktechniken durchzuführen. Insbesondere nehmen wir an, daß auf Ebene-1, also auf der Modellstrukturebene, nun die RCC-Relationen vermerkt sind (nicht jedoch auf Ebene-2, also in der ABox, auftreten).

Eine kleine Erweiterung für die Anfragesprache ermöglicht den "Wechsel auf die Ebene der Modellstrukturfilterung" (Ebene-1). Variablenreferenzen für die Ebene-1 werden mit einem Stern gekennzeichnet.

```
(retrieve (?x ?y ?z)
  (and (?x wohngebiet)
    (*?x *?y ec)
    (?y gruenflaeche)
    (*?y *?z ppi)
    (?z (or teich see)))
```

Entsprechende, in dem Projekt entwickelte Datenstrukturen für die Ebene-1 (hier RCC-Ebene), ermöglichen akzeptable Antwortzeiten. Weitere Optimierungen (siehe z.B. auch [26]) sind noch möglich, haben sich aber für die betrachteten Leitbeispiele (siehe Kapitel 3) nicht als notwendig erwiesen.

In der ABox brauchen nun die RCC-Relationen nicht repräsentiert zu werden, da in der TBox solche Relationen nicht verwendet werden (siehe die oben diskutierten Entscheidungsfragen). Es reicht, die Informationen als Modellstruktur zu speichern. Damit kann das Problem der quadratischen Zunahme von ABox-Assertionen vermieden werden, ohne praktische Nachteile hinnehmen zu müssen. Für die Anfrageevaluierung reicht zum Teil Model-Checking aus, zum Teil wird auf ABox-Schließen "umgeschaltet". Es wurde also im DLS-Projekt eine semantisch sauber begründete Integration von Datenbanktechniken und beschreibungslogischen Deduktionstechniken untersucht. Die Entwicklung eines GIS-Demonstrators zeigte die praktische Bedeutung dieses Ansatzes. Details werden in der aus dem Projekt DLS entstehenden Dissertation von Michael Wessel erläutert.

3 Anwendungsszenarien

Zur Untersuchung des Verhaltens von Algorithmen und Optimierungstechniken im mittleren Fall (average case) und zur Überprüfung der Adäquatheit der Ausdrucksstärke der entwickelten Sprachkonstrukte wurden zwei

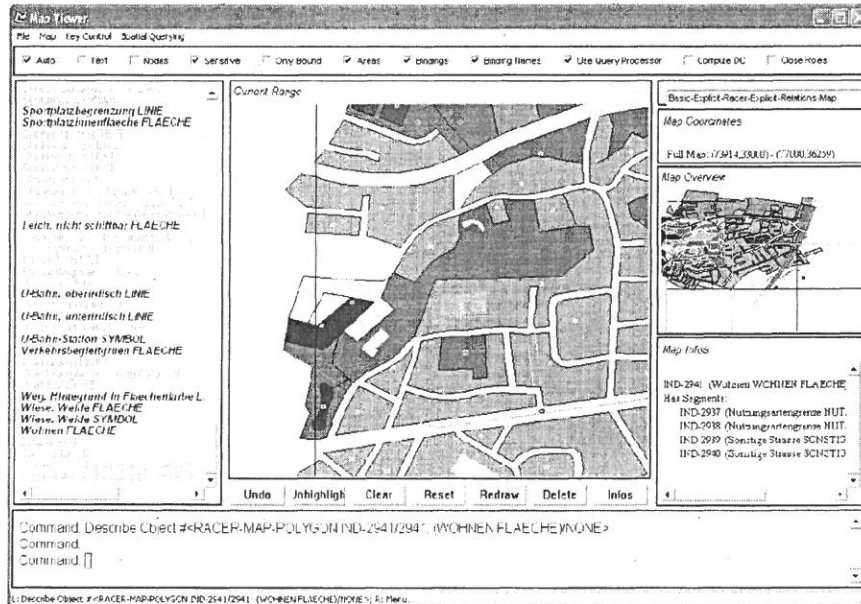


Abbildung 1: Darstellung der zugrundeliegenden Kartendaten mit dem im Projekt entwickelten Werkzeug "MapView".

Anwendungsszenarien untersucht: deduktive geographische Informationssysteme und Systeme zum wissensbasierten Bildverstehen.

3.1 Deduktive geographische Informationssysteme

In einer ersten Fallstudie wurde untersucht, wie die im Projekt entwickelten Komponenten vorteilhaft in einem deduktiven geographischen Informationssystem zum Einsatz kommen können (vgl. [34]). Eine mögliche Anfragebeantwortung in einem solchen System fußt sowohl auf terminologischer Information als auch auf räumlich-qualitativer bzw. auch räumlich-quantitativer Information. In dem Informationssystem sollen die in der Einleitung betrachteten Beispielanfragen auf repräsentativen Beispieldaten beantwortet werden können.

Aus einem früheren Projekt wurden quantitative Kartendaten aus einem nicht zu kleinen Ausschnitt aus dem Hamburger Stadtgebiet bereitgestellt (Polygondaten mit einfacher Klassifikation). In Abbildung 1 ist ein Unterabschnitt der Kartendaten in einer graphischen Oberfläche visualisiert. Um die in der gegebenen Klassifikation verwendeten Begriffe zueinander in Beziehung zu setzen, wurde eine TBox entwickelt (Abbildung 2). In einem Vorverarbeitungsschritt wurden nun die Polygondaten in qualitative topo-

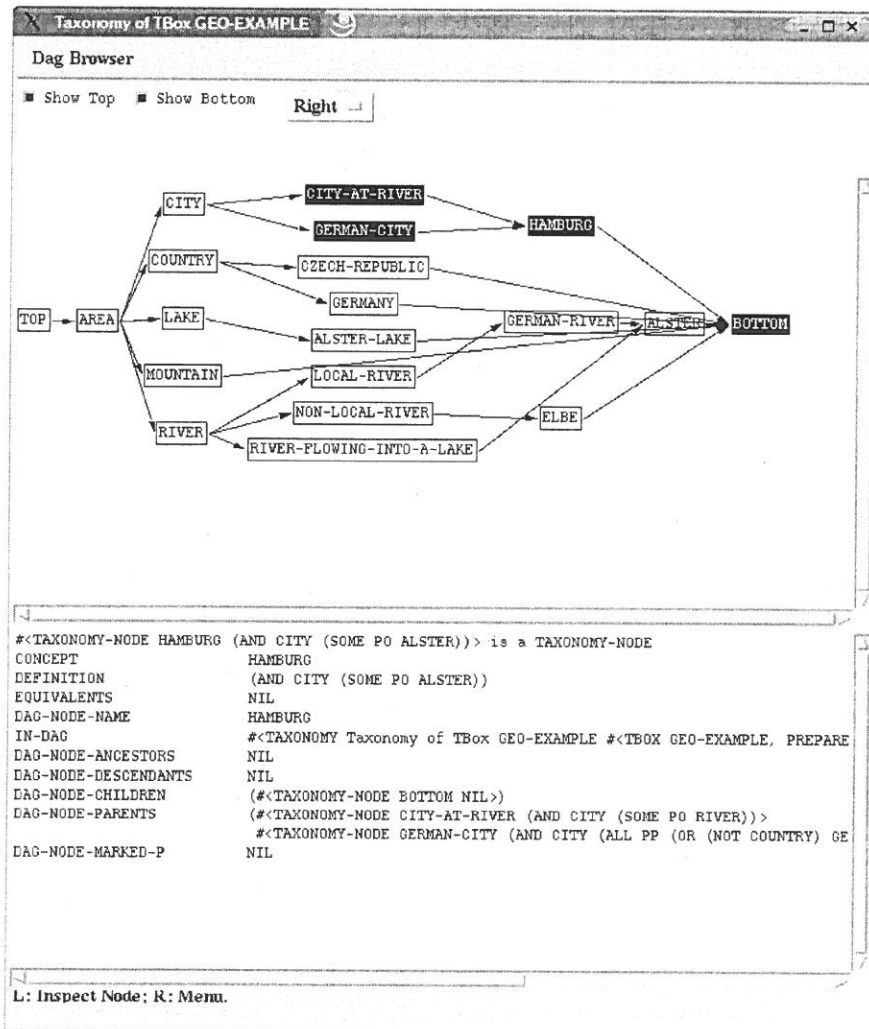


Abbildung 2: Darstellung des in dem Anwendungsszenario beispielhaft verwendeten terminologischen Modells in einem kontextspezifischen Entwicklungswerkzeug.

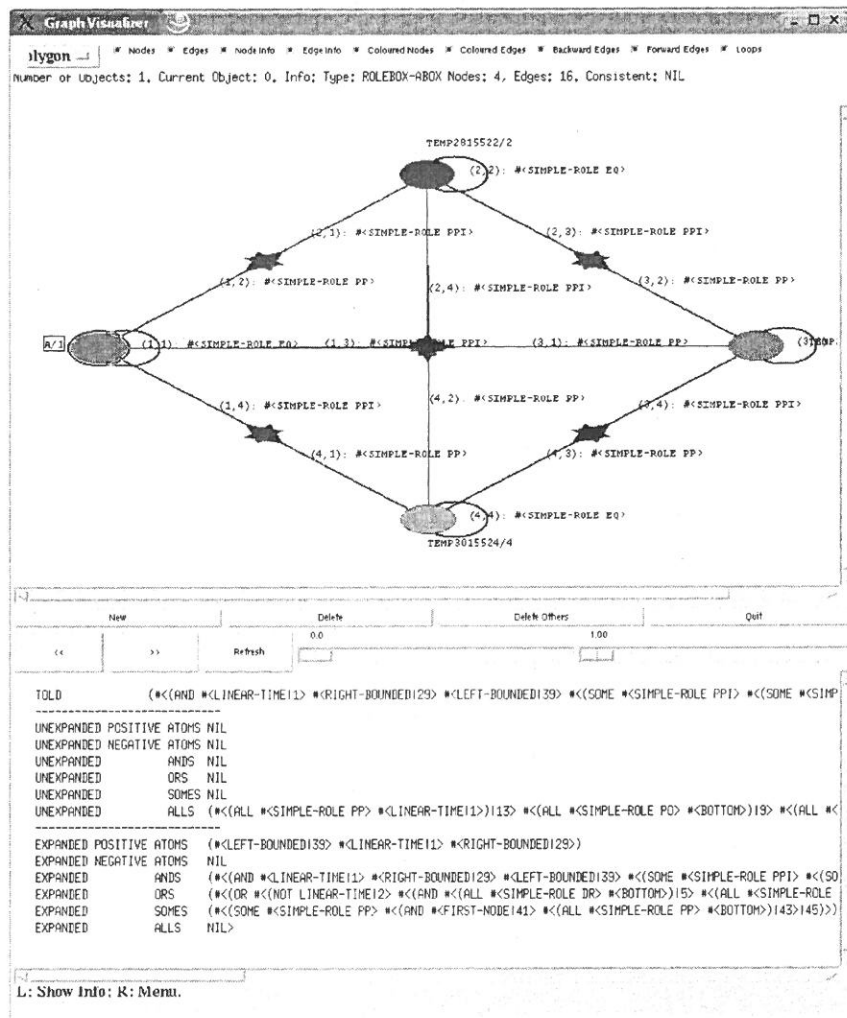


Abbildung 3: Darstellung eines Ebene-1-Netzes mit RCC-Relationen. Das Entwicklungswerkzeug wurde zur effizienten Systementwicklung im DLS-Projekt entwickelt

logische Beziehungen umgewandelt (RCC8, siehe Abbildung 3). Diese qualitativen RCC-Informationen wurden in einer Ebene-1-Datenstruktur (siehe oben) in Racer repräsentiert. Die aus den Kartendaten zu entnehmenden Klassifikationseintragungen wurden in Form einer ABox repräsentiert. Die ABox (Ebene-2) wurde mit der RCC-Struktur assoziiert (Ebene-1).

Die oben beschriebene Anfragesprache ermöglicht die adäquate Formalisierung der betrachteten Beispielanfragen. Für mögliche Bindungen für Variablen wurde für den Demonstrator ebenfalls ein Visualisierungswerkzeug entwickelt. Abbildung 4 zeigt verschiedene Anfrageergebnisse für räumlich-thematischen Anfragen graphisch an.

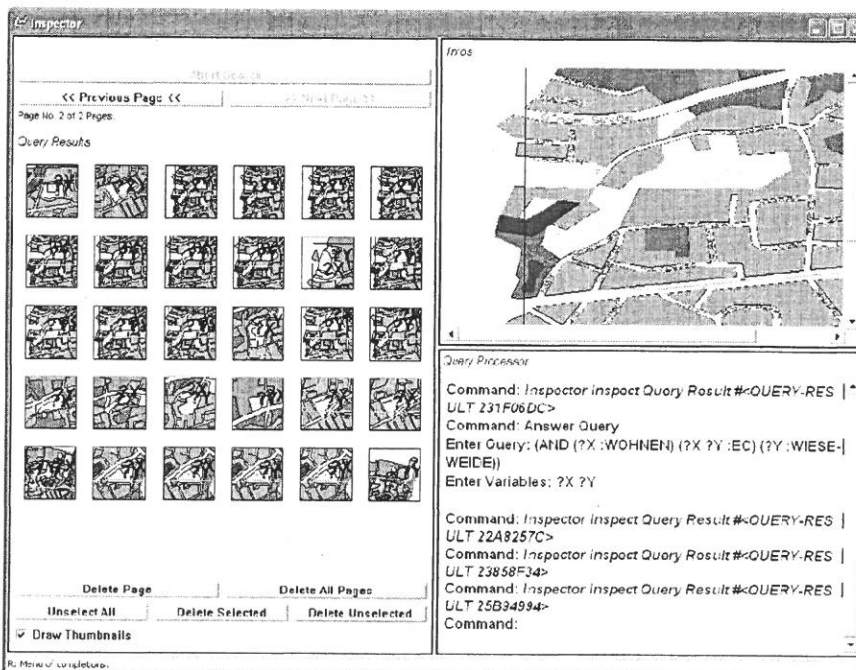


Abbildung 4: Visualisierung von Anfrageergebnissen (gelb) in einem entwickelten Anfragewerkzeug.

Der Demonstrator ermöglichte folgende Einsichten:

- Die Beantwortung der hier betrachteten Anfragen muß auf einer effizienten deduktiven Verarbeitung der qualitativen Relationen erfolgen. Erst mit der Zwei-Ebenen-Architektur konnte eine performante Anfragebeantwortung (im Millisekundenbereich) realisiert werden.
- Optimierungstechniken für die Anfragesprache nRQL (conjunctive queries) wurden aus dem Bereich der Datenbanken in den Bereich der Be-

schreibungslogiken übertragen und sind notwendig, um im mittleren Fall adäquate Beantwortungszeiten zu erreichen.

- Der Nachteil der Zwei-Ebenen-Architektur, daß räumliche Relationen in der TBox nicht verwendet werden, sondern nur in der Anfragesprache zum Einsatz kommen, ist in praktischen Anwendungen relativ unbedeutend.
- Das Zusammenwirken von räumlicher und thematischer (terminologischer) Information kann mit der bestehenden Architektur über Dienstleistungen des Systems Racer in für Anwendungen vorteilhafter Weise bereitgestellt werden.

3.2 Deduktive bildverstehende Systeme

Räumlich-thematische Information ist auch in bildverstehenden Systemen von zentraler Bedeutung. Die Notwendigkeit der Verwendung von Hintergrundwissen ergibt sich insbesondere dadurch, daß beim Bildverstehen erwartet wird, daß (auch) Repräsentationen über abstrakte Inhalte aufgebaut werden, die sich nicht direkt durch visuelle Effekte im Bildmaterial zeigen. In einer Fallstudie wurde untersucht, ob die entwickelten Werkzeuge zum Aufbau eines solchen Systems grundsätzlich verwendet werden können, d.h., ob Racer, erweitert um die Ergebnisse aus dem Projekt, eine adäquate Formulierung der Anwendungsprobleme im Kontext eines deduktiven bildverstehenden Systems erlaubt. Die Antwort kann schon vorweggenommen werden: Mit dem im Projekt entwickelten Erweiterungen können bildverstehende Systeme auf der Grundlage von Beschreibungslogiken aufgebaut werden.

In Anlehnung an frühe Arbeiten zur logikbasierten Deutung des Bildverstehens (Marschall, [25]) wird das Ergebnis des Verstehensprozesses grundsätzlich als ein Modell im logischen Sinne verstanden (image understanding as model construction). Angeregt durch Arbeiten zur logikbasierten Konfiguration (configuration as model construction [1, 2]) könnte man nun den Ansatz verfolgen, das Modell für das Ergebnis des Bildverstehensprozesses durch den Racer-Tableaux-Beweiser zu ermitteln. Allerdings besteht keine Garantie, daß das im Tableaux-Beweiser zur Feststellung der Erfüllbarkeit einer ABox verwendete Modell ein "intendiertes" Modell darstellt, handelt es sich doch um ein internes (kanonisches) Modell, daß zur effizienten Berechnung gewählt wird und nicht um ein Modell, das aus Anwendungssicht bedeutsam ist. Im Gegensatz zu bestehenden Arbeiten (z.B. [29]) wird es weiterhin als nicht praxistauglich verstanden, ein logisches Modell vollständig spezifiziert als Ergebnis des Verstehensprozesses abzuliefern (die Gefahr einer "Überinterpretation" ist immanent gegeben). Stattdessen wird in dem im Projekt verfolgten Ansatz ein sog. Kernmodell als Interpretationsergebnis geliefert. Die Idee ist, daß irrelevante Details in dem Kernmodell offen bleiben können. Dabei hängt es von der jeweiligen Aufgabenstellung ab, was als "relevant"

gilt. Eine Formalisierung dieses Aspektes geht zur Zeit über den Stand der Forschung hinaus. Das Kernmodell kann also ggf. auf verschiedene Weisen zu einem vollständigen Modell "erweitert" werden. Dieses Kernmodell wird als ABox repräsentiert. Der ABox-Konsistenztest stellt sicher, daß sich das Kernmodell gemäß der ABox- und TBox-Axiome zu einem vollständigen Modell erweitern läßt.

Um das als ABox repräsentierte Kernmodell des Bildverstehensprozesses zu erweitern, wurden verschiedene "Konstruktionsoperatoren" definiert: Aggregateerzeugung, Aggregateinstantiierung, Instanzenspezialisierung und Instanzenverschmelzung (für Details siehe [23, 21]). Die Operatoren sind als abduktiv zu verstehen; es werden Assertionen zur ABox hinzugefügt. Da die Operatoren nicht-deterministisch sind, ergibt sich für das Ergebnis des Verstehensprozesses ein Konstruktionsraum, der die möglichen "Halluzinationen" beschreibt.

Für die Konstruktionsoperatoren spielt das Hintergrundwissen, repräsentiert als TBox, eine besondere Rolle (vgl. auch [27]). Wie wir in dem DLS-Projekt gesehen haben, muß aber die Ausdruckstärke der TBox beschränkt bleiben. Wie allerdings in [22] aufgezeigt, kann die limitierte Ausdruckstärke der TBox durch eine ausdrucksstarke Anfragesprache mit entsprechender Semantik (nRQL) ausgeglichen werden. Zu beachten ist, daß in dem in [22] aufgezeigten Ansatz, im Gegensatz etwa zu den in diesem Kontext relevanten Vorgängerarbeiten in [27], die Entscheidbarkeit der Inferenzprobleme sichergestellt ist. In der Racer-Anfragesprache nRQL sind aufgrund der speziellen Semantik bestimmte Konstrukte, die in der TBox zur Unentscheidbarkeit führen (feature chains, role-value maps), sehr wohl möglich.

Um die Suche im Konstruktionsraum zu beschränken und eine zielgerichtete Lenkung des Interpretationsergebnisses zu erlauben, wurden weitere Wissensquellen mit probabilistischen Ansätzen integriert (für eine erste Beschreibung siehe [22]).

Das im DLS-Projekt entwickelte und in Racer integrierte Regelsystem bietet auf Basis der Anfragesprache die Möglichkeit, z.B. Aggregate auf dem Beschreibungslogik-Server zu finden und dort abduktiv zu instantiieren (siehe die oben erwähnten Konstruktionsoperatoren). Die Architektur folgt also den altbewährten Datenbank-Grundsätzen nicht die Daten zu transferieren, sondern die Anfragen (bzw. Regeln). Mit diesen technischen Möglichkeiten lassen sich offensichtlich mögliche Kommunikationsengpässe in der Systemarchitektur vermeiden.

4 Zusammenfassung

Die im Arbeitsplan aufgestellten Arbeitspunkte wurden in dem Projekt bearbeitet, wenn auch zum Teil mit unterschiedlicher Tiefe. Die wesentlichen Ergebnisse sind: Auf TBox-Ebene lassen sich räumliche Strukturen bei mi-

nimal ausdrucksstarken Beschreibungslogiken kaum sinnvoll integrieren. In dem Projekt wurde trotz dieser Schwierigkeiten (siehe die diversen Unentscheidbarkeitsbeweise) ein 2-Ebenen-Architekturansatz für die Verwaltung von ABoxen entwickelt, der räumlich-thematische Anfragen in wirkungsvoller Weise unterstützt. Die in den Zielen aus der Einleitung genannten Anforderungen für Systeme, die mit den Erkenntnissen des Projektes möglich werden, dürfen als erfüllt eingestuft werden. Entsprechende Veröffentlichungen wurden in diesem Aufsatz aufgeführt. Das Projekt hat wesentliche Erkenntnisse erbracht, neue Wege wurden aufgezeigt.

Als wesentlicher Punkt sollte auch die Verbreitung der praktischen Ergebnisse durch sorgfältige Integration von Erkenntnissen aus dem Projekt in das international vielfach eingesetzte Beschreibungslogik-Inferenzsystem Racer hervorgehoben werden. Mit einer aufwendigen Darstellung der Systemfunktionalitäten (APIs) wurde sichergestellt, daß die Ergebnisse der in diesem Projekt erfolgten Grundlagenforschung auch über das einzelne Projekt hinaus direkt in praktische Anwendungen eingesetzt werden können. Weitere Teile des im Projekt DLS erstellten GIS-Demonstrators (z.B. die Programmteile zur Verarbeitung von quantitativen Kartendaten) können in der Zukunft noch gewinnbringend in Racer integriert werden.

In dem Projekt wurde als ein zentraler Bestandteil der Forschungsmethodik die Bereitstellung eines praktisch verwendbaren Systems (Racer) gewählt. Ausgehend von Leitanwendungen wurden Anforderungen an die Architektur eines solchen Systems aufgestellt. Die Anforderungen bestimmen, welche Repräsentationssprachen für ein Spektrum von ähnlichen Anwendungen benötigt werden. Wie in dem Projekt deutlich wurde, kann der Anspruch der adäquaten Problemformulierung dadurch umgesetzt werden, daß ein guter Kompromiß zwischen Ausdrucksstärke der Repräsentationssprachen, Entscheidbarkeit und Verhalten der Implementierung im mittleren Fall gefunden wird. Die Realisierung von Optimierungen auf algorithmischer Ebene, verbunden mit der Bereitstellung in einem Server-basierten System (Racer) hat sich bewährt, bedingt aber einen großen Aufwand. Nachteile der längeren Systementwicklung (im Kontext des Forschungsprojekts) im Vergleich zur direkten Entwicklung eines deduktiven GIS oder der direkten Implementierung eines Bildverstehenssystems werden allerdings durch die Vorteile aufgewogen. Die These, daß die entwickelte Beschreibungslogik-Technologie auch für andere Forschungsprojekte in ganz anderen Anwendungskontexten bedeutsam ist, wird durch die vielen Racer-Nutzer bestärkt. Mit den durch das DLS-Projekt erzielten Ergebnissen kann eine weitere Phase der Nutzung mit neuen Anwendungsperspektiven möglich werden.

Literatur

- [1] M. Buchheit, R. Klein, and W. Nutt. Configuration as model construction: The constructive problem solving approach. In F. Sudweeks and J. Gero, editors, *Proc. 4th International Conference on Artificial Intelligence in Design, Lausanne (Switzerland)*. Kluwer, Dordrecht, 1994.
- [2] M. Buchheit, R. Klein, and W. Nutt. Constructive problem solving: A model construction approach towards configuration. Technical Report DFKI-TM-95-01, German Center for AI (DFKI), 1995.
- [3] D. Calvanese, G. De Giacomo, M. Lenzerini, D. Nardi, and R. Rosati. Description logic framework for information integration. In *Proc. of the 6th Int. Conf. on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'98)*, pages 2–13, 1998.
- [4] A. U. Frank. Qualitative spatial reasoning with cardinal directions. In *Proc. of the Austrian Conference on Artificial Intelligence*, pages 157–167, 1991.
- [5] C. Freksa. Using orientation information for qualitative spatial reasoning. In A. U. Frank, I. Campari, and U. Formentini, editors, *Proc. of the International Conference on Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*, Berlin, 1992. Springer Verlag.
- [6] R. Goré, A. Leitsch, and T. Nipkow, editors. *Proceedings of the International Joint Conference on Automated Reasoning, IJCAR'2001, June 18-23, 2001, Siena, Italy*, Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, June 2001.
- [7] V. Haarslev, C. Lutz, and R. Möller. A description logic with concrete domains and a role-forming predicate operator. *Journal of Logic and Computation*, 9:351–384, 1999.
- [8] V. Haarslev and R. Möller. High performance reasoning with very large knowledge bases: A practical case study. In B. Nebel, editor, *Proceedings of the Seventeenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI-01, August 4-10, 2001, Seattle, Washington, USA*, pages 161–166, August 2001.
- [9] V. Haarslev and R. Möller. RACER system description. In Goré et al. [6], pages 701–705.
- [10] V. Haarslev and R. Möller. Practical reasoning in RACER with a concrete domain for linear inequations. In Horrocks and Tessaris [16], pages 91–98.

- [11] V. Haarslev and R. Möller. Optimization techniques for retrieving resources described in owl/rdf documents: First results. In *Proc. of the 9th Int. Conf. on the Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'04, Whistler, BC, Canada, June 2-5)*, pages 163–173, 2004.
- [12] V. Haarslev, R. Möller, and M. Wessel. Querying the semantic web with racer + nRQL. In V. Haarslev, C. Lutz, R. Möller, and S. Bechhofer, editors, *Proceedings of the International Workshop on Applications of Description Logics (ADL'2004), September 24, 2004, Ulm, Germany*, September 2004.
- [13] V. Haarslev, M. Wessel, and R. Möller. *The New Racer Query Language - nRQL*, 2004.
- [14] Volker Haarslev, Ralf Möller, Ragnhild Van Der Straeten, and Michael Wessel. Extended Query Facilities for Racer and an Application to Software-Engineering Problems. In Volker Haarslev and Ralf Möller, editors, *Proceedings of the International Workshop on Description Logics 2004 (DL2004)*, number 104 in CEUR-WS, pages 156–163, Whistler, British Columbia, Canada, June 6 – 8 2004. Proceedings online available from <http://SunSITE.Informatik.RWTH-Aachen.DE/Publications/CEUR-WS/Vol1-104/>.
- [15] J.Y. Halpern and Y. Shoham. A propositional model logic of time intervals. *Journal of the Association of Computing Machinery*, 38(4):935–962, 1991.
- [16] I. Horrocks and S. Tessaris, editors. *Proceedings of the International Workshop on Description Logics (DL'2002), Apr. 19-21, 2002, Toulouse, France*, April 2002.
- [17] A. Isli, V. Haarslev, and R. Möller. Combining cardinal direction relations and relative orientation relations in qualitative spatial reasoning. Memo FBI-HH-M-304/01, University of Hamburg, Computer Science Department, 2001.
- [18] A. Kaplunova, V. Haarslev, and R. Möller. Adding ternary complex roles to $\mathcal{ALCCRP}(\mathcal{D})$. In Horrocks and Tessaris [16], pages 45–52.
- [19] C. Lutz and F. Wolter. Modal logics of topological relations. In *Proceedings of Advances in Modal Logics 2004*, 2004.
- [20] R.M. MacGregor. The evolving technology of classification-based knowledge representation systems. In J.F. Sowa, editor, *Principles of Semantic Networks: Explorations in the Representation of Knowledge*, pages 385–400. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, 1991.

- [21] B. Neumann and R. Möller. On scene interpretation with description logics. Technical report FBI-HH-B-257/4, University of Hamburg, Computer Science Department, 2004.
- [22] B. Neumann and R. Möller. On scene interpretation with description logics. In H.H. Nagel, editor, *Cognitive Vision Systems*. Springer, 2005. to be published.
- [23] B. Neumann and T. Weiss. Navigating through logic-based scene models for high-level scene interpretations. In J.L. Crowley, J.H. Piater, M. Vincze, and L. Paletta, editors, *3rd International Conference on Computer Vision Systems - ICVS 2003*, volume 2626 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 212–222, Graz, Austria, 1-3 April 2003. Springer-Verlag, Berlin · Heidelberg.
- [24] D.A. Randell, Z. Cui, and A.G. Cohn. A spatial logic based on regions and connections. In *Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pages 165–176, 1992.
- [25] R. Reiter and A.K. Mackworth. A logical framework for depiction and image interpretation. *Artificial Intelligence*, 41:125–155, 1989.
- [26] J. Renz and B. Nebel. Efficient methods for qualitative spatial reasoning. In *Proceedings of the 13th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'98)*, pages 562–566, aug 1998.
- [27] T.A. Russ, R.M. MacGregor, B. Salemi, K. Price, and R. Nevatia. Veil: Combining semantic knowledge with image understanding. In *Proc. ARPA Image Understanding Workshop*, 1996.
- [28] M. Rychlik. Complexity and applications of parametric algorithms of computational algebraic geometry. In *R. del la Llave, L. Petzold, and J. Lorenz, editors, Dynamics of Algorithms, volume 118 of The IMA Volumes in Mathematics and its Applications*. Springer Verlag, 2000.
- [29] C. Schöder. *Bildinterpretation durch Modellkonstruktion: Eine Theorie zur rechnergestützten Interpretation von Bildern*. PhD thesis, Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, 1999. Infix-Verlag, Reihe DISKI 196.
- [30] C. Schultz and R. Möller. Quantifier elimination over real closed fields and applications to description logics. Memo FBI-HH-M-XXX/05, University of Hamburg, Computer Science Department, 2005.
- [31] V. Weispfenning. Comprehensive groebner bases. *Journal of Symbolic Computation*, 14:1–29, 1992.

- [32] M. Wessel. Obstacles on the way to qualitative spatial reasoning with description logics: Some undecidability results. In D.L. McGuinness and P. Patel-Schneider, editors, *Proceedings of the International Workshop on Description Logics (DL'2001)*, Aug. 1-3, 2001, Stanford, CA, USA, August 2001.
- [33] M. Wessel. On Spatial Reasoning with Description Logics - Position Paper. In Horrocks and Tessaris [16], pages 156–163.
- [34] M. Wessel. Some Practical Issues in Building a Hybrid Deductive Geographic Information System with a DL Component. In Francois Bry, Carsten Lutz, Ulrike Sattler, and Mareike Schoop, editors, *Proceedings of the 10th International Workshop on Knowledge Representation meets Databases (KRDB2003)*, number 79 in CEUR-WS, Ulm, Germany, September 15 – 16 2003.
- [35] M. Wessel. Decidable and Undecidable Extensions of \mathcal{ALC} with Composition-based Role Inclusion Axioms. Technical Report FBI-HH-M-301/01, University of Hamburg, Computer Science Department, December 2000.
- [36] M. Wessel. Undecidability of $\mathcal{ALC}_{\mathcal{RA}}$. Technical Report FBI-HH-M-302/01, University of Hamburg, Computer Science Department, March 2001.
- [37] M. Wessel. Qualitative Spatial Reasoning with the \mathcal{ALCT}_{RCC} family – First Results and Unanswered Questions. Technical Report FBI-HH-M-324/03, University of Hamburg, Computer Science Department, May 2003.
- [38] M. Wessel. Obstacles on the Way to Spatial Reasoning with Description Logics – Undecidability of $\mathcal{ALC}_{\mathcal{RAE}}$. Technical Report FBI-HH-M-297/00, University of Hamburg, Computer Science Department, October 2000.
- [39] M. Wessel, V. Haarslev, and R. Möller. $\mathcal{ALC}_{\mathcal{RA}} - \mathcal{ALC}$ with role axioms. In F. Baader and U. Sattler, editors, *Proceedings of the International Workshop on Description Logics (DL'2000)*, August 17 - August 19, 2000, Aachen, Germany, pages 267–276, August 2000.