

Kurt Rothermel • Thomas Ertl • Dieter Fritsch • Paul J. Kühn • Bernhard Mitschang • Engelbert Westkämper • Christian Becker • Dominique Dudkowski • Andreas Gutscher • Christian Hauser • Lamine Jendoubi • Daniela Nicklas • Steffen Volz • Matthias Wieland

SFB 627 – Umgebungsmodelle für mobile kontextbezogene Systeme

Online publiziert am 28. Juni 2006
© Springer-Verlag 2006

Zusammenfassung Computersysteme, wie wir sie heute kennen, passen sich typischerweise nicht an den Benutzer und dessen Situation an. Erste Beispiele von Systemen, die durch den Bezug zur Realwelt den *Kontext* des Benutzers einbeziehen, sind Navigationssysteme, die unter Berücksichtigung der Position eines Benutzers und der Verkehrslage Richtungsanweisungen geben können. Damit innovative kontextbezogene Anwendungen möglich werden, muss der Kontext, also der Zustand der Realwelt, durch Sensoren erfasst, in das Computersystem übermittelt und dort in Form dynamischer Umgebungsmodelle den Anwendungen zur Verfügung gestellt werden.

Der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte und im Januar 2003 an der Universität Stuttgart eingerichtete Sonderforschungsbereich SFB 627 „Umgebungsmodelle für mobile kontextbezogene Anwendungen“ [22] ist ein interdisziplinärer Forschungsverbund von über 30 Wissenschaftlern. Diese erforschen Methoden und Konzepte für die Definition, Erstellung und Verwaltung von Umgebungsmodellen, durch die Anwendungen Zugriff auf Kontextinformationen erhalten.

K. Rothermel · T. Ertl · D. Fritsch · P.J. Kühn · B. Mitschang · E. Westkämper · C. Becker · D. Dudkowski · A. Gutscher · C. Hauser · L. Jendoubi · D. Nicklas · S. Volz · M. Wieland
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland
E-mail: nicklas@ipvs.uni-stuttgart.de

In dieser Rubrik erscheinen in unregelmäßiger Folge Kurzdarstellungen geplanter, laufender oder abgeschlossener Projekte. Die Darstellungen werden in der Regel von den Projektbeteiligten geliefert. Die Auswahl erfolgt durch den Herausgeber. Dabei wird die Bedeutung des Projekts für die Fortentwicklung der Informatik das Hauptkriterium sein. Bei geplanten und laufenden Projekten ist ein wichtiges Kriterium der Wunsch, Kontakte zu etablieren und die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Gruppen zu fördern. Bei abgeschlossenen Projekten geht es primär um die Vermittlung von Erfahrungen und Ergebnissen, die sich nicht für die Veröffentlichung in redaktionellen Beiträgen eignen.

Vision und wissenschaftliche Herausforderungen

Die rasche Entwicklung in den Bereichen der drahtlosen Kommunikation, der Miniaturisierung von Computersystemen und der Sensortechnologie erlaubt schon heute die Erfassung von Informationen der physischen Welt und deren Verbreitung in herkömmlichen Computersystemen und Netzwerken. Anwendungen können diese Informationen nutzen, um sich entsprechend der Situation, Bedürfnisse und Vorlieben mobiler Benutzer anzupassen. Die anwendungsübergreifende Verwaltung solcher Kontextinformationen in Umgebungsmodellen ist wünschenswert, da es aufwändig ist, Kontextinformationen zu erfassen und zu verwalten. Beispiele für solche aufwändigen Informationen sind ein detaillierter Gebäudeplan oder Straßenkarten. Können nun aber unterschiedliche Anwendungen, vom Gebäudemanagementsystem der Betriebstechnik über die Raumreservierung bis hin zur Besuchernavigation, diese Informationen gemeinsam nutzen, relativiert sich der Aufwand. Weiterhin können Umgebungsmodelle den Anwendungen eine einheitliche Semantik der verwalteten Daten anbieten. Damit werden Anwendungen von den Schnittstellen der Sensoren und sonstigen Kontextquellen, wie GIS-Datenbanken, entkoppelt.

Solche Umgebungsmodelle können Repräsentationen einer Vielzahl von Objekten der realen Welt enthalten, z.B. geografische oder mobile Objekte. Geografische Objekte bilden die Struktur eines Umgebungsmodells. Diese Struktur spiegelt die modellierte Realität durch Topologien oder geometrische Objekte wider. Mobile Objekte ändern ihre Position bezogen auf die räumliche Struktur, was die Modellierung von Fußgängern oder Autos, die sich durch Straßen bewegen, ermöglicht. Werden Informationen über Objekte des Umgebungsmodells beispielsweise durch Sensoren erfasst, können Attribute dieser Objekte aktualisiert werden, um den erfassten Zustand der realen Welt im Modell nachzuführen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, durch Ankerpunkte Informationen aus bestehenden digitalen Informationsräumen, wie dem World Wide Web, mit dem Umgebungsmodell zu verknüpfen. Durch so genannte virtuelle Objekte

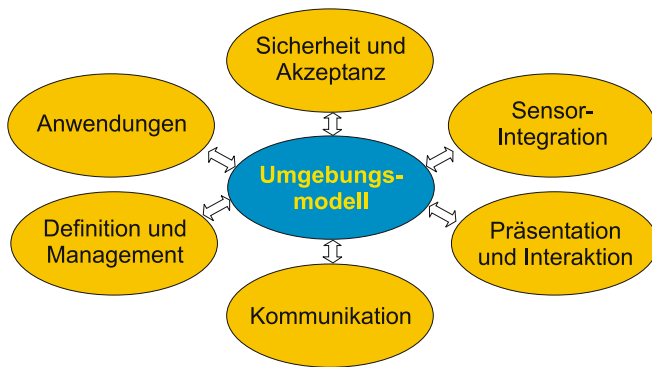


Abb. 1 Thematische Schwerpunkte des SFB

können Informationen oder Dienste mit einem Objekt der realen Welt, wie einem Gebäude oder Fahrzeug, verbunden werden. Schließlich erlauben interaktive Objekte die Wechselwirkung mit dem Umgebungsmodell entweder durch geeignete Eingabemöglichkeiten oder durch Aktorik.

Abbildung 1 zeigt die wissenschaftlichen Fragestellungen, die beim Erstellen und Verwalten dynamischer und potenziell weltumspannender Umgebungsmodelle zu lösen sind. Diese Herausforderungen spiegeln sich dementsprechend in der Struktur und dem Arbeitsprogramm des SFB wieder.

- Kontextbezogene Anwendungen: Durch das Umgebungsmodell werden neue kontextbezogene Anwendungen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen möglich. Hier wird durch die frühe Nutzung der verfügbaren Konzepte der Stand der Wissenschaft in den Anwendungsdomänen beeinflusst. Weiterhin werden durch das Erstellen und den Betrieb von Anwendungen Erfahrungen gesammelt, die als Rückkopplung für die Erstellung und das Management von Umgebungsmodellen aufgegriffen werden.
- Definition und Management von Kontextinformationen: Hier stehen die effiziente Verwaltung von Umgebungsmodellen sowie die Definition von deren Objekten im Vordergrund. Das Ziel dieser Fragestellung ist eine offene Architektur mit effizienten Föderationskonzepten für die Integration von Kontextquellen. Weiterhin werden geeignete Erweiterungskonzepte der Objektdefinitionen im Umgebungsmodell untersucht.
- Kontextbezogene Kommunikation: Damit mobile Anwendungen Zugriff auf das Umgebungsmodell erhalten können, muss eine flexible Kommunikationsplattform entworfen werden. Darüber hinaus werden neuartige Kommunikationsmechanismen auf Basis des Umgebungsmodells möglich, wie das Versenden einer Nachricht an ein geografisches Gebiet. Kontextinformation erlaubt weiterhin die Optimierung bestehender Kommunikationsmechanismen.
- Präsentation und Interaktion: Hier steht die Visualisierung der häufig detaillierten Objekte des Umgebungsmodells auf unterschiedlichsten Endgeräten wie auch die kontextbezogene Interaktion von Benutzern im Vordergrund. Weiterhin wird untersucht, wie durch Augmented-

Reality-Verfahren Umgebungsmodelldaten geeignet visualisiert werden können.

- Sensorintegration: Die Aktualisierung von Informationen des Umgebungsmodells soll möglichst automatisiert und aktuell geschehen. Dazu werden Sensordaten erfasst und geeignet aufbereitet, bevor sie in das Umgebungsmodell übernommen werden. Herausforderungen sind Konsistenzprobleme, die bei widersprüchlichen Sensordaten oder Modellinhalten auftreten können.
- Sicherheit und Akzeptanz: Hierbei sind die Schutzbedürfnisse von Anwendern gegen den Nutzen der erfassten Daten abzuwägen. Weiterhin ist die Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptabilität wichtig, um nicht nur die Technologie frühzeitig zu evaluieren, sondern auch um Gestaltungshinweise abzuleiten.

Um diese wissenschaftlichen Fragestellungen umzusetzen und zu evaluieren, wurde eine verteilte Architektur zur Verwaltung von Umgebungsmodellen entwickelt und prototypisch implementiert [23].

Abbildung 2 zeigt die Architektur dieser Plattform. Lokale Umgebungsmodelle werden von sogenannten Kontextservern verwaltet, die je nach Änderungshäufigkeit und Zugriffsmustern der Daten höchst unterschiedlich implementiert sein können [7]: z.B. durch effiziente Hauptspeicherstrukturen, die die regelmäßige Aktualisierung durch Sensoren erlauben (A), eingebettete Systeme, über die direkt Sensordaten abgefragt werden können (B), große Datenbanksysteme für geographische, eher statische Daten (C), oder auch durch kooperierende Systeme, die sich das Gebiet eines lokalen Umgebungsmodells hierarchisch unter sich aufteilen und so eine effiziente Verteilung erreichen (D). Kontextserver können auch externe Daten räumlich indizieren und so als lokales Umgebungsmodell anbieten, wie z.B. räumlich relevante Webseiten (E) [12]. Die Kontextserver bieten eine einheitliche Dienst-Schnittstelle an, über die mit der Augmented World Query Language (AWQL) einfache räumliche Abfragen gestellt werden können und das Ergebnis in der Augmented World Modeling Language (AWML) zurückgegeben wird. Zudem sind sie in einem räumlichen Verzeichnisdienst mit einem Dienstgebiet und den verwalteten Objekttypen registriert.

Dies reicht bereits aus, um in der Föderationsschicht die lokalen Umgebungsmodelle für die Anwendungen zu einer globalen Sicht zusammenzuführen. Föderationsknoten, die zur Lastverteilung beliebig repliziert werden können, verfügen über die gleiche Schnittstelle, verteilen die Anfragen jedoch an geeignete Kontextserver, wofür sie die Information im räumlichen Verzeichnisdienst verwenden. Föderationsknoten bieten zudem noch Mehrwertdienste wie z.B. Navigation oder das Zeichnen von Karten an, die über erweiterte Schnittstellen angesprochen werden, dabei jedoch effizient auf die zusammengeführten und gegebenenfalls zwischengespeicherten Umgebungsmodelldaten der Föderation zugreifen können.

Die häufig mobilen Anwendungen schließlich können über die AWQL/AWML-Schnittstelle Umgebungsmodelldaten von der Föderation oder auch von dedizierten Kontext-

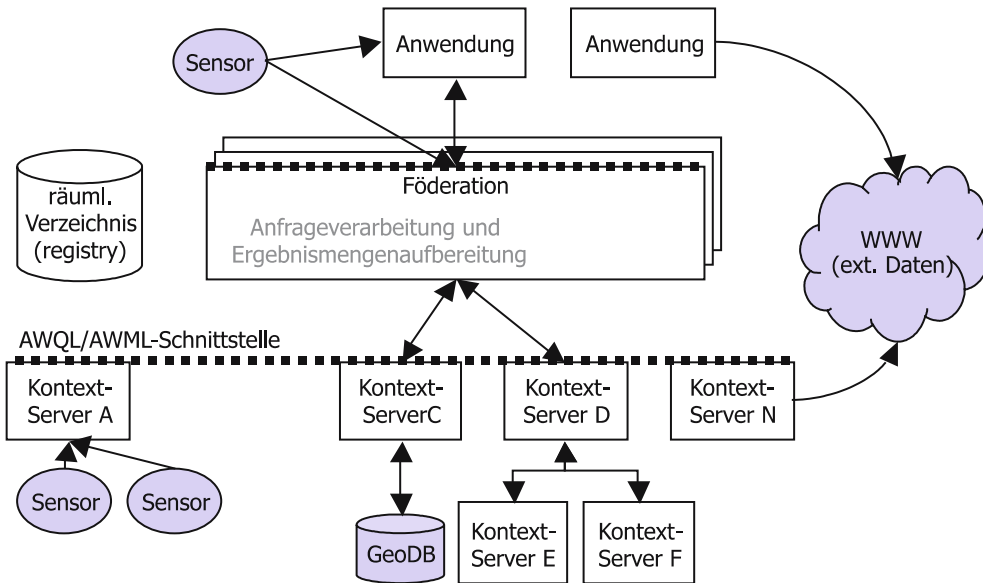


Abb. 2 Architektur der Nexus Plattform

A Kommunikation und Sicherheit	B Definition und Management von Umgebungsmodellen	C Modellpräsentation und Sensorik	D Anwendungen und Akzeptanzen
<ul style="list-style-type: none"> • Kommunikationsplattform • Modellbasierte Kommunikation • Datenschutz und Datensicherheit • Modellierung und Simulation von Mobilität 	<ul style="list-style-type: none"> • Modellierung und Verwaltung des Umgebungsmodells • Heterogene Geodaten • Lokationsmanagement und Informationsdiffusion 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensorik und Bildverarbeitung • Interpretation multisensorieller Daten • Generalisierung räumlicher Daten • AR-Anwendungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Smart Factory • Orientierungshilfe für Blinde • Bewertung und Reflexion

Abb. 3 Organisation des SFB

servern erhalten. Lokale Sensordaten werden entweder direkt in der Anwendung verarbeitet oder über die Föderation an geeignete Kontextserver weitergeleitet, wofür wieder der räumliche Verzeichnisdienst verwendet werden kann. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, räumliche Ereignisse (z.B. *OnEnterArea(object, area)*) zu definieren, die dann in der Plattform verteilt beobachtet und aus Basisereignissen zusammengesetzt werden. Dadurch kann die Anwendung auch über Änderungen im Umgebungsmodell informiert werden.

Organisation des SFB

Der Sonderforschungsbereich ist in vier Projektbereiche aufgeteilt, die jeweils einem thematischen Schwerpunkt entsprechen. Zwei Arbeitskreise „Mobilität und Sicherheit“ und „Modellierung und Konsistenz“ koordinieren Forschungsaktivitäten, die projektbereichübergreifend behandelt werden.

Im Folgenden wird nun detaillierter auf diese Projektbereiche eingegangen.

Projektbereich A – Kommunikation und Sicherheit

Innerhalb des Projektbereichs A stehen die Themen Kommunikation und Sicherheit im Vordergrund. Einerseits ist eine Plattform für kontextbasierte Dienste auf ein passendes Kommunikationssystem angewiesen, welches in diesem Projektbereich entworfen wird. Auf der anderen Seite können auf Basis des Umgebungsmodells neuartige Kommunikationsmechanismen, wie die in diesem Abschnitt exemplarisch dargestellte geografische Kommunikation (Geocast), realisiert werden. Ferner kann insbesondere die Kommunikation mit mobilen Endgeräten durch Nutzung des Umgebungsmodells effizienter und robuster gestaltet werden. So kann zum Beispiel ein Modell der verfügbaren Zugangnetze für die automatische Netzauswahl genutzt werden, wobei Kriterien wie Kosten, Bandbreite oder Dienstgüte für die Auswahl herangezogen werden können. Durch das ebenfalls exemplarisch in diesem Abschnitt vorgestellte Vorübertragen von Informationen (Hoarding) lässt sich die Kommunikation mit mobilen Endgeräten in Bereichen mit schwacher oder fehlender Netzabdeckung weiter optimieren. Darüber hinaus muss

eine Plattform, welche sensitive Kontextdaten ihrer Benutzer verwaltet, wie unten dargestellt, ein schlüssiges Datenschutzkonzept aufweisen, um eine hohe Akzeptabilität zu erreichen. Die Nexus-Plattform, als Ausprägung eines hoch verteilten Systems, muss außerdem hohe Anforderungen an die Skalierbarkeit und Leistungsfähigkeit erfüllen. In diesem Projektbereich werden daher relevante Teile der Plattform diesbezüglich analysiert, um kritische Punkte zu identifizieren und Verbesserungsmöglichkeiten zu erschließen. Hierzu werden auch spezialisierte Mobilitätsmodelle benötigt, welche die Bewegung der im Umgebungsmodell gespeicherten Objekte detailgetreu abbilden. Diesen Modellen ist im Projektbereich A sowohl ein eigenes Teilprojekt als auch ein Teil eines teilprojektübergreifenden Arbeitskreises gewidmet. Ein anderer Teil dieses Arbeitskreises befasst sich mit Fragen der Sicherheit und des Datenschutzes, welche nicht im Fokus des entsprechenden, unten dargestellten Teilprojektes liegen.

Modellbasierte Kommunikation

Das Teilprojekt A2 beschäftigt sich mit den modellbasierten Kommunikationsmechanismen Geocast und Hoarding. *Geocast* ist eine Form der Gruppenkommunikation, mit deren Hilfe Nachrichten an Teilnehmer in bestimmten geografischen Gebieten gesendet werden können. Zur Bestimmung dieser Zielgebiete ist ein passendes Adressierungsschema notwendig, das wesentlich von den Eigenschaften des zugrunde liegenden Umgebungsmodells beeinflusst wird. Das Nexus-Umgebungsmodell ermöglicht hierbei sowohl die flexible geometrische Adressierung z.B. über Polygone, als auch die für den Benutzer sehr intuitive symbolische Adressierung über abstrakte Ortsbezeichner wie Städtenamen, Gebäude- oder Raumnummern [4]. Da durch die Nexus-Plattform nicht nur stationäre, sondern auch mobile Objekte verwaltet werden, können außerdem mobile Zielgebiete, z.B. Züge, adressiert werden. Die Verwendung von zusätzlich modellierten Objektattributen, wie Objekttypen, ermöglicht ferner die Definition von Empfängergruppen innerhalb eines Gebietes, um etwa eine Nachricht an alle Taxis in der Nähe des Hauptbahnhofes zu schicken.

Mithilfe des Nexus-Umgebungsmodells können sowohl sehr kleine Empfängergruppen, wie einzelne Räume, als auch sehr große Gruppen, wie ganze Stadtteile, adressiert werden, woraus sich entsprechende Herausforderungen bezüglich der effizienten Verteilung von Geocast-Nachrichten ergeben. In der Literatur beschriebene Ansätze (z.B. nach Navas und Imielinski [21]) unterstützen dabei nur teilweise die Anforderungen des Nexus-Adressierungsschemas. Insbesondere sind daher Ansätze zu entwerfen, die sowohl geometrisch als auch symbolisch adressierte Nachrichten sowie Nachrichten an mobile Zielgebiete unterstützen.

Hoarding-Verfahren werden eingesetzt, um den Informationszugriff im entkoppelten Betrieb, d.h. in Gebieten mit schwacher oder gar fehlender Netzanbindung, weiterhin zu ermöglichen. Hierzu werden diejenigen Informationsobjekte, die der Anwender voraussichtlich benötigen wird, vorab in den so genannten Hoard-Cache des mobilen Endgeräts

übertragen. Diese Vorabübertragung findet an so genannten „Hotspots“ statt, also in Bereichen mit sehr guter Netzanbindung wie beispielsweise drahtlosen LANs (WLANs). Das bereits entwickelte Hoarding-Verfahren nach Kubach und Rothermel [16] nützt bei der Auswahl der vorab zu übertragenden Informationsobjekte die Tatsache aus, dass die Wahrscheinlichkeit des Zugriffs auf Informationen vom Aufenthaltsort des Benutzers abhängt. Die Herausforderung besteht nun darin, das Auswahlverfahren unter zusätzlicher Berücksichtigung der semantischen Nähe der räumlichen Informationsobjekte, sowie der aktuellen Situation des Benutzers zu optimieren. Dabei soll die semantische Nähe sowohl zwischen schwach strukturierten Informationsobjekten wie Webseiten [2], als auch zwischen stark strukturierten Informationen auf der Grundlage der Relationen im Nexus-Umgebungsmodell bestimmt werden.

Sicherheit und Datenschutz

Das Teilprojekt A3 behandelt spezielle Fragestellungen aus dem Feld der Sicherheit und des Datenschutzes, welche bei globalen Systemen mit Umgebungsmodellen wie der Nexus-Plattform auftreten. Im Folgenden werden drei Arbeitsgebiete näher vorgestellt.

Zugriffskontrolle für personenbezogene Ortsdaten

Die Erfassung und Verwaltung von Ortsinformationen mobiler Benutzer durch Lokationsdienste stellt eine erhebliche Missbrauchsgefahr dar. Für die Akzeptabilität der Plattform ist deshalb ein effektiver Schutz der Ortsdaten erforderlich. Klassische Berechtigungssysteme bieten hier keinen ausreichenden Schutz, da einerseits Anfragen von Anwendungen oft nur indirekt über Dienste der Föderationsschicht an die Lokationsdienste gerichtet werden, andererseits können die Server und Dienste aufgrund der Offenheit der Plattform auch von nicht vertrauenswürdigen Betreibern angeboten werden. Die besondere Problematik besteht darin, die Vertraulichkeit der Ortsdaten auch gegenüber den Betreibern sicherzustellen, obwohl diese die Ortsinformationen zum Teil auswerten können müssen.

Ziel dieses Arbeitsgebietes ist es, zu untersuchen, welche Freiheitsgrade in diesem Spannungsfeld zwischen Funktionalität und dem Schutz personenbezogener Ortsdaten vorhanden sind, sowie mögliche Kompromisse zu beleuchten.

Virtuelle Identitäten

Kontextbezogene Systeme benötigen eine Vielzahl an Informationen über ihre Benutzer um diese in jeder Situation optimal unterstützen zu können. Um Missbrauchsmöglichkeiten einzuschränken und eine hohe Akzeptabilität zu erreichen, sollen Benutzer in der Nexus Plattform die Möglichkeit haben, verschiedene Anwendungen – und sogar verschiedene Teile der Plattform – unter verschiedenen Identitäten zu verwenden. Dadurch ist das notwendige Datenprofil für eine Identität geringer.

Ein potenzieller Angreifer darf nicht in der Lage sein, mehrere Identitäten als zu einem Benutzer gehörig zu verketteten. Eine derartige Verkettung ist durch die Auswertung identifizierender Attribute möglich, wie z.B. die IP-Adresse. Ein Benutzer wird potenziell weniger Netzzugangsschnittstellen und damit IP-Adressen haben als Identitäten. Haben zwei (oder mehr) Identitäten zeitgleich dieselbe IP-Adresse, kann ein Angreifer sehen, dass sie zum selben Benutzer gehören. Daher wird ein mobiles Kommunikationssystem auf IP-Basis entworfen, welches die Unverkettbarkeit von Identitäten schützt und gleichzeitig auch die Erreichbarkeit der Identitäten garantiert [8].

Vertrauensmodellierung

Da es verschiedene Dienstanbieter für die gleichen Dienste geben kann, sich diese aber sehr wohl hinsichtlich Qualität oder Verfügbarkeit unterscheiden können, haben Benutzer die Möglichkeit, diejenigen Anbieter zu wählen, welche sie als vertrauenswürdig für die Erfüllung der Aufgabe einschätzen [18]. Neben den eigenen Erfahrungen mit einem Dienst können hierbei auch die Einschätzungen anderer Benutzern hilfreich sein.

Eine systematische Auswertung der Bewertungen anderer Benutzer soll durch ein Reputationssystem erfolgen, welches den Austausch der Bewertungen unter den Benutzern ermöglicht. Hierzu wird untersucht, wie Vertrauen quantitativ ausgedrückt werden kann und nach welchen Regeln Schlüsse aus der Kombination von mehreren Vertrauensbeziehungen gefolgert werden sollen. Es existieren verschiedene Vorschläge für Vertrauensmodelle [13, 15, 19], die aber zum Teil grundsätzlich verschiedene Ansätze verfolgen oder auf bestimmte Anwendungen zugeschnitten sind. Da keines der Modelle den Anforderungen von Nexus genügt, wird ein neues Modell entwickelt und in die Nexus-Plattform eingebunden.

Projektbereich B – Definition und Management von Umgebungsmodellen

Die zentrale Aufgabe dieses Projektbereichs ist es, das Umgebungsmodell bereitzustellen. Dazu gehört der Entwurf von Konzepten zur Definition von Objekten des Umgebungsmodells genauso wie Methoden zur effizienten Verwaltung. Hierbei ist es notwendig, Fragen zur Systemarchitektur, Datenföderation, Datenverarbeitung, Datenkonsistenz und auch Datenaktualisierung zu beantworten. Neben zwei Teilprojekten aus dem Bereich Lokationsmanagement und Informationsdiffusion sowie Integration heterogener Geodaten stellt sich dieser Projektbereich folgenden wissenschaftlichen Herausforderungen:

- Modellierungs- und Erweiterungskonzepte: Wenn kontextbezogene Anwendungen nicht isoliert voneinander ablaufen, profitieren sie von einer gemeinsamen systemtechnischen und semantischen Umgebung. Es müssen Informationsstrukturen entwickelt werden, die eine ge-

meinsame Semantik haben, zugleich jedoch für neue Anwendungen und Umgebungsdaten offen sind und Daten in verschiedenen Detaillierungsstufen bereitstellen. Die Integration heterogener topografischer und topologischer Umgebungsmodelle erfordert ein übergeordnetes räumliches Metamodell.

- Föderiertes Modellmanagement: Diese Integration kann durch eine Föderierung erzielt werden, wodurch Anwendungen eine einheitliche Sicht durch ein logisches globales Umgebungsmodell erhalten. Dazu müssen die Daten, die potenziell verteilt bei verschiedenen Anbietern gespeichert sein können, aufgrund ihrer geografischen und thematischen Relevanz ausgewählt und von einer Föderationskomponente semantisch integriert werden. Neben verschiedenen räumlichen Anfragen können so auch weitere Funktionen unterstützt werden, wie etwa die multimodale Navigation, die spezielle Aufbereitung von Daten (z.B. Berechnung dreidimensionaler Sichten) oder die Verwaltung und Beobachtung räumlicher Ereignisse.
- Integration von Zeitkonzepten: Durch die Ergänzung der Umgebungsmodelle um temporale Aspekte lassen sich zeitabhängige Ereignisse definieren, Anfragen hinsichtlich vergangener bzw. prognostizierter Zustände der Realwelt stellen oder auch Objekte mit zeitabhängigen Werten definieren (Öffnungszeiten, Messwerte, etc.). Der Zeitaspekt muss auf der Ebene der Modellierung und Anfragesprache berücksichtigt werden und hat außerdem einen starken Einfluss auf die internen Speicher- und Zugriffsstrukturen.

Im Folgenden werden zwei Teilprojekte des Projektbereichs vorgestellt, die speziellere Ausprägungen dieser Herausforderungen erarbeiten. Das Teilprojekt „Heterogene Geodaten“ beschäftigt sich mit der semantischen Integration, während das Teilprojekt „Lokationsmanagement und Informationsdiffusion“ sowohl die Verwaltung mobiler Objekte als auch die Verteilung von Umgebungsinformationen in Ad-hoc-Netzen betrachtet.

Heterogene Geodaten

Umgebungsmodelle für orts- und kontextbezogene Systeme müssen in erster Linie raumbezogene Daten enthalten. Um diese Daten in die Nexus-Plattform integrieren zu können, muss zunächst das globale Datenschema, das den verteilten Umgebungsmodellen zugrunde liegt, um entsprechende Klassen zur Repräsentation von Geodaten erweitert werden. Schließlich müssen Abbildungsregeln von existierenden Schemas für Geodaten auf die Objektklassen des globalen Schemas realisiert werden. Dadurch wird es möglich, raumbezogene Daten aus externen, heterogenen Quellen im Format der Nexus Plattform bereitzustellen.

Die Föderation von Umgebungsmodellen erlaubt beliebigen Anbietern ihr Datenmaterial unabhängig voneinander bereitzustellen. Da dies ohne eine weitere Prüfung auf Konsistenz der Daten geschieht, ist es möglich, dass es im Datenbestand des Systems zu Widersprüchen kommt. Insbesondere kann der Fall auftreten, dass ein und dasselbe Realwelt-

objekt mehrfach innerhalb unterschiedlicher Umgebungsmodelle repräsentiert ist. In diesem Zusammenhang spricht man von „Mehrfachrepräsentationen“. Inkonsistenzen zwischen Mehrfachrepräsentationen führen dann zu Problemen, wenn mehrfach repräsentierte Objekte aus unterschiedlichen Umgebungsmodellen gemeinsam verarbeitet werden müssen.

Um diese Probleme lösen zu können, müssen korrespondierende Repräsentationen zunächst identifiziert werden. Im Rahmen des Teilprojektes werden hierzu semiautomatische und automatische Verfahren entwickelt. Außerdem wird der Ansatz verfolgt, Relationen zwischen Mehrfachrepräsentationen explizit abzuspeichern. Diese Relationen enthalten Informationen über die Art bzw. den Grad der Inkonsistenz, die hauptsächlich über geometrische, topologische und thematische Ähnlichkeitsmaße ausgedrückt werden. Beispielsweise werden einander entsprechende Straßensegmente über Längen-, Winkel- oder Distanzangaben, über Angaben hinsichtlich adjazierender Kanten, über Vergleiche von Straßennamen, etc. miteinander in Beziehung gesetzt. Bei der gemeinsamen Analyse können die in den Relationen gespeicherten Informationen ausgewertet und berücksichtigt werden. Diese Informationen erlauben es darüber hinaus, sehr ähnliche Mehrfachrepräsentationen miteinander zu verschmelzen und somit wieder eine konsistente Datensicht zu erzeugen. Ebenso können sie für die Datenfortführung herangezogen werden.

Lokationsmanagement und Informationsdiffusion

Mit zunehmender Verbreitung drahtloser Kommunikations- und Sensortechnologie gewinnt die Erfassung und Verwaltung dynamischer Informationen in *mobilen Ad-hoc-Netzen* (MANETs) zunehmend an Bedeutung. Neben einem effizienten infrastrukturbasierten Lokationsdienst [3] zur Verwaltung hochdynamischer Positionsinformationen werden in diesem Teilprojekt effiziente und skalierbare Mechanismen für die Verwaltung dynamischer Umgebungsmodelle in MANETs untersucht. Dies dient als Vorbereitung für die Integration von infrastrukturlosen und infrastrukturbasierten Systemen unter einer gemeinsamen Föderation. Aufgrund der begrenzten Ressourcen und der Mobilität von Endgeräten sowie der Gefahr der Netzpartitionierung in MANETs [9, 10] ergeben sich bei der Verwaltung *dynamischer* Modelldaten eine Reihe neuer Herausforderungen. Zu deren Untersuchung wurden die Modelldaten auf die wesentlichen Merkmale, die so genannten Primärkontexte [24] *Identität, Ort und Zeit*, reduziert. Im Folgenden werden die Kernthemen *Konsistenzkonzepte* und *infrastrukturloser Lokationsdienst* näher betrachtet.

Konsistenzkonzepte umfassen sowohl Fragen der *zeitlichen* als auch der *räumlichen Konsistenz* von Modelldaten. Im ersten Fall wird die *zeitliche Ordnung verteilter Beobachtungen* der realen Welt betrachtet, also Aussagen der Form „Ereignis A geschieht vor Ereignis B“, die für jede Art der Folgerung aus einer Menge verschiedener Ereignisse außerordentlich wichtig ist. Zu diesem Zweck wurde ein Konsistenzkonzept [11] entwickelt, das die chronologische Ord-

nung sensorbasierter und potenziell konkurrierender Beobachtungen erlaubt, insbesondere auch dann, wenn physische Uhren nur unzureichend synchronisiert sind, beziehungsweise gänzlich fehlen. Im zweiten Fall werden geometrische Relationen betrachtet, die für die Beantwortung räumlicher Anfragen, wie Bereichs- und Nachbarschaftsanfragen, eine grundlegende Rolle spielen. Aufgrund der begrenzten zeitlichen Auflösung bei der sensoruellen Datenerfassung kann der Zustand der physischen Welt nur mit einer bestimmten Granularität vorgehalten werden. Dies führt bei der Betrachtung räumlicher Beziehungen der Art „Objekt X befindet sich näher an Ort O als Objekt Y“ bei hohen Objektdichten und ungenauen Positionsinformationen zu Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit räumlicher Anfragen.

Der zweite Schwerpunkt ist die Entwicklung eines *skalierbaren Lokationsdienstes für infrastrukturlose Systeme*. Wie im infrastrukturbasierten Ansatz sollen neben Positionsanfragen auch Anfragen nach Gebiet und Nachbarschaft bearbeitet werden. Bislang existieren in solchen Umgebungen Ansätze für Positionsanfragen (z.B. in [17]). Die Entwicklung allgemeiner Konzepte für räumliche Anfragen stellt aber ein bisher ungelöstes Problem dar. Insbesondere ist es erforderlich, nicht nur Punktkoordinaten, sondern auch die mit Ungenauigkeiten behafteten Positionsinformationen zu betrachten, um realen Positionierungssystemen Rechnung zu tragen. Zu diesem Zweck wurden Verfahren entwickelt, welche die Auflösung *probabilistischer* räumlicher Anfragen auf der Basis ungenauer Positionsinformationen und einer geeigneten Anfrage semantik erlauben.

Projektbereich C – Modellrepräsentation und Sensorik

Während sich die Forschungsbereiche A und B auf unterschiedliche Realisierungsaspekte des Umgebungsmodells konzentrieren, beschäftigen sich die Projekte des Projektbereichs C mit der Problematik, wie neue Daten in das Umgebungsmodell importiert bzw. wie Informationen aus dem Umgebungsmodell effizient präsentiert werden können. Da die Schnittstellen des Umgebungsmodells und der angebotenen Dienste zur realen Welt äußerst vielfältig sind, konzentrieren sich die Arbeiten in diesem Projektbereich auf Ein- und Ausgabemechanismen mit einem gewissen Raumbezug. Ortsbezogene Dienste erfordern einerseits Methoden zur Aufnahme von relevanten Objekten und deren räumlicher Beziehung in das Umgebungsmodell, andererseits Sensoren zur Positionierung eines mobilen Systems relativ zu diesem Modell und zur automatisierten Nachführung und Aktualisierung des Umgebungsmodells, und schließlich Verfahren zur Präsentation von abstrakten Informationen aus dem Umgebungsmodell, die die reale Welt augmentieren. Daher werden grundlegende Aspekte sensorischer Eingabe, geometrischer Segmentierung und Abstraktion sowie multimedialer Ausgabe speziell im Hinblick auf portable Geräte mit Ortsbezug untersucht. Damit kommt diesen Projekten eine Mittlerrolle zwischen den konkreten Anwendungen des Forschungs-

bereichs D und den Basistechnologien mobile und sichere Kommunikation und Föderation zu.

Sensorik und Bildverarbeitung

Die Bestimmung des gegenwärtigen Aufenthaltsortes in Bezug auf die Umgebung ist für ortsbezogene Anwendungen eine zwingende Voraussetzung [1]. Erst diese Information ermöglicht es, ortsbezogene Anfragen zu stellen und mit Objekten der realen Welt zu interagieren. Zur Realisierung der Anfragen wird allerdings ein Umgebungsmodell vorausgesetzt, das ein entsprechendes Abbild der realen Welt darstellt.

Die Projekte im Bereich Sensorik und Bildverarbeitung stellen Verfahren zur Verfügung, die zwischen einem Umgebungsmodell und der realen Welt vermitteln und so eine Interaktion mit dem Modell erlauben. Im Vordergrund steht dabei die Bestimmung der Position eines mobilen Systems relativ bzw. absolut zu einem Umgebungsmodell. Zur Lösung dieser Aufgabe können unterschiedliche Verfahren in Betracht gezogen werden. Beispielsweise lassen sich Sensortechnologien zur direkten Lokalisierung integrieren, die jedoch eine geeignete Infrastruktur voraussetzen und oftmals Einschränkungen unterliegen. Deutlich wird eine derartige Einschränkung, wenn beispielsweise ein Sensorsystem verwendet wird, dessen Reichweite nur auf ein Gebäude beschränkt ist. Eine alternative Möglichkeit der Lokalisierung, die sowohl in der freien Umgebung als auch in Innenräumen verwendet werden kann, ist die inverse Positionsbestimmung über die Analyse von Bildsequenzen. Dabei werden Objekte in Bildern erkannt, die eine anschließende Bestimmung der Position und Orientierung des Aufnahmestandpunktes der Kamera relativ bzw. absolut zu diesem Objekt ermöglichen. Die Identifikation von Objekten in einer Bildszene setzt allerdings voraus, dass eine Datenbasis mit Objektmodellen (geometrisches Umgebungsmodell) existiert. Es werden daher Verfahren bereitgestellt, die die Bild-Modell-Überlagerung anhand von Korrespondenzen zwischen extrahierten Merkmalen, der abgebildeten Objekte und dem vorhandenen Umgebungsmodell ermöglichen [14]. Als Merkmale lassen sich beispielsweise kantenförmige oder flächenhafte Objekte einsetzen. Automatische Zuordnungsverfahren erlauben die Detektion von Inkonsistenzen und bilden die Grundlage für die automatisierte Nachführung und Aktualisierung des Umgebungsmodells. Speziell für die Anwendung in der Stadtvisualisierung müssen allerdings neben Gebäudeinformationen noch weitere Daten erfasst oder modelliert werden.

Augmented-Reality-Visualisierung

Neben den bild- und geometrie-basierten Daten kann durch die Föderationskomponente der Nexus-Plattform noch auf viele andere ortsbezogene Daten zugegriffen werden. Die kompakte Präsentation dieser unterschiedlichen Facetten des Umgebungsmodells erfordert multimediale Schnittstellen und fortgeschrittene Visualisierungstechniken. Augmented Reality (AR) bietet sich aufgrund des impliziten Ortsbezugs

dieser Technik an, um reale Objekte im Blickfeld um abstrakte Informationen aus dem Umgebungsmodell zu ergänzen. In einem weiteren Teilprojekt soll daher die einfache Integration von AR-Anwendungen mit dem Umgebungsmodell erleichtert werden, indem geeignete allgemeine Mapping-Verfahren von abstrakten, möglicherweise zeitabhängigen Objekteigenschaften auf Geometrie und grafische Attribute entwickelt werden. Dabei wird der Begriff Augmented Reality sehr weit gefasst und beinhaltet die Erweiterung der Realität durch unterschiedliche Geräte von „Smartphones“ bis hin zu „See-Through“-Brillen. Diese Endgeräte bieten teilweise einen erheblich unterschiedlichen Leistungsumfang. Einige der Hauptunterscheidungspunkte sind dabei die Grafikleistung, die Güte der Netzwerkverbindung, die Größe der Anzeige oder die Prozessorleistung. Entsprechend müssen geeignete Darstellungstechniken gewählt werden, um eine Visualisierung der Daten auf dem Endgerät sinnvoll zu realisieren. Ein Client-Server System bietet die notwendige Flexibilität, um sowohl einfache Geräte durch die Übertragung eines Videostroms, als auch leistungsstarke Endgeräte zu unterstützen, indem lediglich die zu visualisierenden Daten übertragen werden. Die Auswahl der Darstellungstechnik wird dabei vor allem durch die Leistung des Endgeräts, aber auch durch die Qualität der zur Verfügung stehenden Netzwerkverbindung bestimmt. Steht eine Netzwerkverbindung mit nur geringer Bandbreite zur Verfügung, können reduzierte, nicht-fotorealistische Darstellungstechniken eingesetzt werden. Bei Daten und Information, die aus dem Umgebungsmodell abgefragt werden, kann es sich um beliebige Datentypen unterschiedlicher Dimension und Genauigkeit handeln. Auf Grundlage zusätzlicher semantischer Informationen der zu visualisierenden Daten aus der Föderation und der Analyse ihrer geometrischen Beschreibung kann gemeinsam mit den Charakteristika der Daten ein geeignetes Visualisierungsverfahren bestimmt werden. Durch die Integration abstrakter Informationen über reale sichtbare Gegenstände bieten sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten an, wie etwa die Visualisierung von Objektklassifikationen oder Systemzuständen, die über das Umgebungsmodell verfügbar sind. Grundlegendes Ziel ist es, auch für Informationen, die nicht im Hinblick auf eine AR-Visualisierung in das Umgebungsmodell integriert wurden, möglichst kompakte geometrische oder bildbasierte Abstraktionen zu entwickeln. Dabei erfordert die Steuerung der Visualisierung durch den Benutzer besonders in AR-Anwendungen eine intuitive Bedienung der jeweils geeigneten Interaktionstechniken am spezifischen Endgerät [6].

Projektbereich D – Anwendungen und Akzeptanzfragen

Um die im Sonderforschungsbereich erarbeiteten Konzepte frühzeitig zu evaluieren, werden begleitend Anwendungsprojekte durchgeführt. Ziel dieser Projekte ist neben der Rückkopplung und Anforderungsanalyse an die verwendeten Umgebungsmodelle, auch die Nutzung dieser Umgebungsmodelle um den Stand der Wissenschaft in den Anwendungsreichen zu erweitern.

Neben zwei Anwendungsprojekten aus unterschiedlichen Bereichen – der Fabrikautomation und der Unterstützung sehbehinderter Menschen – findet sich hier auch ein technikphilosophisches Projekt, das die Akzeptabilität kontextbezogener Systeme frühzeitig untersucht und so Gestaltungshinweise liefern kann. Im Folgenden werden die beiden Anwendungsprojekte kurz vorgestellt.

Umgebungsmodell für das Management intelligenter Betriebsmittel in der flexiblen Produktion (Smart Factory)

In der Anwendungsdomäne der Produktion ist aufgrund der Internationalisierung der Fertigung eine Optimierung der Prozesse besonders in Hinblick auf Kosten notwendig, um wettbewerbsfähig produzieren zu können. Ein vielversprechendes Feld mit hohem Optimierungspotenzial wird in der Flexibilisierung der Fertigungshilfsmittel und des Betriebsmittelwesens antizipiert [5, 25, 27].

Typischerweise werden hier überhöhte Bestände vorgehalten, damit Produktionsausfälle wegen nicht verfügbarer Betriebsmittel vermieden werden können. Eine Analyse des Betriebsmittel-Lebenszyklus [20] hat ergeben, dass Überbestände nur dann sinnvoll reduzierbar sind, wenn sowohl die aktuelle Position als auch der Zustand der Betriebsmittel jederzeit erfasst werden können, um rechtzeitig Wartung oder Neubeschaffung zu initiieren.

Dementsprechend ist die *Dezentralisierung des Betriebsmittel-Managements* durch den Einsatz „smarter“ Werkzeugsysteme mit integrierten Daten- und Informationsträgern Ziel dieses Teilprojektes. Den Forderungen der Produktion nach schneller Reaktionszeit der Fertigung bei beherrschbarer Komplexität der aktiven Prozesse wird Rechnung getragen und somit eine Optimierung der Fertigung hinsichtlich der drei Leistungsfaktoren Kosten, Zeit und Qualität unterstützt [28]. Die Konzepte und Modelle für eine dynamische Verwaltung *intelligenter* Betriebsmittel werden analysiert. Dabei wird untersucht, welche spezifischen Anforderungen an das Umgebungsmodell gestellt werden, insbesondere in Hinblick auf seine Struktur (etwa der 3D-Daten Integration), Inhalte (wie Sensordaten) und der realisierenden Dienste (wie dem Lokationsdienst). So wird in enger Zusammenarbeit eine Erweiterung beziehungsweise Anpassung des Umgebungsmodells vorgenommen, damit die Prozesse der „Smart Factory“ entsprechend umgesetzt werden können.

Navigations- und Orientierungshilfen für Blinde

Die Entwicklung einer *Navigations- und Orientierungshilfe für Blinde und Sehbehinderte* steht im Mittelpunkt eines weiteren Anwendungsprojektes. Hierbei wird mittels eines mobilen Geräts lokale Sensorinformation mit Informationen aus Umgebungsmodellen zusammengeführt. Dazu werden die in Umgebungsmodellen abgelegten Daten über kartierte Objekte mit lokalen Messungen von Entfernung, Größe und Farbe kombiniert und ermöglichen so eine akustische Benennung von Objekten. Dieser *elektronische Blindenstab*

ermöglicht durch Fusion der gesammelten Daten auch eine Aktualisierung des dynamischen Umgebungsmodells, welches in der Folge anderen Benutzern zur Verfügung steht. Aufbauend auf diesen Basisdiensten entsteht eine Navigationshilfe, die bei Eingabe eines gewünschten Ziels eine an den Möglichkeiten der blinden Benutzer ausgerichtete Routenplanung durchführt und die Anwender unter ständigem Abgleich von Sensor- und Modellinformationen unter Umgehung von Hindernissen auf dem Weg begleitet. Darüber hinaus soll die Navigationshilfe Zugriff auf weitere Informationsdienste ermöglichen.

Zusammenfassung

Kontextbezogene Anwendungen reagieren flexibel auf ihre Ausführungsumgebung, indem sie Informationen der realen Welt einbeziehen.

Die Verfügbarkeit von preiswerten und dabei hoch miniaturisierten Sensorplattformen wird in absehbarer Zeit dazu führen, dass nahezu an jedem Ort Kontextinformationen erfasst und von Anwendungen genutzt werden können. Zahlreiche Anwendungsdomänen werden somit von diesen Kontextinformationen profitieren.

Der SFB 627 Nexus „Umgebungsmodelle für mobile kontextbezogene Systeme“ an der Universität Stuttgart stellt sich der Herausforderung, diese global vorliegenden Kontextinformation zu einem weltumspannenden Kontextmodell zusammenzufassen und Anwendungen anzubieten. Dazu werden Konzepte und Methoden zur Erstellung und Verwaltung von detaillierten und komplexen Umgebungsmodellen untersucht. Auf Basis solcher Umgebungsmodelle werden innovative Anwendungen, wie die „Smart Factory“ oder die Blindennavigation möglich. Nach drei Jahren intensiver Forschung liegt bereits eine Reihe von viel versprechenden Ergebnissen vor. Die Konzepte für die Modellierung und Verwaltung von Kontextinformationen sind in Prototypen der Nexus-Plattform realisiert worden, die auch von den Anwendungsprojekten genutzt wird.

Aufgrund der gemeinsamen Bearbeitung konnten neue Fragestellungen identifiziert werden, denen sich der SFB in den nächsten Jahren widmen wird. Dazu gehören die Betrachtung von höherwertigem Kontext, der durch Einbezug von anwendungsspezifischen Informationen abgeleitet wird, die Modellierung von Qualität und Konsistenz von Kontextinformationen sowie Metriken für die Bewertung, Methoden für den effizienten Zugriff auf Sekundärkontext, die Homogenisierung der Anfrageverarbeitung und die Untersuchung von Konzepten und Werkzeugen zur Anwendungsunterstützung.

Literatur

1. Azuma R, Hof B, Neely III H, Sarfaty R, Daily M, Bishop G, Chi V, Welch G, Neumann U, You S, Nichols R, Cannon J (1998) Making Augmented Reality Work Outdoors Requires Hybrid Tracking. In: Proceedings of IWAR'98, San Francisco, Calif., S. 219–224

2. Bürklen S, Marrón PJ, Rothermel K (2004) An Enhanced Hoarding Approach Based On Graph Analysis. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Mobile Data Management (MDM '04), Berkeley, CA, USA, Januar 2004, S. 358–369
3. Drosdol T, Schwarz T, Bauer M, Großmann M, Hönle N, Nicklas D (2004) Keeping Track of “Flying Elephants”: Challenges in Large-Scale Management of Complex Mobile Objects. *GI Jahrestagung* (1) 2004, Ulm, Germany, S. 288–292
4. Dürr F, Rothermel K (2003) On a Location Model for Fine-Grained Geocast. In: Proceedings of the Fifth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2003), Seattle, WA, USA, Oktober 2003, S. 18–35
5. *The Economist*; 2.10.2004, survey S.11
6. Eissele M, Stegmaier S, Weiskopf D, Ertl T (2004) Orientation as an additional User Interface in Mixed-Reality Environments. In: 1. Workshop Erweiterte und Virtuelle Realität. *GI-Fachgruppe AR/VR*, S. 79–90
7. Grossmann M, Bauer M, Hönle N, Käppeler U-P, Nicklas D, Schwarz T (2005) Efficiently Managing Context Information for Large-Scale Scenarios. In: Proceedings of the 3rd IEEE Conference on Pervasive Computing and Communications: PerCom2005, Kauai Island, Hawaii, 8.–12. März 2005
8. Hauser C (2004) Mobility Management Meets Privacy – the Failure of Existing Proposals and a New, Future-Proof Approach. In: Proceedings of the ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access, Philadelphia, PA, S. 122–124
9. Hähner J, Becker C, Rothermel K (2003) A Protocol for Data Dissemination in Frequently Partitioned Mobile Ad Hoc Networks. In: Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Computers and Communication (ISCC'03), Antalya, Turkey, S. 633–640
10. Hähner J, Dudkowski D, Marrón PJ (2004) A Quantitative Analysis of Partitioning in Mobile Ad Hoc Networks. In: Proceedings of the Joint International Conference on Measurement and Modelling of Computer Systems (Sigmetrics – Performance 2004), New York, USA, S. 400–401
11. Haehner J, Rothermel K, Becker C (2004) Update-Linearizability: A Consistency Concept for the Chronological Ordering of Events in MANETs. In: Proceedings of the First IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2004), Fort Lauderdale, Florida, USA
12. Jakob M, Grossmann M, Nicklas D, Mitschang B (2005) DCbot: Finding Spatial Information on the Web. In: Proceedings of the 10th International Conference on Database Systems for Advanced Applications (DASFAA)
13. Jøsang A (1997) Artificial Reasoning with Subjective Logic. In: Proceedings of the Second Australian Workshop on Commonsense Reasoning
14. Klinec D (2004) A model based approach for orientation in urban environments. In: Proceedings of the XXth Congress of the ISPRS, Vol. 35, Istanbul, S. 903–908
15. Kinatader M, Rothermel K (2003) Architecture and Algorithms for a Distributed Reputation System. In: Nixon P, Terzis S (Hrsg.) *Trust Management: First International Conference, iTrust 2003*, Heraklion, Crete, Greece, 28.–30. Mai 2003
16. Kubach U, Rothermel K (2001) Exploiting location information for infostation-based hoarding. In: Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01), Rom, Italien, Juli 2001, S. 15–27
17. Li J, Jannotti J, De Couto DSJ, Karger DR, Morris R (2000) A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing. In: Proceedings of the Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000), Boston, Massachusetts, USA, S. 120–130
18. Lück S, Gutsche A (2004) Improving Access Discovery by Analysing World-Model Information. In: 1. GI/ITG KuVS Fachgespräch „Ortsbezogene Anwendungen und Dienste“, Informatik Bericht 317, Fernuniversität Hagen, Juni 2004, S. 31–34
19. Maurer U (1996) Modelling a Public-Key Infrastructure. In: Proceedings of 1996 European Symposium on Research in Computer Security (ESORICS' 96), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1146, S. 325–350
20. Mumm A (1999) Analyse und Gestaltung von Werkzeugversorgungssystemen in der spanenden Fertigung. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen
21. Navas JC, Imielinski T (1997) GeoCast – Geographic Addressing and Routing. In: Proceedings of the Third Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '97), Budapest, Ungarn, September 1997, S. 66–76
22. Projekt-Homepage: <http://www.nexus.uni-stuttgart.de>
23. Nicklas D, Bernhard M (2004) On building location aware applications using an open platform based on the NEXUS Augmented World Model. In: Rumpe B, France R (Hrsg.) *Softw Syst Model* 3(4):303–313
24. Rothermel K, Bauer M, Becker C (2003) Digitale Weltmodelle – Grundlage kontextbezogener Systeme. In: Mattern F (Hrsg.) *Total vernetzt – Szenarien einer informatisierten Welt*. Xpert.press, Mai 2003, Springer-Verlag, S. 123–141
25. Gemäß Statistischem Bundesamt Deutschland, 5.12.2004
26. Tan K-L, Ooi BC (2000) *Data Dissemination in Wireless Computing Environments*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA
27. Westkämper E, Jendoubi L (2003) Smart Factories-Manufacturing Environments of the Future. In: 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Prof. H. Bley, Saarbrücken, S. 13–16
28. Westkämper E, Jendoubi L, Niemann. (2004) Smart Factory-Pervasive Information Technologies for Manufacturing Management. In: XV. Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining Systems, Karpacz, Poland, S. 13–20