



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Bastian Karstaedt

Kontextinterpretation in Smart Homes auf Basis
semantischer 3D Gebäudemodelle

Bastian Karstaedt

Kontextinterpretation in Smart Homes auf Basis
semantischer 3D Gebäudemodelle

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im Studiengang Informatik (Master)
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuende Prüferin : Prof. Dr. Ing. Birgit Wendholt
Zweitgutachter : Prof. Dr. rer. nat. Kai von Luck

Abgegeben am 11. April 2012

Bastian Karstaedt

Thema der Ausarbeitung

Kontextinterpretation in Smart Homes auf Basis semantischer 3D Gebäudemodelle

Stichworte

Indoor Location Awareness, 3D semantisches Gebäudemodell, BIM, IFC, 3D räumliche Analyse, Ubiquitous Computing, Indoorlokalisierung, Smart Home

Kurzzusammenfassung

Indoor Location Awareness (ILA) spielt in intelligenten Umgebungen, wie beispielsweise in Smart Homes, eine immer größere Rolle. Hierbei wird räumliches Kontextwissen zur Unterstützung multimodaler Interaktionsformen bereitgestellt. In dieser Arbeit wird hierzu ein *Indoor Spatial Information Service* (ISIS) realisiert, dessen Wissensbasis ein semantisches dreidimensionales IFC Gebäudemodell der Wohnumgebung bildet. Es wird gezeigt, dass sich semantische Modelle in hohem Maße für ILA eignen, da sie *geometrisches*, wie auch *symbolisches* Weltwissen in Form eines hybriden *Location Models* vereinen. ISIS erfüllt zwei Hauptaufgaben: 1. die *semantische Anreicherung* von Positionsdaten der Bewohner durch *Spatial Artefacts* und 2. die Beantwortung *räumlicher Serviceanfragen* (z.B. zur *räumlichen Suche* oder *Gesten-basierten Steuerung*) durch räumliche 3D Analysen.

Bastian Karstaedt

Title of the paper

Context interpretation in smart homes based on 3d semantic building models

Keywords

indoor location awareness, geometric location model, BIM, IFC, 3D semantic building model, 3D spatial analysis, spatial artefacts, indoor positioning, smart home

Abstract

Indoor location awareness (ILA) is becoming increasingly important in smart environments (e.g. smart homes), as it supports multimodal interactions by providing spatial context knowledge to other agents. Within this study an *Indoor Spatial Information Service* (ISIS) is realized, whose knowledge base is driven by a semantic three-dimensional IFC building model of the living environment. It is shown that semantic models are highly suitable for ILA, as they contain geometric as well as symbolic knowledge of the world, which form a hybrid *location model*. ISIS has got two main tasks: 1. semantic enrichment of resident's positioning data by employing *spatial artefacts* and 2. responding to spatial service requests (e.g. a *spatial search*) by 3d spatial analysis.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	6
1.1. Zukunftsvision <i>Wohnen</i>	6
1.2. Motivation	9
1.3. Ziele	11
1.4. Übersicht der Anforderungen	12
1.5. Gliederung	13
2. Indoor Location Awareness	14
2.1. Lokationstechnologien	15
2.2. Anforderungen an Location-aware Systeme	16
2.3. Location Model	16
2.4. Projekte	18
2.5. Zusammenfassung	21
3. Vergleichbare Arbeiten	23
3.1. Gebäudemodell-basierte Anwendungen in Smart Environments	24
3.1.1. Gebäudemodell-basierte Visualisierungen	24
3.1.2. 3D Gebäudemodelle als Basis für Mensch-Maschine-Schnittstellen	25
3.1.3. 3D Gebäudemodelle als Basis für Simulatoren in Smart Homes	26
3.2. BIM und GIS – Lieferanten semantischer 3D Gebäudemodelle	28
3.2.1. Die Evolution der Geoinformationssysteme	28
3.2.2. Die Evolution im Bauwesen	29
3.2.3. Gemeinsame Problemstellungen und Lösungswege	32
3.3. Räumliche Relationen	33
3.3.1. Räumliche Relationen in 2D und 3D	33
3.3.2. Formale Beschreibung	36
3.3.3. Räumliche Relationen in der menschlichen Wahrnehmung	38
3.3.4. Zusammenfassung	42
3.4. Erweiterte Modelle zur Kontextinterpretation in intelligenten Umgebungen	43
3.4.1. Spatial Artefacts	43
3.4.2. Ubiquitous Space Information Model	45
3.5. Fazit	45

4. Analyse	50
4.1. Szenarien	50
4.1.1. Multimodale Interaktionen	51
4.1.2. Location Based Media	52
4.1.3. Virtuelle Raumnotationen	53
4.1.4. Räumliche Suche	54
4.1.5. Activity Pattern Recognition	55
4.1.6. Zustandsabbild physischer Objekte	55
4.2. Anforderungsanalyse	56
4.2.1. Semantisches Geometriemodell zur räumlichen Analyse	56
4.2.2. Konsistenzwahrung zwischen virtuellem Modell und Realität	57
4.2.3. Kontinuierliche Aufenthaltsanalyse zur Anreicherung des räumlichen Kontextes	59
4.2.4. Analyse räumlicher Relationen durch Serviceanfragen	62
4.2.5. Technische Anforderungen	65
4.3. Fazit	68
5. Design und Evaluation	69
5.1. Gebäudemodellierung mit Smart Home-Anpassungen	69
5.2. Einbindung in die Systemumgebung	71
5.2.1. Kommunikation über das Blackboard	71
5.3. Wahl des Architekturmusters für den räumlichen Service	75
5.4. Architektur des räumlichen Services	78
5.4.1. Betrachtung der Schichten	79
5.4.2. Techniken, Tools und Bibliotheken	83
5.4.3. Architekturbewertung	85
5.5. Designentscheidungen	86
5.6. Evaluation	90
5.7. Zusammenfassung	96
6. Schluss	98
6.1. Zusammenfassung	98
6.2. Bewertung	101
6.3. Ausblick	104
Literaturverzeichnis	110
A. Anhang	122

1. Einführung

1.1. Zukunftsvision *Wohnen*

Der Wunsch, das Leben in den eigenen vier Wänden durch technische Hilfsmittel angenehmer zu gestalten, findet seinen Anfang gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Der Erfindergeist war aufgrund der stetig geringer werdenden Verbreitung an Hausdienern gefragter denn je und brachte neue Gerätschaften für den Haushalt hervor (nach [Harper \(2003\)](#) zitiert durch [Carner \(2009\)](#))).

Christine Frederick, eine amerikanische Hauswirtschafterin, die sich mit großem Engagement der effizienten Haushaltsführung widmete, schrieb 1923 vorausahnend:

„(...) the one way out of the servant problem in the future is the much wider use of power and machinery in the home. The servantless household will have to become more of a mechanical household, where every possible purely manual task is done by arms of steel or knuckles of copper. (...) And in the future it is believed that such machinery will be far more unified than at present. That is, instead of such small devices made by different firms and bought separately, there should be a larger installation or „system“ (scientifically) planned for a specific kitchen, with the various pieces related to one another. (...)“ – [Frederick \(1923\)](#)

Frederick erkannte, dass mit dem Einzug der Elektrizität effektive Gerätschaften die Hausarbeit vereinfachen werden. Darüber hinaus empfahl sie die Kopplung dieser Geräte untereinander – eine visionäre Vorahnung, an der heute mit Hochdruck in Form der *Heimautomation* gearbeitet wird.

Diese hält derzeit zunehmend Einzug in die Haushalte der Bürger, was insbesondere an der steigenden Anzahl kommerzieller Produkte deutlich wird (u.a. *Home easy*, *RWE SmartHome*, *HomeMatic* uvm.). Hierbei steht die *intelligente* Vernetzung der Geräte (Heizung, Waschmaschine, Mobiltelefon etc.) im Vordergrund, wobei eine der größten Hürden ein gemeinsamer Standard zur Kommunikation der Geräte untereinander ist (vgl. [Strese u. a. \(2011\)](#) S.8).

Während die Heimautomation aktuell Fokus kommerzieller Anbieter ist und hierfür zu Werbezwecken oftmals das Schlagwort *Smart Home*¹ verwendet wird, ist der Begriff in der wissenschaftlichen Literatur ambitionierter ausgelegt. Neben der Heimautomation wird von einem Smart Home zusätzlich die Fähigkeit zur *Context Awareness* gefordert (Choi u. a. (2008)), d.h. es sollte in der Lage sein, implizites, kontextuelles Wissen über die Bewohner und die Wohnumgebung zu erstellen. Konkret bedeutet dies, dass die Wohnumgebung mit Sensoren ausgestattet ist, um Aktivitäten zu registrieren (*Perception*), aus ihnen Schlussfolgerungen zu ziehen (*Reasoning*) und sich – falls gewünscht – entsprechend der Situation anzupassen (*Adaption*).

Smart Homes werden etwa seit Mitte der 1980er Jahre in Forschungseinrichtungen untersucht. Aktuelle Forschungsziele im Smart Home Umfeld sind (vgl. Strese u. a. (2011)):

- Erhöhen des Wohnkomforts
- Senken des Energieverbrauchs
- Steigern der Sicherheit
- Ambient Assisted Living (AAL)²

Weltweit gibt es eine Vielzahl von Forschungseinrichtungen, deren Fokus auf einem oder mehreren dieser Bereiche liegt (z.B. das *iHomeLab* der Hochschule Luzern, das *inHaus* der Fraunhofer Gesellschaft oder das *AgeLab* des MIT). Innovationen finden hier vor allem durch die komplexe Verknüpfung von Sensoren (Licht-, Temperatur-, Fall-, Positions-, Bewegungssensoren etc.) und Aktoren (Klima, Beleuchtung, Sound etc.) statt.

Ein digitales Gebäudemodell als Service zur Kontextanreicherung

Um der Wohnumgebung im Sinne der *Context Awareness* ein Verständnis über die aktuell ausgeführten Aktivitäten zu verschaffen, müssen u.a. Sensorinformationen (z.B. Bewegungs-, Licht- oder Drucksensoren) interpretiert werden. Hierzu sind *Modelle* notwendig, die entweder über einen Zeitraum erlernt werden oder der Kontexterkenkung als Wissensbasis von *vornherein* zur Verfügung stehen. Diese Modelle können unterschiedlichste Ausprägungen haben: u.a. *Ontologien* zur Begriffsmodellierung, Formeln zur Beschreibung physikalischer Sachverhalte, aber auch Raummodelle, deren Informationen in annotierten Raumentitäten enthalten sind oder aus ihnen abgeleitet werden können.

¹Synonyme: Smart House, eHome, Smart Living, intelligentes/vernetztes Wohnen

²AAL: Unterstützung älterer Personen im Alltag durch intelligente Technologie in der Wohnumgebungen.

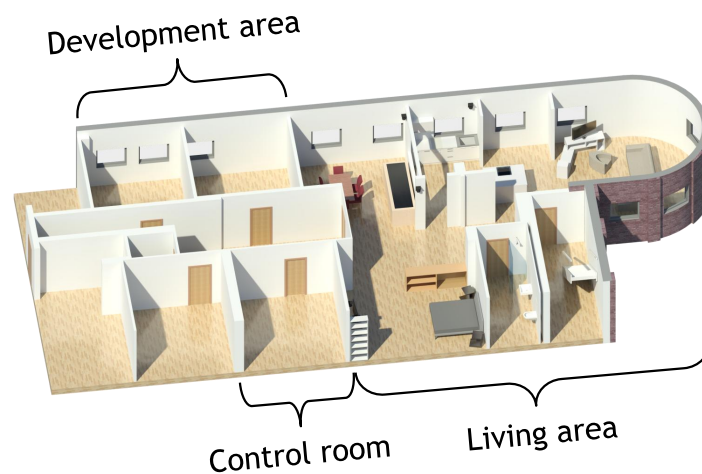


Abb. 1.1.: Living Place Hamburg – Smart Home Labor

In dieser Arbeit wird untersucht, welchen Beitrag *digitale, semantische Gebäudemodelle* zur Kontextanreicherung in intelligenten ubiquitären Umgebungen leisten können. Die hier vorgestellten Konzepte werden exemplarisch im Living Place Hamburg (von Luck u. a. (2010); siehe Abb. 1.1), einem Smart Home Labor, integriert und evaluiert.

Digitale Gebäudemodelle werden neben ihren ursprünglichen Einsatzgebieten (die im Bauingenieurwesen vor allem im *Planen, Bauen* und *Bewirtschaften* zu finden sind) heutzutage in vielen Bereichen eingesetzt (näheres siehe Kap. 3.1). Hierzu zählen insbesondere:

- Visualisierung
- Simulation
- Navigation und Lokalisierung
- Mensch-Maschine-Interaktion

In dieser Arbeit werden die Einsatzmöglichkeiten drei- bzw. multidimensionaler *semantischer Gebäudemodelle* in *Smart Home Umgebungen* untersucht, die über die bereits genannten Gebiete (*Visualisierung, Simulation, Navigation* und *Mensch-Maschine-Interaktion*) hinausgehen. Dabei sind *Gebäudesekundärstrukturen* („raumbildende Ausbauten“ wie Wände, Säulen etc.) von Relevanz. Insbesondere aber ist eine hochdetaillierte Innenraummodellierung inklusive Mobiliar, die nach Lömker (2006) zu den *Tertiärstrukturen* zählt, von vorrangiger Bedeutung. Im Fokus steht der Beitrag der Gebäudemodelle zur *Kontextinterpretation* im Sinne der *Indoor Spatial Awareness* mit dem Ziel, einen Mehrwert für die Bewohner eines Smart Homes zu bieten.

Im folgenden Abschnitt werden Hintergründe, Ideen und Beispielanwendungen für Gebäudemodelle in Smart Homes erörtert.

1.2. Motivation

Der Autor dieser Arbeit befasste sich in [Karstaedt \(2009\)](#) mit der semantischen Anreicherung zweidimensionaler Flurpläne zur anschließenden Verwendung in Besucherinformationssystemen. Hier wurden erste Kenntnisse im Hinblick auf semantische, dreidimensionale Stadt- und Gebäudemodelle (CityGML, Green Building XML, IFC etc.) erworben.

Mit der Teilnahme am Smart Home Projekt *Living Place Hamburg*³ der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg entstanden schließlich folgende Fragestellungen:

*In welcher Art und Weise kann ein Gebäudemodell
als Basis zur semantischen Kontextanreicherung dienen?*

*Welchen Nutzen bringt dies für eine vereinfachte
Mensch-Maschine-Interaktion?*

Von entscheidender Bedeutung hierbei sind die nach [Abowd u. a. \(1999\)](#) im Sinne der *Context Awareness* geforderten *Kontextinformationen*. Insbesondere der *Aufenthalt* von Bewohnern stellt hier eine wichtige kontextuelle Information dar (z.B. für Location-based Services). Dies wird auch von [Brumitt u. a. \(2000\)](#) im Paper „*Ubiquitous Computing and the Role of Geometry*“ betont, das gleichermaßen die Grundidee dieser Arbeit widerspiegelt:

„(...) a fundamental unifying aspect of a ubiquitous computing environment is a representation of the physical relationships between people, things, and devices – in other words, a geometric model.“
– [Brumitt u. a. \(2000\)](#)

In ihrem Paper zeichnen sie eine Ideenskizze, bei der räumliches Wissen aus einem geometrischen „Weltmodell“ verwendet wird, um in ubiquitären Umgebungen die Relationen von Personen, Dingen und Gerätschaften als gewinnbringendes Kontextwissen einzusetzen.

Die Grundlage für die von [Brumitt u. a.](#) geschilderten ubiquitären Systeme, die auf Ortsinformationen aufbauen, bildet die *Location Awareness*. Angelehnt an die Definition der Context Awareness durch [Abowd u. a. \(1999\)](#), kann Location-aware Computing als das *Verwenden von Ortsinformationen* bzw. das *Anpassen an den Aufenthalt* von Personen, Diensten und Objekten angesehen werden. Hierfür ist zunächst eine genaue Aufenthaltsbestimmung der Bewohner durch ein oder mehrere Lokalisationssysteme und auch indirekte Verfahren⁴ erforderlich. Außerdem erfordert es ein sogenanntes *Location Model*, das über symbolische Repräsentationen oder Geometrien Aussagen über den Aufenthalt macht (Details hierzu s. Kap. 2).

³Webseite: <http://www.livingplace.org>

⁴Z.B. das Authentifizieren einer Person an einem Computer, dessen Aufenthalt bekannt ist.

In dieser Arbeit werden semantische 3D Gebäudemodelle, wie sie im Bauingenieurwesen bzw. BIM⁵ (IFC u.a.) oder in GIS (CityGML u.a.) eingesetzt werden, auf ihre Eignung als *Location Model* in intelligenten Umgebungen geprüft. Hierzu soll ein Service entwickelt werden, der nicht nur konkrete Aussagen über den aktuellen Aufenthalt von Personen macht (z.B. „Jan sitzt auf dem Sofa in der Lounge.“), sondern auch in der Lage ist, auf Basis des detaillierten Gebäudemodells räumliche 2D und 3D Anfragen zu beantworten. Zur Veranschaulichung folgt hierzu ein Beispielszenario.

Beispielszenario – Sals Morgenroutine

Das folgende Szenario dient zur Verdeutlichung der zwei Hauptanwendungsgebiete eines räumlichen Services – die semantische Anreicherung des Aufenthalts von Bewohnern und räumliche Serviceanfragen. Hierzu wird ein Ausschnitt aus der Morgenroutine von „Sal“, der Bewohnerin einer intelligenten Wohnung (adaptiert von [Weiser \(1991\)](#)), betrachtet. Weitere Szenarien finden sich in Kap. 4.1.

Sals Morgenroutine Sal steht früh am Morgen auf. Der Fernseher schaltet sich ein und zeigt die Nachrichten. Sie geht *in die Küche*, um zu frühstücken – die Nachrichten „folgen“ ihr zum nächstgelegenen Bildschirm. Mit einer Geste *in Richtung Küchenlampe* dimmt sie das Licht ein wenig. Sie sucht ihre Brille, um die Zeitung zu lesen, kann sie aber nicht finden und fragt die Wohnung nach ihrem Aufenthaltsort. „Deine Brille liegt *im Schlafzimmer auf dem Nachttisch neben dem Bett*“, ertönt es.

Um die Nachrichten auf den passenden Bildschirmen anzuzeigen, ist eine semantische Anreicherung der Ortskoordinaten von Sal erforderlich. Raumpunkte (z.B. in kartesischen Koordinaten $(X; Y; Z)$ wie sie Lokalisationssysteme liefern) sind in diesem Szenario nicht ausdrucksstark genug, um Softwareagenten die Wahl eines geeigneten Bildschirms zu ermöglichen. Die Raumpunkte sind also in Relation mit Entitäten des semantischen Gebäudemodells zu setzen, sodass die Information „Sal ist in der Nähe von Bildschirm 3“ für beteiligte Softwareagenten bereitgestellt werden kann.

Um das Zielobjekt der Geste zum Dimmen des Lichtes zu erkennen, ist zunächst die Bestimmung von Position und Richtung der Geste erforderlich. Anhand dieser Daten kann eine räumliche Serviceanfrage an das geometrische Modell gestellt werden. Eine dreidimensionale räumliche Analyse liefert nun die in Richtung der Geste befindlichen Entitäten zurück, sodass durch die Verknüpfung von Geste und selektiertem Objekt eine Steuerung desselben stattfinden kann.

Bei der *räumlichen Suche* nach der Brille wird ebenfalls eine Serviceanfrage gestellt, bei der nun entsprechend des Fundortes der Brille (z.B. an Raumpunkt $(4.2; 8.2; 3.3)$) durch eine

⁵BIM: Building Information Modelling

geometrische Analyse die räumlichen Relationen in der Nähe befindlicher Entitäten extrahiert werden. Das Antwortergebnis wird daraufhin durch eine Sprachausgabe mitgeteilt.

1.3. Ziele

Digitale Gebäudemodelle werden, wie bereits erwähnt, in einer Fülle von Anwendungsgebieten eingesetzt. Diese Arbeit soll dem wissenschaftlichen Kontext ein neues Anwendungsfeld für *semantische 3D Gebäudemodelle* hinzufügen: Kontextanreicherung und -interpretation in *Smart Homes* auf Basis räumlicher Analysen.

Die Aspekte semantischer Anreicherungen auf Basis des Gebäudemodells sind klar zu strukturieren. Ebenso sind konkrete Anwendungsfälle aufzuzeigen und zu kategorisieren, um eine Einordnung des räumlichen Services in das Feld der *Ambient Awareness* bzw. *Indoor Location Awareness* zu liefern. Konkret ist ein *Indoor Spatial Information Service* (ISIS) zu entwickeln und im realen Wohnlabor *Living Place Hamburg* zu testen. Die im folgenden Abschnitt *Übersicht der Anforderungen* eingeführten Aspekte des Services (*Kommunikation, Visualisierung, Persistenz, Analyse und Modifikation*) sind detaillierter zu untersuchen und umzusetzen. Der Schwerpunkt liegt hier auf der Analyse in 2D und 3D.

Des Weiteren ist über die Integration diverser Sensorinformationen des *Living Place Hamburg* der aktuelle Zustand physischer Gegenstände im Modell abzubilden, sodass ISIS darauf basierend als *Broker für semantische Informationen* dienen kann, welche bspw. einer Regelmaschine zur Extraktion kontextbasierter Interpretationen dienen können.

Abgrenzung

Als Teilsystem eines Konglomerats verschiedenster Softwaresysteme im Smart Home hat der räumliche Service eine klar abgegrenzte Aufgabenstruktur. Der Fokus liegt hier in der räumlichen Analyse und der Kenntnis über den Status der Gegenstände der Umgebung. Dieses Kontextwissen wird anderen Systemen über Schnittstellen zur Verfügung gestellt. Eine weitere Verarbeitung der Informationen darüber hinausgehend findet *nicht* statt.

Hierzu zählt *jegliche Weiterverarbeitung* der Informationen, z.B. in Form von:

- Steuerung der Aktoren (Ton, Bildschirme, Licht, Klima etc.)
- Multimodale Interaktionen (gestenbasierte Steuerung, Spracherkennung etc.)
- Bilderkennungsverfahren
- Activity Pattern Recognition

Ortsinformationen der Bewohner sind in einigen Szenarien erforderlich. Der räumliche Service tritt aber lediglich als *Konsument* dieser Informationen auf. Eine Verbesserung der Lokalisierungsergebnisse durch das Gebäudemodell (wie z.B. in [Woodman und Harle \(2008\)](#) und [Becker u. a. \(2009\)](#)) findet nicht statt, ist aber in weiterführenden Arbeiten geplant, die auf dem räumlichen Service aufbauen werden ([Meyer \(2012\)](#)).

Messwerte über den Zustand von Gegenständen werden von externen Sensorsystemen bereitgestellt. Die Sensorinformationen werden lediglich semantisch angereichert, aber keiner tiefergehenden Analyse unterzogen.

1.4. Übersicht der Anforderungen

Für die Realisierung eines räumlichen Services ergeben sich diverse grundlegende Anforderungen und technische Fragestellungen, die im Folgenden erörtert werden (eine detaillierte Analyse hierzu findet in Kap. 4 statt). Als Basis des Services wird zunächst ein *digitales Gebäudemodell* benötigt. Hier steht die Wahl des Standards im Vordergrund:

- Welcher Standard der semantischen 3D Gebäudemodellierung ist geeignet?
- Wie einfach lässt sich der Standard um Smart Home Anforderungen erweitern?
- Welche Bibliotheken sind vorhanden (zum Modifizieren, Persistieren, Visualisieren)?

Für die Einbindung eines räumlichen Services in die Kommunikationsinfrastruktur eines Smart Homes sind (software-)technische Rahmenbedingungen einzuhalten, die von der eingesetzten Technologie abhängig sind. In sensorreichen Umgebungen hat sich hierbei eine *Blackboardarchitektur* als sinnvolle Problemlösungsstrategie erwiesen (vgl. [Otto und Voskuhl \(2010\)](#)). Das Design des räumlichen Services ist daher an diese Architektur gebunden.

Die *funktionalen Anforderungen* an einen räumlichen Service ergeben sich aus den bereits erwähnten Anwendungsbeispielen und Grundvoraussetzungen des Smart Home Umfeldes. Ohne im Detail auf einzelne Anforderungen einzugehen, werden im Folgenden die hierzu erforderlichen Komponenten kurz erläutert (vgl. [Karstaedt \(2011\)](#)):

Kommunikation Der Service ist in eine *Blackboardarchitektur* zu integrieren, wobei er als *Konsument* und *Produzent* von Informationen agiert und in Form eines *Dienstleisters für semantische Anfragen* eingesetzt wird.

Visualisierung Eine Visualisierung des Gebäudemodells soll ein optisches Feedback über den momentanen Zustand und die aktuellen Änderungen bieten und als Testumgebung dienen.

Persistenz Das Gebäudemodell ist zentral zu verwalten und nach Änderungen zu sichern.

Analyse und Modifikation Es ist ein Modul zu realisieren, das Änderungen *an* und räumliche (2D und 3D) Abfragen *auf* ein Gebäudemodell ermöglicht.

Räumliche Analysen in 2D und vor allem in 3D sind wichtige Eigenschaften des räumlichen Services und grundlegend für den Beitrag zur *Location Awareness*. Daher ist zu untersuchen, ob vorhandene 2D und 3D Algorithmen sowie Datenstrukturen zur räumlichen Analyse eingesetzt werden können und welcher Detailgrad (2D/3D) im Hinblick auf die Performanz angemessen ist.

1.5. Gliederung

Nachfolgend wird zunächst auf das für diese Arbeit wichtige Gebiet der *Indoor Location Awareness* eingegangen und damit die Grundlage dieser Arbeit gelegt.

In den *vergleichbaren Arbeiten* wird Literatur verwandter Themengebiete analysiert. Hierzu wird zunächst der *Einsatz dreidimensionaler Gebäudemodelle in intelligenten Umgebungen* aktueller Projekte dargestellt. Dabei werden vor allem die Bereiche Visualisierung, Simulationen und Mensch-Maschine-Schnittstelle untersucht. Daraufhin wird die semantische Gebäudemodellierung aus den Forschungsgebieten BIM und GIS verglichen. Anschließend werden die für diese Arbeit wichtigen räumlichen Relationen in 2D und 3D, sowie ihre Ausprägungen in der menschlichen Raumwahrnehmung betrachtet. Letztlich werden erweiterte Modelle zur Kontextinterpretation untersucht.

In der *Analyse* werden zunächst eine Reihe an *Szenarien* beschrieben, deren Umsetzung auf Basis des räumlichen Services angestrebt wird. Diese werden anschließend einer detaillierten Betrachtung unterzogen, die sich grundlegend in die Bereiche „semantisches Raummodell“, „Konsistenzwahrung“, „kontinuierliche Aufenthaltsanalyse“ und „räumliche Serviceanfragen“ unterteilt und mit einer technischen Anforderungsbetrachtung endet.

Im Kapitel *Design und Evaluation* wird zunächst die Einbindung des räumlichen Services in die Kommunikationsinfrastruktur des Smart Home beschrieben. Daraufhin wird auf das Design des Services im Detail eingegangen, indem zunächst die Architektur und anschließend wichtige Designentscheidungen besprochen werden. Um die Leistungsfähigkeit nachzuweisen, findet schließlich eine *Evaluation* des räumlichen Services statt.

Im *Schlusskapitel* werden die Resultate dieser Arbeit zusammengefasst und bewertet. Letztlich erfolgt ein umfangreicher Ausblick auf mögliche zukünftige Arbeiten auf Basis der hier erbrachten Ergebnisse.

2. Indoor Location Awareness

„(...) *Mobility naturally leads to the need for location-awareness.*“

– Leonhardt (1998)

Indoor Location Awareness ist die Fähigkeit eines Systems, sich entsprechend des Aufenthalts von Personen oder mobilen Objekten innerhalb von Gebäuden anzupassen. Sie vermittelt Anwendungen Umgebungs- bzw. Kontextwissen, und kann als Teilbereich der *Context Awareness* betrachtet werden.

Context Awareness wird als „enabling technology“ verstanden, d.h. dass es andere Modelle bzw. Paradigmen, wie z.B. *Ambient Intelligence* und *Ubiquitous/Pervasive Computing* in verschiedenem Maße bei der Realisierung ihrer Ziele unterstützt. Abowd u. a. (1999) verstehen unter *Context-aware Computing* das *Verwenden von Kontext* bzw. das *Anpassen auf Kontext*. Die Klassifikation, welche Informationen zum Kontext beitragen, wird von Abowd u. a. wie folgt pragmatisch formuliert:

„*If a piece of information can be used to characterize the situation of a participant in an interaction, then that information is context.*“ – Abowd u. a. (1999)

Ortsinformation gelten als wichtiger Bestandteil einer kontextuellen Beschreibung (vgl. 5W1H-Methode¹). Dieser Sachverhalt wurde mit dem Aufkommen von Lokationssystemen in Form von *Location-based Services*, zunächst im Outdoor- und schließlich auch im Indoorbereich, bedeutsam.

Lokationstechnologien für den Innenraum finden ihre Ursprünge zu Beginn der 1990er Jahre. Das *Active Badge* Projekt (Want u. a. (1992)) gilt als eines der ersten seiner Art. Ortungstechnologien waren die entscheidende Triebkraft für Location-aware Applikationen. Daher findet zunächst ein kurzer Exkurs in die unterschiedlichen Technologien statt. Anschließend werden die grundlegenden Anforderungen an Location-aware Systeme vorgestellt. Zu ihnen zählt das *Location Model*, dessen Bedeutung aufgrund seiner hohen Relevanz in dieser Arbeit genauer betrachtet wird. Daraufhin werden einige Projekte mit Location Awareness-Bezug vorgestellt und letztlich ein Fazit der gewonnenen Erkenntnisse gezogen.

¹Die 5W1H- oder Kipling Methode wird zur Beschreibung einer *Situation* herangezogen. 5W1H steht hierbei für: Wer? Was? Wo? Wann? Warum? Wie?

2.1. Lokationstechnologien

Informationen über den Aufenthalt von Personen oder Objekten müssen nicht zwangsläufig einem Lokalisationssystem entstammen. Die Kenntnisse über den Aufenthalt können auch *implizit* abgeleitet werden, z.B. wenn sich eine Person an einem Computer anmeldet.

Feingranularere Informationen stellen hingegen Lokalisationssysteme bereit. Sie basieren entweder auf *absoluten* (GPS, Ubisense u.a.) oder *relativen* Ortsdaten – bei Letzterem hat jedes Objekt seinen *eigenen* Referenzrahmen. Derzeit existieren drei grundsätzliche Ortungsverfahren (vgl. [Hightower und Borriello \(2001\)](#), [Abdat u. a. \(2010\)](#)) Indoor sowie Outdoor:

Proximity Der Aufenthalt innerhalb der *Zone*, die von einem Sensor abgedeckt wird, ist bekannt. Hierzu zählen z.B. GSM, RFID oder auch Bewegungs- und Drucksensoren.

Triangulation Anhand mehrerer Referenzpunkte wird durch geometrische Berechnungen auf Basis der Abstände zum lokalisierten Objekt die Position ermittelt. Der Abstand wird u.a. mit RSS (*received signal strength*), TOA (*time of arrival*), TDOA (*time difference of arrival*) oder RTOF (*roundtrip time of flight*) ermittelt.

Scene Analysis/Fingerprinting Bei diesen Verfahren werden in einer Trainingsphase zunächst die Signalstärken der verteilten *Access Points* an unterschiedlichen Orten gemessen und in einer Tabelle gespeichert. Bei der eigentlichen Aufenthaltsbestimmung werden die empfangenen Signalstärken mit der Tabelle abgeglichen.

Des Weiteren sind die *Inertial Measurement Units* (IMU) zu nennen, bei denen der Aufenthalt auf Basis am Körper getragener Gyroskope und Beschleunigungssensoren ermittelt wird. Aufgrund akkumulierender Fehler sind diese jedoch nicht sehr präzise. Aktuelle Arbeiten befassen sich außerdem mit *optischen System* (u.a. [Mautz und Tilch \(2011\)](#), [Fleuret u. a. \(2008\)](#)) – insbesondere bei mehreren Personen ist die Fehleranfälligkeit jedoch noch hoch.

Aufgrund der Vielfalt der teilweise parallel eingesetzten Lokationstechnologien und der jeweiligen Ortsdaten fordern [Brumitt u. a. \(2000\)](#) die Einführung einer Einheit, die als Abstraktionsschicht die zu Grunde liegenden Lokalisationstechniken verbirgt und Anwendungen nur mit den jeweils *relevanten* Positionsinformationen versorgt, ohne dass diese die konkret eingesetzte Technologie kennen müssen.

Positionsinformationen können zur Weiterverarbeitung entweder in Form von *Raumpunkten* (z.B. 47°39'17''N zu 122°18'23''W) vorliegen oder in abstrakterer Weise durch *symbolische* Ortsinformationen (z.B. „in der Küche“). Letztere Informationen werden von [Hightower und Borriello \(2001\)](#) als *Symbolic Locations* bezeichnet und in einer von [Dobson \(2005\)](#) erstellten Taxonomie zur Aufenthaltsbeschreibung auch als *Named Space* (z.B. „Raum 233b“) und verallgemeinert als *Named Class* (z.B. „Konferenzraum“). Im Folgenden wird vornehmlich die Terminologie *Symbolic Location* verwendet.

2.2. Anforderungen an Location-aware Systeme

In seiner Dissertation beschreibt [Leonhardt \(1998\)](#) (S.17) die Anforderungen zur Unterstützung der Location Awareness in einem verteilten System wie folgt:

Architecture Eine Location Awareness fähige Plattform sollte offen für heterogene Sensorsysteme und Applikationen sein und bei steigender Anzahl an Anwendungen und mobiler Objekte gut skalieren.

Security Location Awareness und die Geheimhaltung des Aufenthaltsortes aus Datenschutzgründen sind konträre Anforderungen. Die Plattform sollte daher eine feingranulare Kontrolle ermöglichen.

Location Model (LM) Das LM sollte eine ausdrucksstarke, flexible und effiziente Repräsentation mobiler Objekte ermöglichen und unabhängig von der Anwendungsdomäne und des Lokalisationssystems sein. Weiterhin sollte es geeignet für eine Visualisierung sein. [Becker und Dürr \(2005\)](#) fordern vom LM außerdem, dass es vier Arten an Anfragen beantworten können sollte:

- *Position* – Wo befindet sich eine Person/Objekt?
- *Nearest Neighbor* – Welche n Personen/Objekte sind am nächsten gelegen?
- *Navigation* – Wie gelange ich von A nach B?
- *Range* – Welche Pers./Obj. befinden sich in einem geographischen Areal?

Für diese Arbeit ist in erster Linie das Ortsmodell (*Location Model*) von Interesse, das den Kern des räumlichen Services bildet. Daher wird dieses im Folgenden detaillierter erörtert. Die *Architektur* der Systemumgebung wird durch externe Faktoren bestimmt und die Sicherheit bzw. der Datenschutz spielt in dieser Betrachtung eine untergeordnete Rolle.

2.3. Location Model

„Whenever applications or users are interested in objects depending on their location or spatial relationship, location models are required in order to provide notions about distances or ranges.“
– [Becker und Dürr \(2005\)](#)

Die Modellierung von Ortsinformationen in Form eines *Location Model* ist essentiell für die Qualität von Anwendungen mit Location Awareness ([Domnitcheva \(2001\)](#)). Hierbei finden sich in der Literatur vor allem zwei Modelle, die teilweise auch in hybriden Varianten auftreten (vgl. [Leonhardt \(1998\)](#), [Domnitcheva \(2001\)](#), [Becker und Dürr \(2005\)](#)):

1. **Geometrische Modelle** besitzen ein globales Koordinatensystem (und ggf. mehrere Subkoordinatensysteme) mit absoluten Positionsinformationen in denen Orte und Objekte durch geometrische Ausprägungen (Punkt, Areal, Volumen etc.) charakterisiert sind. Nach [Domnitcheva](#) ist weiterhin eine separate *Location Directory* („Aufenthaltsliste“) und *Mapping Service* (Abbildung „Raumpunkt zu Symbolic Location“) erforderlich – dies ist eine Teilaufgabe des in dieser Arbeit zu realisierenden räumlichen Services.
2. **Symbolische Modelle** verwenden abstrakte Symbole und Beziehungsangaben für Ortsbeschreibungen. Hierzu zählen die bereits erwähnten *Symbolic Locations*. In diesem Modell werden Orte in (teils hierarchischen) Listen geführt und Objekte als Elemente der Listen hinzugefügt. [Leonhardt](#) unterscheidet zwischen Zell- (GSM, IR etc.), Zonen- (nicht überschneidend) und Domänenmodellen (vgl. Abb. 2.1).

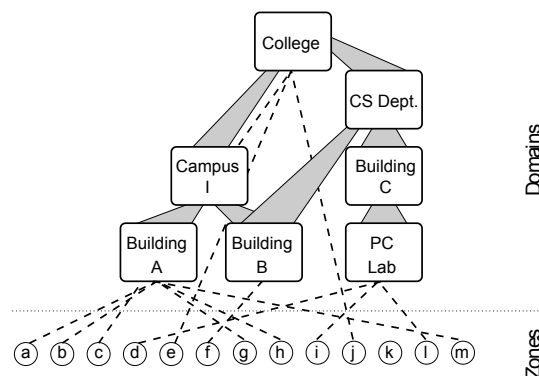


Abb. 2.1.: Mapping von Zonen- auf Domänenmodell (Quelle: [Leonhardt \(1998\)](#))

[Becker und Dürr \(2005\)](#) unterteilen die symbolischen Modelle wiederum in *Set-based*, *Graph-based* und *hierarchisch*. Diese unterscheiden sich in ihrer Fähigkeit die im vorigen Kapitel formulierten räumlichen Analysefähigkeiten zu erfüllen.

[Becker und Dürr](#) heben weiterhin hervor, dass zusätzliche *geometrische* Informationen 1. die Genauigkeit insbesondere bei Distanzabfragen erhöhen und 2. beliebige Formen für *Nearest Neighbor* Abfragen definiert werden können. Rein geometrische Modelle hätten jedoch u.a. den Nachteil, dass mit ihnen keine Aussage über „connectedTo“ Assoziationen möglich sind.

Daher schlagen [Leonhardt](#) sowie [Becker und Dürr](#) jeweils die Verwendung eines *hybriden Location Models* vor, um die Vorteile der symbolischen und geometrischen Modelle zu vereinigen. Dies gehe jedoch mit dem Nachteil einher, dass sich der Modellierungsaufwand verdoppelt, da symbolisches und geometrisches Modell separat modelliert werden müssen.

2.4. Projekte

Abschließend werden zwei Projekte vorgestellt, die mit Hinblick auf das eingesetzte Daten- bzw. *Location Model*, die verwendeten *Lokationstechnologien* und ihre *Anwendungsbereiche* untersucht werden.

Hier nicht genauer betrachtet, aber dennoch erwähnenswert, sind die Projekte von Nexus, Cooltown (Hewlett Packard Labs), RAUM, CRICKET, EasyLiving Project (Microsoft Research) und LOC8 (Stevenson u. a. (2010)).

Becker und Dürr (2005) haben in ihrem Papier „On location models for ubiquitous computing“ weitere Projekte aufgelistet und sie u.a. nach Modellierungsaufwand, eingesetztem Location Model und räumlicher Analysefähigkeit hin verglichen.

Das *Active Badge* Projekt

Im *Active Badge* Projekt von Want u. a. (1992) wurde eines der ersten Indoor-Lokationstechnologien seiner Art entwickelt. Es basierte auf einem hybriden Infrarot-/Radiosystem – die lokalisierte Person wird mit einem Transponder ausgestattet, dessen Position von Sensoren, die über das gesamte Gebäude verteilt sind, zentimetergenau aufgelöst wird. Zunächst stand das Projekt unter der Leitung der Olivetti Research Limited (ORL); diese wurde von den AT&T Labs übernommen und an der University of Cambridge von Professorin Yoneki weitergeführt. Zuletzt wurde das Lokationssystem unter dem Namen *Active BAT* geführt, das nun auf einer Ultrasound Time-of-Flight Laterationstechnik basierte und präzisere Ergebnisse lieferte.

Im Papier Want u. a. (1992) wird das Problem des effektiven Auffindens und Koordinierens von Personal, wie es insbesondere in Krankenhäusern aufkommt, thematisiert. Zur Lösung dieses Problems wurde das *Active Badge* System eingesetzt, um eine Tabelle bestehend aus den Namen, einer sich dynamisch ändernden Spalte der nächstgelegenen Telefone und einer weiteren Spalte mit Informationen über die Wahrscheinlichkeit des Aufenthalts zu verwalten (siehe Abb. 2.2).

Der Begriff des *Location Model* war damals als wissenschaftliche Terminologie noch nicht gängig. Dennoch kann man auch hier von einem LM sprechen, wenngleich es sehr einfach strukturiert ist. Die anfallenden Daten wurden schlicht als Tupel aus (*badge-ID, location(domain name, network address, sensor address), time*) verwaltet. Erste Überlegungen zu ausdrucksstärkeren Datenstrukturen wurden aber bereits vorhanden:

„Further enhancements to the system could be considered if the server had a component that knew about the layout of a building and the sensors within it.“
– Want u. a. (1992)

ORL/STL Active Badge Project					
Name	Location	Prob.	Name	Location	Prob.
P Ainsworth	X343 Accs	100%	J Martin	X310 Mc Rm	100%
T Blackie	X222 DVI Rm.	80%	O Mason	X307 Lab	77%
M Chopping	X410 R302	TUE.	D Milway	X307 Drill	AWAY
D Clarke	X316 R321	10:30	B Miners	X202 DVI Rm.	10:40
V Falcao	X218 R435	AWAY	P Mital	X213 PM	11:20
D Garnett	X232 R310	100%	J Porter	X398 Lib.	100%
J Gibbons	X0 Rec.	AWAY	B Robertson	X307 Lab	100%
D Greaves	X304 F3	MON.	C Turner	X307 Lab.	MON.
A Hopper	X434 AH	100%	R Want	X309 Meet. Rm.	77%
A Jackson	X308 AJ	90%	M Wilkes	X300 MW	100%
A Jones	X210 Coffee	100%	I Wilson	X307 Lab.	100%
T King	X309 Meet. Rm.	11:20	S Wray	X204 SW	11:20
D Lioupis	X304 R311	100%	K Zielinski	X402 Coffee	100%

12.00 1st January 1990

Abb. 2.2.: Terminal mit Name, Aufenthaltsort und -wahrscheinlichkeit von Personal
(Quelle: [Want u. a. \(1992\)](#))

In [Harter und Hopper \(1994\)](#) des ORL wurden die Aktivitäten unter der Bezeichnung *Active Office* subsummiert. Eine der Hauptanwendungen, der *Follow-me Service*, veranlasste Anwendungen ihren Nutzern von einem zum anderen Computer zu folgen. Aber auch das Auffinden von Personen, Orten und Equipment über eine Kommandozeilenabfrage wurde realisiert.



Abb. 2.3.: 3D Visualisierung
(Quelle: [Harter u. a. \(1999\)](#))

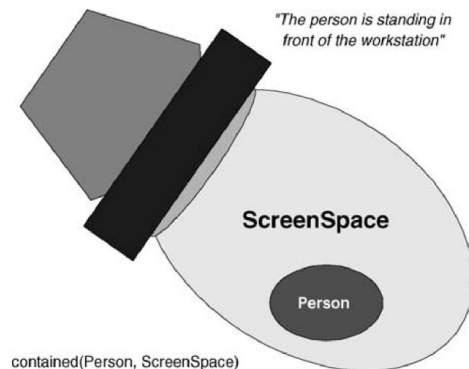


Abb. 2.4.: TV mit „ScreenSpace“
(Quelle: [Harter u. a.](#))

In [Harter u. a. \(1999\)](#) wurde das LM und die Gesamtarchitektur ausgefeilt. Durch eine eigens entwickelte Programmiersprache wurde das als Entity-Relationship-Modell repräsentierte Datenmodell in einer Relationalen Datenbank persistiert und mittels Objektrelationalem Mapping (wie man es heutzutage z.B. von *Hibernate* kennt) in Java-Objekte transformiert. Über einen in CORBA implementierten Event-basierten Mechanismus konnten sich andere Softwareeinheiten über bestimmte Vorkommnisse benachrichtigen lassen. Im Modell wurden u.a. Personen, Computer, Bildschirme, Telefone sowie Mobiliar modelliert. Nicht nur Personen, sondern auch Computer wurden mit Badges/Bats ausgestattet – Letz-

tere sogar mit zwei Exemplaren, um die Ausrichtung zu berechnen.

Zur Visualisierung wurde ein 3D Modell erstellt, das in Echtzeit mit Updates versorgt wurde (s. Abb. 2.3). Des Weiteren hat ihr System eine „Spatial Monitor“ genannte Komponente, die in der Lage ist *absolute spatial Facts* (Raumpunkte) in *relative spatial Facts* bzw. Symbolic Locations zu überführen. Zusammen mit zusätzlichen Bereichen, mit denen z.B. Bildschirme annotiert sind (s. Abb. 2.4), ergibt sich die Möglichkeit Anwendungen mit Informationen wie „Person X bewegt sich auf Bildschirm Y zu“ zu versorgen.

Arbeiten von Ichiro Satoh

Prof. Ichiro Satoh kann vergleichsweise viele Veröffentlichungen² im Bereich der Location Awareness vorweisen. In seinen Arbeiten beschäftigte er sich intensiv mit der Entwicklung eines symbolischen Location Modells für intelligente Umgebungen (u.a. Satoh (2007), Satoh (2009)).

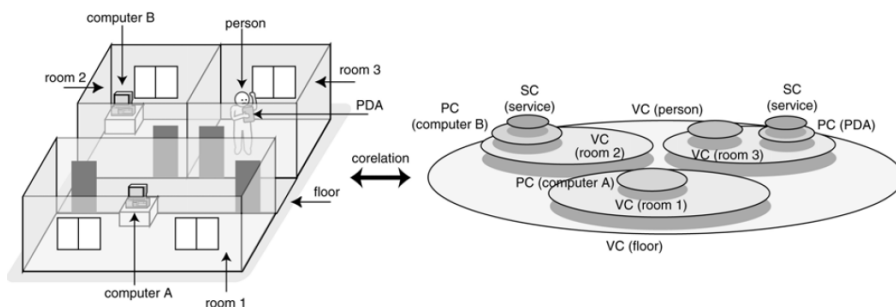


Abb. 2.5.: Physisches Weltmodell (links) entsprechendes Location Model
(Quelle: Satoh (2007))

Das von ihm vorgestellte LM wird durch einen azyklischen Graphen repräsentiert, dessen Aufbau die Topologie eines Stockwerkes widerspiegelt (vgl. Abb. 2.5). Bei dieser Baumstruktur ist jeder Knotenpunkt Instanz einer der vier Typen, die im Folgenden vorgestellt werden:

Virtual counterpart component (VC) ist eine digitale Repräsentation einer realen Entität (Person, Objekt, Raum etc.).

Aura component (AC) ist der virtuelle oder semantische Raum, der eine physische Entität (z.B. Lautsprecher) oder ein *Computing Device* umgibt.

Proxy component (PC) verbindet das Location Model und die *Computing Devices* und bewahrt somit die strukturelle Integrität. Die PC führt außerdem Dienste der SC aus.

²Veröffentlichungen von Ichiro Satoh werden auf seiner Webseite unter <http://research.nii.ac.jp/~ichiro/> aufgeführt.

Service component (SC) ist ein Softwaremodul, das anwendungsspezifische Dienste definiert, die mit physischen Entitäten oder Orten assoziiert sind.

Das Zusammenspiel der Komponenten soll an einem für Location-aware Systeme typischen *Follow-me Servicebeispiel* verdeutlicht werden: das Modell assoziiert zunächst einen Benutzer mit einem VC mit zwei Computern mit PCs. Die PCs wiederum enthalten ACs, die z.B. den Sichtbarkeitsbereich repräsentieren. Bewegt sich ein Benutzer in einen AC, wird sein VC mit dem AC verknüpft. Über den AC kann nun der „Vaterknoten“, also der PC, ausfindig gemacht werden, der schließlich veranlasst, dass z.B. der Desktopinhalt des Benutzers über den PC angezeigt wird.

Im in [Satoh \(2007\)](#) vorgestellten Live-System wurden vier Tag-basierte Lokationstechnologien eingesetzt: ein IR-System (*Eipa*), ein aktives RF-System (Code's Spider), ein passives RFID-System (*Alien Technology*) und ein Wifi-basiertes System. Bei Letzterem, das das einzige „Nicht-Proximity“ Verfahren darstellt, wird die geometrische Position der Wifi Tags mittels TDoA berechnet und anschließend mit einer symbolischen Komponente assoziiert. Wie dieses Mapping funktioniert, wird nicht näher erläutert.

Neben dem Follow-me Service werden außerdem zwei weitere Anwendungsbeispiele genannt: ein *Location-based* Navigationssystem, bei dem auf einem PDA o.ä. der aktuelle Flurplan und vorhandene Dienste angezeigt werden und der *Personal Server*, bei dem der Anwender einen tragbaren Filesharing Server ohne Userinterface mitführt, der Daten (z.B. Fotos) an einen in der Nähe befindlichen Smart TV überträgt.

2.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass *Indoor Location Awareness* ein wichtiges Mittel zur Kontextanreicherung in ubiquitären Umgebungen wie Smart Homes darstellt und einen wichtigen Beitrag zur *Context Awareness* leistet. Hierbei werden die Kenntnisse über den Aufenthalt von Personen und Objekten in Gebäuden, sowie ihre räumlichen Relationen zu nahegelegenen Diensten für eine Fülle an Anwendungen verwendet. Hierzu zählen z.B. *Follow-me* Anwendungen ([Harter und Hopper \(1994\)](#)), Navigationslösungen im Innenraum und Location-based Services wie der *Personal Server* von [Satoh \(2007\)](#).

Für die Entwicklung von Indoor Location-aware Applikationen war das Aufkommen von Lokationstechnologien für den Innenraum von großer Bedeutung. Vorreiter war hier das *Active Badge* Projekt ([Want u. a. \(1992\)](#)), das in diesem Kapitel vorgestellt wurde.

In den Folgejahren entwickelten sich eine Fülle unterschiedlicher Lokationsverfahren, die sich in drei Hauptgruppen kategorisieren lassen: angefangen bei *Proximity* Verfahren (IR,

RFID usw.), über *Triangulationsverfahren* (z.B. Ubisense) bis hin zum *Fingerprinting* (Signalstärkenmessung von Accesspoints). Die Ausgabedaten dieser Lokationsverfahren lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: *absolute* (z.B. in XYZ-Koordinaten) und *symbolische* Positionsangaben (z.B. „Raum 2.17b“).

In einigen Gebäuden werden oft mehrere, inhomogene Lokationstechnologien eingesetzt, sodass [Brumitt u. a.](#) einen *Sensor Abstraction Layer* fordern, der die darunterliegenden Technologien vor Location-aware Anwendungen verbirgt und sie mit geeigneten Ortsinformationen versorgt.

Generell wird dieser Abstraktionslayer in der Literatur als *Location Model* (LM) bezeichnet. LM sind, ähnlich wie Positionsdaten, in symbolische und geometrische Modelle unterteilt. Symbolische Modelle können auf Basis von *Symbolic Locations* Aussagen über Routen und hierarchische Strukturen (*Gebäude* > *Stockwerk* > *Raum*) machen und bieten rudimentäre räumliche Analysen (u.a. Distanzmessung, „enthalten in“ Relationen). Ihr eher geringer Modellierungsaufwand geht einher mit dem Nachteil ungenauer räumlicher Analysen.

Reine geometrische Modelle hingegen bieten eine hohe Präzision bei räumlichen Analysen, die mit dem Nachteil eines hohen Modellierungsaufwandes einhergeht. Außerdem können sie ohne symbolische Repräsentation keine Aussagen über Routen o.ä. leisten.

Daher wird in mehreren Projekten der Einsatz *hybrider* Modelle vorgeschlagen, bei denen symbolische LM mit geometrischen Informationen angereichert werden. Dadurch steigt jedoch die Komplexität und der Modellierungsaufwand der LM *verdoppelt* sich (vgl. [Becker und Dürr \(2005\)](#)).

In den Projekten von [Satoh](#) wurde ein symbolisches Location Model entworfen, dessen Grundlage eine Baumstruktur bildet, die den hierarchischen Gebäudeaufbau widerspiegelt. Jeder Knoten in diesem azyklischen Graphen repräsentiert eine von vier Komponententypen, bestehend aus virtuellen Pendants zu realen Objekten, ihren Funktionsbereichen, Diensten und sog. Proxies. Das LM entscheidet, welche Services unter welchen Begebenheiten gewählt und ausgeführt werden. Dies spricht einen weiteren interessanten Aspekt von Location Models an:

„A major architectural choice is the degree of centralization of responsibility for location information.“
– [Harter und Hopper \(1994\)](#)

Die grundlegende Frage hierbei ist, ob das LM als eine *zentrale Komponente* konzipiert wird, die einen Großteil der Entscheidungen über das Zusammenspiel und die Ausführung von Diensten fällt, wie in [Satoh \(2007\)](#) u.a. beschrieben, oder, ob das LM lediglich *zentrale Aspekte räumlicher Analysen* übernimmt und, wie in [Harter u. a. \(1999\)](#) geschehen, interessierte Anwendungen über Events o.ä. aktualisierte Informationen zukommen lässt.

Es ist zu prüfen, ob sich die in dieser Arbeit vorgeschlagenen semantischen Gebäudemodelle als Basis für ein LM eignen und die Vorteile hybrider Modelle bei gleichzeitig geringerem Modellierungsaufwand erfüllen.

3. Vergleichbare Arbeiten

In diesem Kapitel wird die wissenschaftliche Landschaft auf Forschungsprojekte mit hoher Relevanz für diese Arbeit hin untersucht. Das Ziel ist in erster Linie die Abgrenzung der eigenen Arbeit gegenüber bestehenden Arbeiten. Des Weiteren werden wesentliche Aspekte der Arbeiten auf ihren Einsatz in einem räumlichen Service hin untersucht.

Um von den Erfahrungswerten beim Einsatz dreidimensionaler Gebäudemodelle in intelligenten Umgebungen anderer Forschungsarbeiten zu profitieren, wird in Kap. 3.1 zunächst eruiert, in welchen Anwendungsfeldern diese bislang eingesetzt wurden. Hier werden vor allem die Bereiche *Visualisierung*, *Simulation* und *Mensch-Maschine-Schnittstelle* betrachtet und analysiert, welche Ansätze für einen räumlichen Service geeignet sind und welche Mängel bei ihnen bestehen.

Semantische 3D Gebäudemodelle dienen in dieser Arbeit als Grundlage eines *Location Models* zur Kontexterkenkung. Daher wird in Kap. 3.2 der aktuelle Forschungsstand bei der Modellierung und der räumlichen Analyse semantischer Modelle betrachtet. Dies geschieht insbesondere mit Hinblick auf die Forschungsgebiete der *Geoinformationssysteme* (GIS) und des *Building Information Modelling* (BIM), die sich in aktuellen Forschungsarbeiten mit diesen Modellen beschäftigen. Zudem finden sich in beiden Fachgebieten zunehmend interdisziplinäre Arbeiten, in denen BIM und GIS ineinander übergehen. Die Entwicklung der BIM und GIS Systeme wird zunächst separat betrachtet. Anschließend werden gemeinsame Problemstellungen im Kontext des räumlichen Services untersucht.

Daraufhin werden in Kap. 3.3 Formalismen zur Beschreibung der für diese Arbeit wichtigen *räumlichen Relationen* (wie z.B. metrischer, topologischer und direktonaler Operatoren) vorgestellt und Modelle untersucht, die diese präzisen mathematischen Modelle in eine qualitative, natürlichsprachliche Form überführen. Dies geschieht insbesondere mit Hinblick auf eine angemessene Kommunikation des räumlichen Services mit den Bewohnern über räumliche Begebenheiten der Wohnumgebung.

Zuletzt wird in Kap. 3.4 anhand einiger Arbeiten aufgezeigt, welche Erweiterungen bei den Gebäudemodellen im Smart Home Kontext erforderlich und sinnvoll sind. Hier wird zum einen auf nicht-physische räumliche Artefakte eingegangen, die z.B. die Bereiche abdecken,

die von Sensoren erfasst werden oder Areale überdecken, in denen Interaktionen stattfinden. Mit ihnen können z.B. Tische und Stühle annotiert werden, um Rückschlüsse über die Aktivitäten der Bewohner zu ziehen.

Aktuelle Standards zur Gebäudemodellierung (z.B. im Bauwesen oder GIS) sind derzeit nicht auf die Anforderungen ubiquitärer Umgebungen ausgelegt, da sie sehr *generisch* modelliert sind. Daher folgt letztlich eine Diskussion eines Raummodells, das diese Anforderungen (z.B. das Abbilden von Sensoren und Aktoren) durch Erweiterungen bestehender Standards u.a. mit Hilfe einer Gebäudeontologie zu erfüllen versucht.

Am Ende dieses Kapitels werden die betrachteten Arbeiten zusammengefasst und die für diese Arbeit gewonnenen Erkenntnisse hervorgehoben.

3.1. Gebäudemodell-basierte Anwendungen in Smart Environments

In diesem Kapitel wird der Einsatz dreidimensionaler Gebäudemodelle in Smart Home Umgebungen untersucht, mit dem Ziel von den Erfahrungswerten anderer Forschungsgruppen zu profitieren. Es werden die Bereiche *Visualisierung*, *Simulation* und *Mensch-Maschine-Schnittstelle* betrachtet und jeweils erörtert, welche Aspekte für einen räumlichen Service geeignet sind und welche Verbesserungen bzw. Erweiterungen noch vorgenommen werden müssen. Der räumliche Service sollte so konzipiert werden, dass die im Folgenden vorgestellten Bereiche (durch möglichst geringe Anpassungen bzw. Erweiterungen) ebenfalls unterstützt werden können.

3.1.1. Gebäudemodell-basierte Visualisierungen

Visualisierungen sind eine vergleichsweise einfache Form, in der Gebäudemodelle Verwendung finden. Zum einen werden teils anspruchsvolle 3D Visualisierungen u.a. in Printmedien und auf Webseiten zu (populärwissenschaftlichen) Präsentations- und Demonstrationszwecken eingesetzt (vgl. Abb. 3.1).

In wissenschaftlichen Aufsätzen verdeutlichen sie zum anderen zumeist Sachzusammenhänge und sind daher auf Wesentliches reduziert. Z.B. wird in [Wu u. a. \(2010\)](#) eine schematische 2D Ansicht verwendet, um dem Leser ein Bild der Testumgebung zu vermitteln. In [Riedel u. a. \(2005\)](#) (s. Abb. 3.2) werden zudem Pfade visualisiert, die unterschiedliche Aktivitäten darstellen.

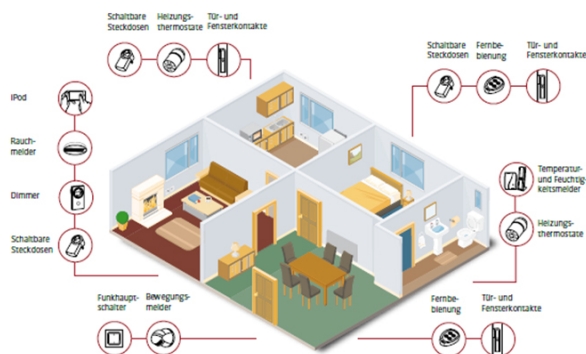
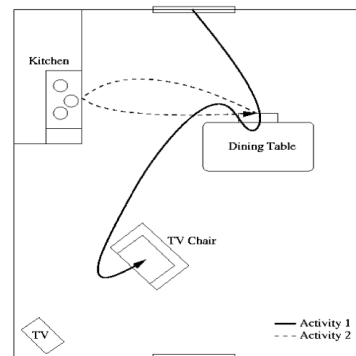
Abb. 3.1.: Quelle: www.energie21-smart.de

Abb. 3.2.: Riedel u. a. (2005)

Bewertung Reine Visualisierungen – ohne jedwede Form der Interaktion – sind für den räumlichen Service weniger von Bedeutung. Sie könnten jedoch in Form eines optischen Feedbacks als Testumgebung fungieren. Dennoch können auf Basis des Modells, wie zuvor beschrieben, spezifische Sachzusammenhänge veranschaulicht werden. Oftmals sind Visualisierungen ein Nebenerzeugnis anderer Zielstellungen (z.B. der Simulation, HCI und Navigation), die im Folgenden betrachtet werden.

3.1.2. 3D Gebäudemodelle als Basis für Mensch-Maschine-Schnittstellen

Mehrere Forschungsarbeiten befassen sich mit einer möglichst intuitiven Interaktion von Bewohnern und Wohnumgebung durch Gebäudemodell-basierte 3D Benutzerschnittstellen.

Ein Projektteam der Universität der Bundeswehr München hat sich im Umfeld des *SmartHOME Lab* in mehreren Papieren (u.a. [Borodulkin u. a. \(2002a\)](#), [Borodulkin u. a. \(2002b\)](#)) mit 3D Gebäudemodellen als Mensch-Maschine-Schnittstelle für Smart Homes befasst (siehe [Abb. 3.3](#)). Sie sehen eine Darstellung in Form einer *virtuellen Realität* als nützlich an. Insbesondere bietet sie eine verbesserte Wahrnehmung der Räumlichkeiten und einen schnellen Überblick der Gesamtsituation. Außerdem lässt sich eine intuitive Benutzerschnittstelle über das 3D Modell realisieren, mit der u.a. Haushaltsgegenstände gesteuert und Sensoren überwacht werden können.

Der Ansatz von [Hossain u. a. \(2011\)](#) geht über die bisher vorgestellten Arbeiten hinaus. Sie verbinden die reale mit einer virtueller Welt (modelliert in *Second Life*¹) indem sie durch einen bidirektionalen Kommunikationskanal beide Welten *synchronisieren*. Hierzu wurden die virtuellen Abbilder realer Gegenstände zusätzlich annotiert (u.a. mit Sensorinformationen und

¹Second Life by Linden Lab, <http://www.secondlife.com>

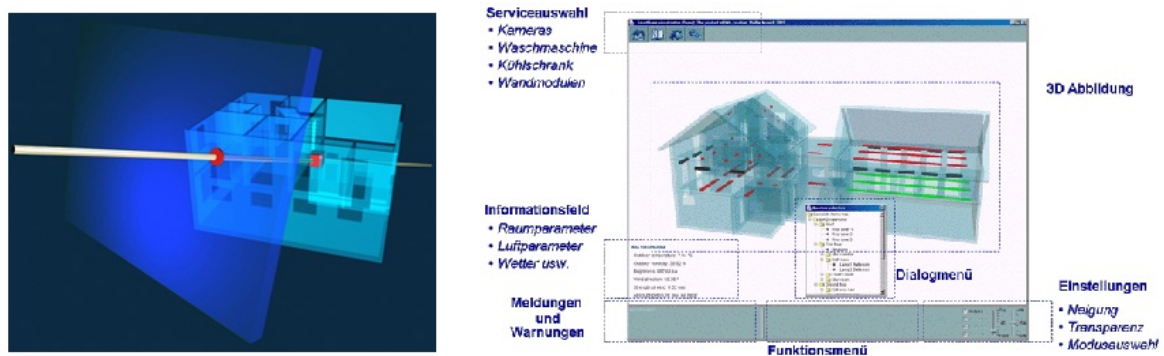


Abb. 3.3.: 3D User Interface (Quelle: Borodulkin u. a. (2002a))

Animationsdetails). Bspw. kann durch die Interaktion in der virtuellen Welt die Lichtintensität oder Lautstärke in der realen Welt geregelt werden. Beim Öffnen einer Tür in der realen Welt wird ihr virtuelles Gegenstück ebenfalls geöffnet. Diese Synchronisation gestaltet die Interaktion noch intuitiver als bei anderen Lösungen.

Bewertung Die genannten Arbeiten verdeutlichen den hohen Nutzen von Gebäudemodellen in virtuellen 3D Benutzerschnittstellen. Keine der Arbeiten geht jedoch auf den Aufwand ein, der in die Gebäudemodellierung investiert werden muss – hier könnte die Verwendung standardisierter Modelle wie IFC oder CityGML nützlich sein. Insbesondere sind die weiterführenden Arbeiten von Hossain u. a. (2011) zur *Synchronisation von realer Welt und virtuellem Pendant*, die durch die Annotation der digitalen Gegenstände erreicht wurde, für diese Arbeit von Interesse.

3.1.3. 3D Gebäudemodelle als Basis für Simulatoren in Smart Homes

Im Folgenden werden Arbeiten untersucht, bei denen semantische Modelle für *Smart Home Simulatoren* eingesetzt werden. Lei u. a. (2010) formulieren drei Anforderungen an Smart Home Simulatoren:

1. Simulation der realen Umgebung, Szenarien und Interoperation der Geräte
2. Transparente Simulation und nahtlose Integration von simulierten und realen Geräten
3. Einfache Skalierbarkeit

Es findet sich in der Literatur eine Vielzahl an Simulationsumgebungen bzw. Simulatoren für Smart Homes (Lei u. a. (2010)) – bei einigen sind Gebäudemodelle in 2D oder auch 3D involviert (vgl. Abb. 3.1).

Projekt	Dim.	Modellierungstool	Importformat	Visualisierung
ViSi ¹	3D	Sketchup	SKP	Sketchup
C@sa ²	3D	3D Studio Max	VRML	Java3D
SIMACT ³	3D	Sketchup	OBJ	Java3D, Swing
UbiWise ⁴	2D/3D	div./MilkShape 3D	JPEG/BSP	QuakeIII Game Engine
ISS ⁵	2D	div.	Bitmap	.Net
SHSim ⁶	2D	div.	Bitmap	Java

¹ ViSi: Smart Home Visualization and Simulation; [Lazovik u. a. \(2009\)](#)

² C@sa: Intelligent Home Control and Simulation; [De Carolis und Cozzolongo \(2004\)](#)

³ SIMACT: A 3D Smart Home Simulator for Activity Recognition; [Bouchard u. a. \(2010\)](#)

⁴ UbiWise: Ubiquitous Wireless Infrastructure Simulation Env.; [Barton und Vijayaraghavan \(2002\)](#)

⁵ ISS: Interactive SmartHome Simulator; [Van Nguyen u. a. \(2009\)](#)

⁶ SHSim: Smart Home Simulator; [Lei u. a. \(2010\)](#)

Tab. 3.1.: Vergleich von Smart Home Simulatoren

Derartige Simulatoren werden u.a. dazu verwendet, um den kostenintensiven Bau eines realen Smart Homes zu umgehen. Im EU Projekt „Smart Homes 4 All“² wurde mit „Visi“ (Smart Home Visualization and Simulation) ein frei verfügbares Simulations-Framework realisiert (vgl. [Lazovik u. a. \(2009\)](#)). Ebenso stellten [Bouchard u. a. \(2010\)](#) mit SIMACT³ eine quelloffene Simulationsumgebung zur Verfügung.

[Lertlakkhanakul u. a. \(2008\)](#) heben ihren benutzerzentrierten Ansatz hervor, der – anders als bei den bislang vorgestellten Papieren – bereits vor dem Bau eines Smart Home in der Planungsphase stattfindet. Testpersonen können durch „virtuelles Wohnen“ das Smart Home erkunden und dem Architekten durch Feedback beim Umgestalten der Gebäudestruktur und Inneneinrichtung unterstützen. Hier wird das Gebäudemodell als Basis der Simulation für Usability-Tests eingesetzt.

Der Fokus der meisten Frameworks liegt in der Simulation der ansonsten aufwendigen Test-szenarien zur Überprüfung von Hypothesen zur Kontextinterpretation. [Lazovik u. a. \(2009\)](#) bemerken hierzu: „*This kind of systems [smart homes] are extremely difficult to verify.*“. In SIMACT von [Bouchard u. a. \(2010\)](#) können Szenarien bspw. durch Skripte gesteuert werden. Hierzu werden bereits einige Abläufe mitgeliefert, die klinischen Studien mit sog. „Naturalistic Action Tests“ (Standardisierte Tests aus der Neuropsychologie) entnommen sind.

Betrachtet man bei diesen Arbeiten die Verwendung von Gebäudemodellen, so unterscheiden sie sich grundlegend in der Modellierung, dem Format und der Visualisierung (vgl. Tabelle 3.1). Auch die Visualisierungsframeworks sind vielfältig, wobei Java3D am häufigsten eingesetzt wird.

² Laufzeit Sep. 08 – Okt. 11; Webseite: <http://www.sm4all-project.eu>

³ Webseite: <http://simact.sourceforge.net>

Bewertung Die Heterogenität in Smart Home-Realisierungen führte in der Vergangenheit zu einer Vielzahl unterschiedlicher Simulationsframeworks. Hier fehlt es vor allem an einer Abstraktionsschicht für die Kommunikationsinfrastruktur (und der eingesetzten Protokolle). Zudem werden bei den 2D oder 3D Modellen keine semantischen Standards eingesetzt. D.h. eine Annotation der Gebäudemodelle in den jeweiligen Frameworks hat zur Folge, dass bei Änderungen der Modelle (z.B. durch einen Architekten) diese Annotationen verloren gehen. Interessant ist zu sehen, dass Gebäudemodelle bei Smart Homes auch in der Planungsphase eingesetzt werden, z.B., um benutzerzentrierte VR-Usability-Tests durchzuführen, oder Sensoren und Aktoren zu planen und Kontextinterpretationen zu simulieren. Für den räumlichen Service sind Simulatoren zudem als Testumgebung und zur Evaluierung von hohem Interesse.

3.2. BIM und GIS – Lieferanten semantischer 3D Gebäudemodelle

BIM und GIS gehören zu den wichtigsten Fachdomänen für semantische Stadt- und Gebäudemodelle. Aufgrund der Nähe des räumlichen Services zu *beiden* Fachgebieten⁴ und der aktuellen Konvergenz der GIS und BIM Systeme wird zunächst auf die Entwicklung beider Paradigmen eingegangen. Daraufhin werden Gemeinsamkeiten, sowie aktuelle Problemstellungen aufgezeigt, deren Reibungspunkte sich in den eigenen Arbeiten widerspiegeln und gleichfalls Grundlage weitergehender Fragen sind.

3.2.1. Die Evolution der Geoinformationssysteme

Digitale raumbezogene Assistenzsysteme (*Spatial Assistance Systems*), wie wir sie heutzutage insbesondere in Form von Navigationslösungen kennen, finden ihren Ursprung in der Pionierzeit der *Geoinformatik* in den späten 1960er Jahren in Nordamerika ([Coppock und Rhind \(1991\)](#)). Damals war der Fundus an digitalem Kartenmaterial gering und die Hardware nicht leistungsfähig genug, um große Geodatensätze in angemessener Zeit auszuwerten. Mit zunehmendem Umfang an Geodaten waren es Mitte der 1970er Jahre vorrangig Behörden, die *Geoinformationssysteme* (GIS) nutzten, um Geobasisdaten digitalisiert zu verwalten. Die voranschreitende Evolution der GIS-Systeme führte nach [Bartelme \(2005\)](#) Ende der 1970er Jahre zum *GIS-Markt* – die Hardware wird leistungsfähiger und Firmen sehen großes Potenzial in GIS.

Ende der 1980er sprechen [Bartelme](#), [Coppock und Rhind](#) von der *Zeit der Nutzer*, die ihren

⁴Der räumliche Service bzw. ISIS, könnte auch als „3D Indoor GIS“ oder „BIM-based Spatial Service“ bezeichnet werden.

derzeitigen Höhepunkt in internet- und GPS-gestützten *Location Based Services* für „Smartphones“ findet. Die semantische Anreicherung der kartographischen Informationen mit zusätzlichen Metadaten in aktuellen GIS bieten dem Endanwender neue Applikationen für den mobilen, alltäglichen Gebrauch.

Zlatanova u. a. (2002) betont, dass mittlerweile ein allgemeiner Konsens darüber bestehe, dass die grundsätzlichen Anforderungen an GIS Systeme (nach Raper und Maguire (1992): Datenerfassung, -strukturierung, -manipulation, -analyse und -visualisierung) durch aktuelle 2D GIS seit Jahren erfüllt werden. Seit Anfang der 1990er Jahre wurden zunehmend Anstrengungen in der Entwicklung von 3D GIS unternommen, die bis heute andauern (Raper (1992); Turner (1992); Rongxing (1994); Koller u. a. (1995)). Dies liegt nicht zuletzt an den immer höheren Bevölkerungsdichten in städtischen Gebieten und dem daraus resultierendem Zwang nach einer effektiven Nutzung ober- und unterirdischer urbaner Räume (Zhang u. a. (2011)). Insofern zeichnet sich hier eine 5. Phase der Evolution der GIS ab – der Phase des *Einzugs der dritten Dimension in GIS*.

Diese Phase wurde entscheidend von der semantischen Stadt- und Gebäudemodellierung durch CityGML, einem Standard des Open Geospatial Consortium (OGC), geprägt. Im Gegensatz zu Standards wie KML, die auf die Präsentation von Raummodellen spezialisiert sind, werden mittels CityGML insbesondere Sach- und Strukturinformationen fachübergreifend transportiert (Rech (2008)). In dieser zusätzlichen semantischen Ebene werden räumliche Informationen in Topologien, Ontologien und Taxonomien verknüpft (Kolbe (2008b)).

CityGML verfügt über fünf graphische Detaillierungsgrade, den Level of Detail (LoD), wobei LoD0 die wenigsten und LoD4 die meisten Details bereithält. LoD4 „schließt die Modellierung von Innenräumen von Gebäuden ein (inkl. von Räumen, Mobiliar und festen Installationen wie Treppen und Säulen)“ (Kolbe (2008a)). Anwendungen für die dritte Dimension sind bspw. Rauchausbreitungs- und Überflutungsszenarien oder die Planung der Positionierung von Funkmasten.

3.2.2. Die Evolution im Bauwesen

Wenngleich der Fokus der *Bauinformatik* weniger in der Modellierung kompletter Städte, sondern vielmehr in der Modellierung einzelner Gebäude über den Lebenszyklus (Planung, Bau, Bewirtschaftung und Abriss) hinweg liegt, zeigen sich dennoch Parallelen zur Entwicklung der GIS Systeme, wie im Folgenden dargestellt wird.

Die architektonische Gebäudemodellierung fand vor Einzug computerunterstützter Modellierung vor allem händisch – mit Stift und Papier – statt (Yan und Damian (2008)). Eine der ersten computergetriebenen Innovationen, die zur steten Ablösung manueller Zeichnungen

beitrug, war das *Sketchpad*, das Ivan Sutherland am MIT Lincoln Laboratory 1960 im Rahmen seiner Dissertation entwickelte (Sutherland (1964)). Es gilt als „erster Schritt“ in Richtung „Computer Aided Design“ (CAD)⁵. Ein „Light Pen“ ermöglichte das direkte Zeichnen von Geometrien auf der Bildschirmoberfläche⁶.

Mit *Synthia Vision* wird 1969 schließlich das erste kommerzielle „Solid Modelling“ Programm der *MAGI Company* herausgebracht⁵. Die weitere Entwicklung wird auch in den folgenden Jahren insbesondere durch die Industrie vorangebracht. So gab es in den 1970er Jahren große Entwicklungsanstrengungen im CAD und CAM (Computer Aided Manufacturing) Bereich, die auch von großen Auto- und Flugzeugherstellern wie General Motors, Ford, Chrysler und Lockheed betrieben wurden.

Zu Beginn der CAD-Ära lag der Fokus auf einer ausschließlich geometrischen Repräsentation und Visualisierung von 2D Zeichnungen. Um die Zugehörigkeit von Linien zu bestimmten Entitätstypen (Wände, Türen etc.) zu verdeutlichen, wurden diese in *Ebenen* bzw. *Layern* gruppiert (Howell und Batcheler (2005)). Dies ermöglichte aber weiterhin keine Modellierung der *Beziehungen* von Elementen untereinander.

Um das Jahr 1977 beauftragte Avions Marcel Dassault ihr Ingenieursteam mit dem Ziel, ein interaktives, *dreidimensionales* CAD/CAM Programm zu entwickeln, das der Vorläufer von *CATIA* (Computer-Aided Three-Dimensional Interactive Application) war⁵. Mitte der 1980er Jahre hat *Graphisoft* mit der Software „Virtual Building Solution“ (heute bekannt als *ArchiCAD*) das erste 3D Programm für Architekten herausgebracht (Morse (2009)). Während der Fokus im 3D Bereich zu Beginn größtenteils in der Visualisierung bzw. dem realitätsnahen Rendering mehrdimensionaler Geometrien lag, wurde im 2D Bereich durch objektorientiertes CAD (OOCAD) die zweidimensionalen Symbole durch Objekte ersetzt, die auch das Verhalten typischer Gebäudeentitäten repräsentierten und mit nicht-graphischen Attributen versehen werden konnten (Howell und Batcheler (2005)).

Jerry Laiserin bekräftigt in Eastman u. a. (2008), dass dieser *Paradigmenwechsel*, von reinen Geometrien hin zu einem Konzept des „Building Information Modelling“ (BIM) nicht erst zu Beginn des 21. Jhd. entstand, sondern Jahrzehnte früher (ca. 1975) von Charles M. Eastman, damals Dozent an der Carnegie-Mellon University, erdacht wurde und zitiert ihn wie folgt:

„...interactively defining elements ... deriv[ing] sections, plans, isometrics or perspectives from the same description of elements ... Any change of arrangement would have to be made only once for all future drawings to be updated. All drawings derived from the same arrangement of elements would automatically be consistent ... any type of quantitative analysis could be coupled directly to

⁵Webseite: <http://mbinfo.mbdesign.net/CAD1960.htm>

⁶Das System ermöglichte u.a. das auf Referenzen-basierte Duplizieren von Geometrien, Zoomen und sog. „rubber-banding“, bei dem eine gerade Linie zwischen zwei Punkten erzeugt wird.

the description ... providing a single integrated database for visual and quantitative analyses ... automated building code checking in city hall or the architect's office...
 – Eastman (1975)

Die Entwicklung zielte fortan auf eine semantische Modellierung von 3D Gebäudemodellen ab – d.h., dass nicht nur die Geometrien der Gebäudeentitäten, sondern auch ihre Beziehungen untereinander in Topologien, Ontologien und Taxonomien modelliert werden. Das Ziel ist die Zusammenarbeit der unterschiedlichen am Bau beteiligten Fachgebiete (Architektur, Bauausführung, Haustechnik und Facility Management) durch ein standardisiertes Austauschformat *IFC (Industry Foundation Classes; IA) (2010)* des semantischen Modells zu optimieren (vgl. Abb. 3.4). Das Schlagwort, das den Prozess der Generierung, Verwaltung und Verwendung von Gebäudedaten während des gesamten Gebäudelebenszyklus beschreibt, ist das bereits erwähnte „Building Information Modelling“, kurz BIM.

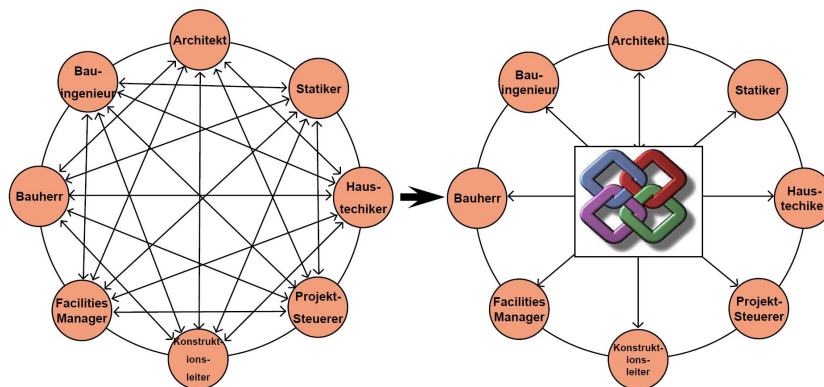


Abb. 3.4.: Einsatz von BIM verhindert Redundanzen (Quelle: Isermeyer (2003))

Neben der domänenspezifischen Erweiterung von BIM (z.B. für den Brandschutz) wird aktuell an dreidimensionalen, geometrischen Analysemöglichkeiten auf Basis der IFC-Modelle gearbeitet. Nach wie vor werden 3D Analysen nicht von kommerziellen – vor allem im GIS Umfeld eingesetzten – SDBMS⁷ unterstützt (Borrmann und Rank (2009)) und sind daher noch Forschungsschwerpunkt. Auch Li (2008) unterstreicht, dass für Analysen des Innenraums und Indoor Spatial Services neue Theorien, Datenmodelle und vor allem DBMS entwickelt werden müssten.

Ein weitergehendes Anwendungsgebiet räumlicher Operatoren im Bauwesen wird in Borrmann und Beetz (2010) („Towards spatial reasoning on building information models“) beschrieben: Regularien und Kundenwünsche definieren *Spatial Constraints* für das Gebäude-design (z.B. „The heating equipment must be within Room1; Room2 must be directly above Room1.“). Die Einhaltung dieser *constraints* im Gebäudedesign wird schließlich mit Hilfe einer räumlichen Analyse überprüft.

⁷SDBMS: Spatial Database Management System

3.2.3. Gemeinsame Problemstellungen und Lösungswege

Die Gegenüberstellung von BIM und GIS verdeutlicht eine parallele Entwicklung beider Domänen. Das Ende des analogen, papiernen Zeitalters wurde in beiden Bereichen mit dem Beginn des digitalen Zeitalters Mitte des 20. Jhd. eingeleitet. Die anfänglichen Repräsentationen in 2D wurden bei beiden gegen Ende des 20. Jhd. durch eine semantische, dreidimensionale Modellierung erweitert. Im GIS Bereich gilt *CityGML* als der Standard der semantischen Stadtmodellierung; IFC wird als Austauschformat des Building Information Modelling angesehen.

„A crucial issue for facilitating interaction with these 3D city models is the ability to integrate 3D BIM into the geospatial context.“ – Hijazi u. a. (2010)

Seit Beginn des 21. Jhd. wurde deutlich, dass GIS-Systeme zunehmend mit Standards aus der Bauinformatik konvergieren, um neue Anwendungsfelder zu schaffen. Für GIS ist in erster Linie der Datenbestand interessant, der durch die hochdetaillierten Gebäudemodelle im Bauwesen vorliegt.

Hier finden sich einige Papiere, die sich mit der Integration der BIM Modelle in die CityGML Stadtmodelle befassen (Nagel und Häfele (2007), Hijazi u. a. (2009)). Das Projekt *BIM4GEOA* (Hijazi u. a. (2010)) legt ein Konzept zum Datenmanagement und zur Analyse von Gebäudeinformationen vor. Hierzu wird ein Framework vorgestellt, das sich durch die Kombination von existierenden Open Source Lösungen (u.a. PostgreSQL/PostGIS, BIMServer) und offenen Standards (IFC, KML, CityGML) ergibt.

Zwar existieren Entwicklungen zur Konvertierung von IFC Modellen zu CityGML, diese beschränken sich aber auf die Visualisierung und seien nicht geeignet für Analysen (u.a. durch Laatsch und Berlo (2011)). Hijazi u. a. (2010) identifizieren hierbei folgende Herausforderungen: unterschiedliche Datenformate, Terminologien, Semantik, Referenzsysteme, Skalierungen, geometrische Modellierungen etcpp.

Die Problemstellung beider Fachgebiete liegt jedoch woanders: derzeit sind keine 3D GIS vorhanden, die in ihrer Funktionalität und Performanz vergleichbar ausgereift zu 2D GIS sind (Zhang u. a. (2011)). Hier fehlt es vor allem noch an 3D SDBMS⁸ mit der Fähigkeit zur *räumlichen Analyse* komplexer, dreidimensionaler Problemstellungen (Borrmann und Rank (2009)). Die Entwicklung ist auch an der (Nicht-)Realisierung GIS-bezogener OGC- und ISO Standards erkennbar: seit 2006 beinhaltet ein Standard (OGC SFS 1.2.0) erstmals 3D geometrische Primitive – mit ISO SQL/MM Draft 2009 und ISO 19125 Draft 2011 sind mittlerweile auch räumliche Funktionen (z.B. topologische Operatoren) Teil der Standards (Courtin (2011)). Die Realisierung in SDBMS, wie z.B. PostGIS oder Oracle, ist aber bislang nicht vollständig abgeschlossen. Auch die weit verbreiteten Bibliotheken wie

⁸SDBMS: Spatial Database Management System

JTS⁹ und GEOS¹⁰ beinhalten z.B. bislang keine 3D topologischen Operatoren.

Ähnliches gilt für den BIM-Bereich – wobei mit der *Spatial Query Language* der TU München (vgl. u.a. [Borrmann u. a. \(2006\)](#), [Paul und Borrmann \(2010\)](#)) an einer räumlichen Abfragesprache für Gebäudemodelle gearbeitet wird, die topologische, metrische und auch direktionale Operatoren unterstützt. Festzuhalten ist jedoch, dass in diesem Fachbereich weder offene und noch kommerzielle Lösungen existieren.

Der räumliche Service, der in dieser Arbeit entwickelt wird, bewegt sich inhaltlich zwischen beiden Welten¹¹. Insofern hat er auch ähnliche Problemstellungen wie BIM und GIS vorzuweisen. Insbesondere der im vorigen Absatz angesprochene Aspekt der *dreidimensionalen Analyse* ist für den räumlichen Service von großer Bedeutung.

3.3. Räumliche Relationen

Räumliche Relationen beschreiben die Anordnung geometrischer Objekte im Raum. Sie werden im räumlichen Service z.B. benötigt, um die Relationen zur Beantwortung einer *Suchanfrage* aufzulösen („Ihre Uhr liegt auf dem Tisch im Wohnzimmer.“). Der Bereich zur Beschreibung räumlicher Relationen beginnt bei der Beziehung zweier 0D Punkte, geht über zum Verhältnis von Punkten zu 2D Flächen und 3D Volumina, und endet bei der räumlichen Anordnung von 3D Körpern. Zusätzlich kann auch die *Zeit* als weitere Dimension in die Betrachtung einfließen (oftmals in Verbindung mit Allen’s Temporal Logik; vgl. [Allen \(1983\)](#)), was hier jedoch nicht näher betrachtet wird.

Im Folgenden werden zunächst Papiere zur formalen Beschreibung der 2D und anschließend 3D Relationen untersucht. Daraufhin werden Möglichkeiten der formalen Beschreibung dieser Relationen analysiert und schließlich werden weiterführende Arbeiten betrachtet, die direkt oder indirekt eine natürlichsprachliche Wiedergabe räumlicher Relationen thematisieren.

3.3.1. Räumliche Relationen in 2D und 3D

Die formale Beschreibung räumlicher Relationen (insbesondere topologischer Nachbarschaftsbeziehungen), wurde Ende der 1980er Jahre durch [Egenhofer und Franzosa \(1991\)](#) geleistet. Aus ihrer Sicht war eine verständliche Theorie für die GIS Realisierung längst erforderlich.

⁹JTS: Java Topology Suit

¹⁰GEOS: Geometry Engine – Open Source; C++ Portierung von JTS

¹¹Mit der GIS-Terminologie wäre eine entsprechende Bezeichnung „Indoor 3D GIS“ – aus BIM Sicht „BIM-based Spatial Service“, angemessen.

„The lack of a comprehensive theory of spatial relations has been a major impediment to any GIS implementation. The problem is not only one of selecting the appropriate terminology, but rather one of determining their semantics.“
– Egenhofer und Franzosa (1991)

Egenhofer zitiert durch Yao und Thill (2006) haben die räumlichen Relationen wie folgt klassifiziert:

- Distanz Relationen (Entfernung, „näher“, „ferner“ etc.)
- Direktionale Relationen (z.B. „nördlich“, „südlich“)
- Topologische Relationen (Nachbarschaftsbeziehungen)
- Ordinale Relationen (z.B. „in“, „bei“)
- Fuzzy Relationen (z.B. „dicht bei“)

Nachstehend wird auf die für den räumlichen Service wichtigsten Relationen – metrische, direktionale und topologische – eingegangen. Den *fuzzy* Operatoren wurde mit Kap. 3.3.3 ein eigenes Kapitel gewidmet.

Distanz- oder auch **metrische Operatoren** (z.B. *mindist*, *maxdist*, *distance*, *isCloser*, *isFarther* und *diameter*¹², vgl. Borrmann (2007)) bestimmen die Abstände von Objekten zu einander, aber auch die Abstände der Raumpunkte innerhalb eines Objekts sowie dessen Volumina.

Direktionale Relationen (z.B. *nördlich*, *östlich*, *südlich*, *westlich*) beschreiben die relative Position zweier Objekte im Bezug auf den umgebenden Raum (Borrmann (2007)). Da sie (wie die topologischen Relationen) Prädikate sind, liefern sie einen booleschen Ergebniswert.

Im Fokus der Forschung befand sich insbesondere eine formale Beschreibung **topologischer Relationen**. Dies wurde von Egenhofer und Franzosa (1991) innerhalb der *Point-Set Topology* mit der neu entwickelten *9-Intersection Matrix* (9-IM; siehe Abb. 3.5), einer Weiterentwicklung der *4-Intersection Matrix* (Egenhofer und Sharma (1993)), geleistet.

In Abb. 3.5 sind die acht 2D Relationen zu sehen, die von Egenhofer und Sharma (1993) identifiziert wurden. Diesen wurde jeweils eine natürlichsprachliche Bezeichnung zugewiesen (vgl. Borrmann (2007)): *disjoint*, *touch*, *equals*, *inside*, *contains*, *covers*, *coveredBy* und *overlap*. Jede dieser Beziehungen kann hierbei mit einer 3x3 Matrix beschrieben werden.

In diesem Zusammenhang ist auch ein alternatives Topologiemodell zu erwähnen – das RCC (*region connection calculus*) Modell von Randell u. a. (1992), welches nicht auf der „traditionellen“ Punkt-basierten Geometrie beruht, sondern Aussagen über *Flächen* („regions of space“) macht.

¹²maximaler Abstand zweier Punkte eines Objektes

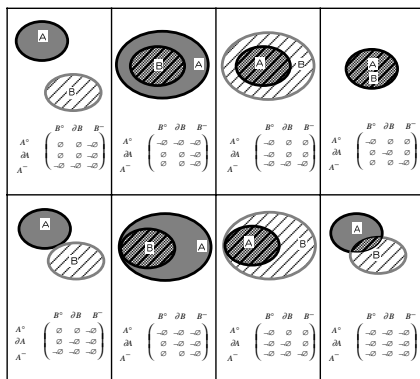


Abb. 3.5.: Die 9-IM im \mathbb{R}^2 nach Egenhofer und Herring

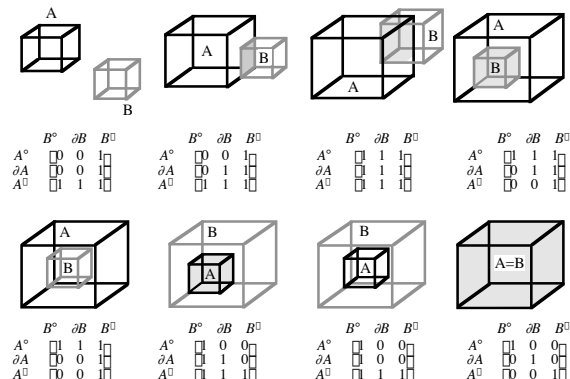


Abb. 3.6.: Die 9-IM im \mathbb{R}^3 für Volumen-Volumen Relationen (Egenhofer (2003))

Räumliche Relationen in 3D

Die Erweiterung der zuvor behandelten direktionalen und topologischen Relationen durch die dritte Dimension erfordert einen neuen Formalismus zur Beschreibung möglicher Konfigurationen und andersartige algorithmische Umsetzungen. Lediglich die **metrischen Operatoren** zur Distanz- und Volumenmessung bleiben durch die dritte Dimension weitestgehend unberührt.

Die **topologischen Operatoren** werden durch eine Fülle an Konfigurationen ergänzt. So ergeben sich 19 Konfigurationen bei der Betrachtung von *Körper und Linie*, 31 bei *Fläche und Linie* und bei *Fläche und Fläche* sind es sogar 31 im \mathbb{R}^3 (Zlatanova (2000)).

Bei der topologischen Betrachtung von *Körper und Körper* im \mathbb{R}^3 (s. Abb. 3.6) sind es jedoch genauso viele mögliche Konfigurationen wie bei *Fläche und Fläche* im \mathbb{R}^2 (Zlatanova (2000), Egenhofer (2003)). Da die dieser Arbeit zu Grunde liegenden Gebäudemodelle nur aus 3D Körpern bestehen, ist eine intensivere Auseinandersetzung mit den Formalismen topologischer Operatoren hier nicht weiter von Nutzen.

Die **direktionalen Relationen** werden um die Prädikate *above* und *below* erweitert. Borrmann stellt in Borrmann (2007) verschiedene Modelle zur Beschreibung von Lagebeziehungen vor. Er bemängelt, dass diese für seinen Anwendungsfall¹³ zu feingranular seien, oder Operatoren vermischt würden. Von daher wurde in Borrmann (2007) ein eigenes Framework zur Definition direktonaler Operatoren entwickelt, das in Auszügen hier vorgestellt wird.

Das Modell geht zunächst von einem *extrinsischen Referenzrahmen* aus, d.h. der Projekt-norden ist z.B. an der Gebäudefront ausgerichtet. Die X-Achse zeigt somit Richtung Norden und bildet die Operatoren *eastOf* und *westOf* ab. Dementsprechend geschieht auch die Betrachtung der direktonalen Beziehungen der anderen Achsen separat (*northOf* und *southOf*

¹³einer räumlichen Anfragesprache mit natürlichensprachlichen Sprachkonstrukten

auf der Y-Achse; *above* und *below* auf der Z-Achse).

Die Operatoren sind in zwei Modelle unterteilt: dem *projektions-* und *halbraumbasierten* Modell. Hierunter gibt es jeweils wiederum eine *strikte* und eine *relaxierte* Variante. Zur Veranschaulichung dieser Operatoren dienen die Abbildungen 3.7 und 3.8.

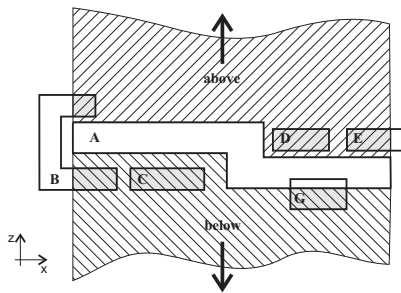


Abb. 3.7.: Projektionsbasiertes Modell (Quelle: [Borrmann \(2007\)](#))

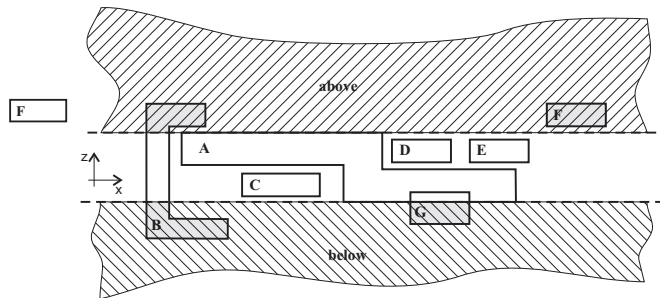


Abb. 3.8.: Halbraumbasiertes Modell (Quelle: [Borrmann \(2007\)](#))

Beim *projektionsbasierten Richtungsmodell* wird das Referenzobjekt entlang der betrachteten Koordinatenachse extrudiert. Daraufhin wird überprüft, ob das Zielobjekt die Extrusion schneidet. Beim *relaxierten Operator* genügt es, wenn das Zielobjekt den Extrusionsraum nur teilweise schneidet – in Abb. 3.7 mit Referenzobjekt A ergeben daher B, D und E beim Operator *above_proj true*. Beim strikten Operator hingegen ist eine vollständige Überschneidung erforderlich, sodass in diesem Beispiel nur D *true* ergibt.

Beim *halbraumbasierten Richtungsmodell* wird das Referenzobjekt zunächst in eine vereinfachte Form überführt (in eine sog. *Axis Aligned Bounding Box*). Daraufhin werden *Halbräume* ober- und unterhalb des Objektes entsprechend der betrachteten Achse gebildet. Die Auswertung der Operatoren ist nun ähnlich zum projektionsbasierten Modell – beim relaxierten Operator reicht ein Schnitt mit dem Halbraum aus, beim strikten Operator muss das Objekt komplett innerhalb des Halbraums liegen. Damit ergibt der Operator *above_hs* für das Referenzobjekt A in Abb. 3.8 für B und F *true*, wohingegen es bei *above_hs_strict* lediglich F ist.

3.3.2. Formale Beschreibung

Nach der Betrachtung der für einen räumlichen Service relevanten räumlichen Relationen in 2D und 3D werden nun Herangehensweisen vorgestellt, diese Relationen formal zu beschreiben. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass der räumliche Service (z.B. bei einer Serviceanfrage) räumliche Relationen in maschinenlesbarer Form anderen Agenten in der intelligenten Umgebungen zur Verfügung stellen muss.

Werden mehrere Relationen zur Beschreibung einer Szenerie herangezogen, wird in der Literatur auch von einer *geometrischen Szenenbeschreibung* (GSB; vgl. Neumann (1984)) gesprochen. Mitte der 1970er Jahre wurden Systeme entworfen, um diese (zumeist statischen) Relationen aus Bildszenen zu extrahieren. Hier bediente man sich u.a. vorangegangener Arbeiten aus der Linguistik (insb. von Herskovits, Bennet, Hawkins etc.). Im Folgenden werden einige Ansätze zur Beschreibung räumlicher Szenen vorgestellt.

Eine formale Beschreibung der Operatoren mit dem Ziel einer Szenenbeschreibung eines Fotos, wurde bereits durch John und Freeman (1975) im Papier „The Modeling of Spatial Relations“ durchgeführt – jedoch ohne, dass die Operatoren in die drei genannten Gruppen unterteilt wurden. Zur Beschreibung der Relationen werden **Prädikate** verwendet, z.B.: $BELOW(X, Y) =$ „X is below Y“; $BETWEEN(X, Y, Z) =$ „X is between Y and Z“ ($BETWEEN$ ist hierbei die einzige ternäre Relation, die anderen, wie z.B. $LEFT_OF$, $ABOVE$, $TOUCHING$ sind ausschließlich binär).

In Herzog u. a. (1990) des SFB 314 publiziert durch Freksa und Habel wurde die „Überführung einer rein geometrischen Darstellung in eine explizite Beschreibung der räumlichen Anordnung“ von *Realweltszenen* (Videoaufnahmen) mittels **Relationentupel** beschrieben. Diese werden propositional durch:

$$(Rel - Name, Subjekt, Bezugsobjekt_1, \dots, Bezugsobjekt_n \{, Orientierung\})$$

beschrieben. Das erste Element bezeichnet die räumliche Relation (z.B. *oben*). Das Subjekt ist dasjenige Objekt, das in Relation zu einem oder mehreren Bezugsobjekten bzgl. seiner Orientierung lokalisiert werden soll.

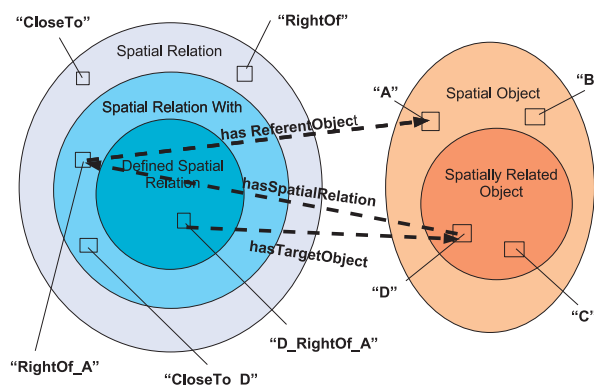


Abb. 3.9.: Hauptkonzepte der *Spatial Relation Ontology* (Quelle: Hudelot u. a. (2008))

Eine weitere Variante der formalen Repräsentation räumlicher Relationen kann durch **Ontologien** erreicht werden. Abb. 3.9 stellt die wesentlichen Konzepte der von Hudelot u. a. (2008) entworfenen *Spatial Relation Ontology* dar, mit der räumliche Relationen in OWL DL

beschrieben werden. Hierbei wird eine räumliche Relation nicht als eine Rolle oder Eigenschaft zwischen zwei räumlichen Entitäten aufgefasst, sondern als eigenständiges Konzept (*SpatialRelation*).

3.3.3. Räumliche Relationen in der menschlichen Wahrnehmung

Die rein formale Beschreibung räumlicher Relationen wird oftmals nicht der menschlichen Intuition gerecht. Daher werden in diesem Kapitel die räumlichen Operatoren aus dem Blickwinkel der menschlichen Raumwahrnehmung betrachtet. Zunächst werden unterschiedliche Referenzsysteme und die Deixis untersucht, woraufhin im Abschnitt *Fuzzyness* u.a. die Frage gestellt wird „Was bedeutet *rechts, oberhalb, unterhalb, in der Nähe* von mir?“. Anschließend werden in der *naiven Geographie* (geprägt von [Egenhofer und Mark \(1995\)](#)) Vorschläge für intuitiv bedienbare GIS untersucht.

Deixis und Referenzsysteme Topologische und metrische Operatoren verhalten sich unabhängig vom umgebenden Referenzsystem gleich. Anders verhält es sich mit den direktionalen, richtungsabhängigen Operatoren wie *vor, hinter, über* etc. Ihre Evaluation hängt vom umgebenden Referenzsystem ab, die [Wunderlich \(1985\)](#) wie folgt unterteilt:

- *intrinsisch* (das Referenzobjekt hat eine implizite Vorderseite, die z.B. als Norden deklariert wird)
- *extrinsisch* (das Referenzsystem wird z.B. durch einen Planer vorgegeben)
- *deiktisch* (der Referenzrahmen ist ausgehend von einem Betrachter definiert)

Zur Verdeutlichung wird in [Retz-Schmidt \(1988\)](#) folgender Satz angegeben: „Der Ball ist *vor* dem Auto“. Dies kann bedeuten, dass der Ball aus Sicht des Betrachters vor dem Auto platziert ist (*deiktisch*), in Relation zur Orientierung des Autos (*intrinsisch*) oder mit Hinblick auf die Fahrtrichtung (*extrinsisch*).

Die *Lokaldeixis* spielt in der natürlichsprachlichen Beschreibung von relativen räumlichen Verhältnissen bzw. räumlichen Relationen eine besondere Rolle. Die Semantik lokaldeiktischer Begriffe wie *hier, dort, links* und *rechts* ergibt sich hierbei aus kontextuellen Faktoren, wie z.B. die Position und Blickrichtung des Betrachters ([Klein \(1982\)](#)).

Zur Veranschaulichung soll hier ein Beispiel aus [Andre u. a. \(1986\)](#) herangezogen werden. Das Dialogsystem *CITYTOUR* (entwickelt in den 1980er Jahren im SFB 314 für Künstliche Intelligenz) ermöglicht es einem Touristen, Fragen über die städtische Umgebung zu stellen – die Antwort hierauf erfolgt natürlichsprachlich und verwendet, falls es der Anfrage zu entnehmen ist, einen deiktischen Referenzrahmen.

Lautet die Frage bspw. „Liegt die Post *von hier aus* hinter der Kirche?“ (vgl. Abb. [3.10](#)), ist

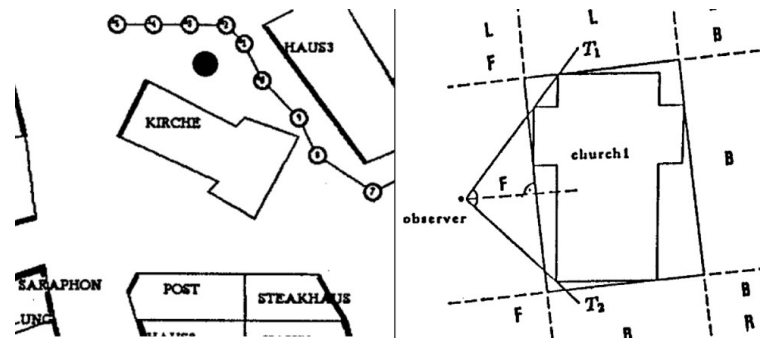


Abb. 3.10.: Stadtplan und Betrachter im Dialogsystem *CITYTOUR* (aus Andre u. a. (1986))

hier die Antwort: „Ja, die Post befindet sich recht gut hinter der Kirche von hier aus.“ Hier wurde einerseits auf den lokaldeiktischen Bezugsrahmen eingegangen, andererseits wurde eine qualitative, wenngleich *vage* Entfernungsbeschreibung („recht gut hinter“) hinzugefügt. Auf diese natürlichsprachliche *Ungenauigkeit* wird im folgenden Kapitel eingegangen.

Fuzziness Menschliche Konzepte von Raum und Zeit sind oftmals nicht durch präzise mathematische Modelle zu beschreiben. Begriffe wie „in der Nähe“ oder „bald“ sind dennoch elementar für das menschliche Denken und Handeln. Zadeh, der 1965 die *Fuzzy Sets* zur Klassifikation solch mehrdeutiger Entitäten schuf, schrieb hierzu:

„(...) such imprecisely defined „classes“ play an important role in human thinking, particularly in the domains of pattern recognition, communication of information, and abstraction.“
– Zadeh (1965)

Da die Beschreibung räumlicher Konstellationen (durch metrische, direktionale und topologische Operatoren) für diese Arbeit wichtig sind, werden im Folgenden Papiere betrachtet, die eine räumliche Fuzzy Logik anwenden.

Behr und Guting (2005) betrachten Entitäten, deren Topologie nicht genau eingegrenzt werden kann. Hierzu zählt z.B. Luft- oder Wasserverschmutzung. Die Beschreibung, ob sich ein Raumpunkt in einem solchen *fuzzy spatial object* befindet, kann also nicht einfach durch einen booleschen Wert definiert werden. Vielmehr, so Behr und Guting, entspreche eine Funktion, die einen Wert $d \in [0, 1]$ liefert, weitaus mehr den Gegebenheiten.

Der Begriff *Lagebeziehung* (engl. *proximity*) beschreibt eine in natürlicher Sprache wiedergegebene Distanzrelation und wird oftmals auch als *qualitative Distanz* oder *linguistische Distanz* bezeichnet (Yao und Thill (2006)). In den frühen 1990er Jahren sind viele Arbeiten verfasst worden, die sich mit einem Formalismus zum Abbilden *metrischer* Distanzmaße auf *qualitative* befassen haben. Viele dieser Arbeiten, u.a. von Guesgen & Albrecht, verwendeten hierzu *Fuzzy Logik*. Der *Kontext* spiele bei der menschlichen Umgebungswahrnehmung,

insbesondere auch bei der Abschätzung von Distanzrelationen eine besondere Rolle. Diesen Aspekt haben Yao und Thill (2006) in einem Regressionsmodell für „*qualitative spatial queries*“ integriert, das neben einer metrischen Distanzmessung diverse Variablen (u.a. das Geschlecht, die ethnische Herkunft und das verwendete Verkehrsmittel) zur Umschreibung des Kontextes einfließen lässt.

„(...) the concept „close to“ is intrinsically vague and imprecise, and its semantics depends on the context in which objects are embedded, on the scale of the objects and of their environment.“
– Hudelot u. a. (2008)

In Hudelot u. a. (2008) wird eine mit *fuzzy* Konzepten angereicherte Ontologie für räumliche Relationen verwendet, um eine semantische Bildinterpretation im Bereich der Biomedizin zu leisten. In ihrer Arbeit ist insbesondere die Beschreibung *direktionaler Operatoren* interessant. In Abb. 3.11 ist bspw. das Konzept „rechts von“ auf Basis einer *fuzzy landscape* visualisiert (Quelle: Hudelot u. a. (2008)).



Abb. 3.11.: Welcher Bereich ist *rechts* von dem Quadrat? (Quelle: Hudelot u. a. (2008))

Ähnlich des beschriebenen direktionalen Problems „Was ist die Semantik von *rechts-von*?“, stellen John und Freeman (1975) die Frage auch bzgl. topologischer Operatoren. In Abb. 3.12 wird die Fragestellung einer „enthalten-in“ Relation visualisiert.

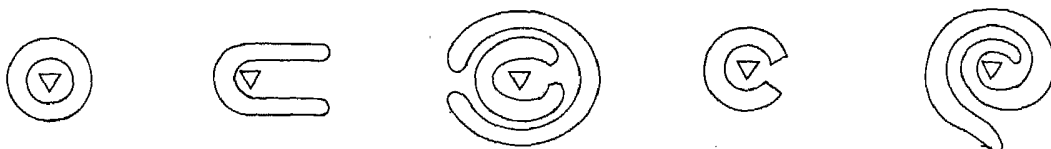


Abb. 3.12.: Befindet sich ein Objekt *in* einem anderen? (Quelle: John und Freeman (1975))

John und Freeman vermuten folglich, dass eine *mathematische* Definition eines *INSIDE*-Operators nicht mit der *psychologischen* Definition übereinstimmen muss.

„The all-or-none nature of standard relational mathematics is inadequate to the task of modelling human judgments. (...) With respect to the problem of programming a model of spatial relations, we have come up with many more questions than answers.“
– John und Freeman (1975)

Naive Geography Der Begriff der *Naive Geography*¹⁴ wurde von Egenhofer und Mark (1995) geprägt und beschreibt die Annäherung der Computersysteme an die menschliche Wahrnehmung über die geographische Umgebung. Basierend auf einem besseren Verständnis dieser Wahrnehmung, so die Vision, könnten zukünftig *intelligente GIS* realisiert werden, die menschlich interagierten und daher die Erwartungshaltung der Anwender besser erfüllen.

„Naive Geography is the body of knowledge that people have about the surrounding geographic world. Naive Geography is envisioned to comprise a set of theories that provide the basis for designing future Geographic Information Systems that follow human intuition (...) Naive Geography captures and reflects the way people think and reason about geographic space and time, both consciously and subconsciously.“
– Egenhofer und Mark (1995)

Eine fundamentale Eigenschaft naiver Systeme sei die Verwendung *qualitativer Modelle*, die als eine Art „Abstraktion“ von quantitativen Details anzusehen sei, aber nicht mit *fuzzy reasoning* verwechselt werden dürfe (Egenhofer und Mark (1995)). Im Gegensatz zu quantitativen Methoden existiere bei qualitativen nur eine kleine, vorgegebene Anzahl an möglichen Besetzungen (z.B. *nord, ost, süd, west* im Gegensatz zu einer winkelabhängigen Angabe).

Naives geographisches *Reasoning* (schlussfolgern) stelle eine der grundlegendsten Formen menschlicher Intelligenz dar. Räumliche Analysen finden in alltäglichen Denkprozessen jedoch so umfassend und vielzählig statt, dass sie kaum mehr wahrgenommen werden. Die Formalisierung dieser mentalen Prozesse sei für eine digitale Weiterverarbeitung in Computern jedoch unabdingbar.

Zur Realisierung in naiven GIS fehlten aber noch anspruchsvolle Methoden, die u.a. die in Studien über kognitive Prozesse erlangten Erkenntnisse umsetzen. Hierzu gehörten z.B. die Tatsache, dass Fehler, die Menschen in ihre „kognitiven Landkarten“ einbauten, vor allem metrischer und weniger topologischer Natur seien. Oder auch Erkenntnisse darüber, wie die topologische Natur und *Gestalt* von Objekten zur menschlichen Raumwahrnehmung beiträgt.

Heutzutage ist durch Smartphones und den mobilen Internetzugang ein quasi allgegenwärtiger Zugriff auf die sogenannten *Location-based Services* gewährt (z.B. Navigation, Restaurantsuche). Dennoch besteht nach wie vor die Forderung nach intuitiv bedienbaren GIS:

„A particular challenge for the design of spatial information systems of the next generation is to equip GISs to handle common-sense geographic queries made by users without specific training in spatial technologies.“ – Yao und Thill (2006)

¹⁴naïve im Sinne von *instinktiv* oder auch *spontan*

In diesem Zusammenhang stellen Yao und Thill (2006) ein GIS Framework vor, das qualitative räumliche Abfragen – *qualitative locations* – handhaben kann. Dadurch werde die Lücke zwischen den konventionellen metrischen Informationssystemen und den natürlichsprachlichen Bedürfnissen überbrückt.

Yao und Thill haben hierzu die qualitativen Distanzmerkmale *very near*, *near*, *normal*, *far*, und *very far*, die einer Befragung von Studenten der State University of New York entnommen wurden, in das Framework integriert. Eine beispielhafte Anfrage ist „Find nearby and low crime rate park(s)“ (Yao und Thill (2006)).

Das Forschungsfeld der menschlichen Raumkognition ist ein interdisziplinäres Gebiet, das nach wie vor intensiver Aufmerksamkeit unterliegt. Dies wird auch dadurch deutlich, dass die Thematik Schwerpunkt einiger Sonderforschungsbereiche ist (u.a. der SFB8 der Universität Bremen¹⁵). Aufgrund der immensen thematischen Fülle wird hier auf die Raumkognition nicht wesentlich intensiver eingegangen. Im Kap. *Ausblick* werden jedoch einige für diese Arbeit interessante Anwendungen exemplarisch aufgezeigt.

3.3.4. Zusammenfassung

Die Beschreibung räumlicher Relationen sind zur Realisierung von Szenarien wie der *räumliche Suche* unabdingbar. Daher wurde in einer historischen Rückschau zunächst die Klassifikation der Relationen durch Egenhofer und Franzosa betrachtet – sie unterteilen diese wie folgt: metrisch, direktional, topologisch, ordinal und fuzzy. Egenhofer und Franzosa haben weiterhin eine formale sowie semantische Beschreibung topologischer 2D Relationen durch das *9-Intersection Model* geleistet.

Anschließend folgte die Betrachtung der Relationen in der dritten Dimension. Die metrischen Relationen (Distanz und Volumenmessung) werden im Gegensatz zu den topologischen Relationen unwesentlich komplexer. Letztere werden zwar durch eine Fülle an Konfigurationen ergänzt, jedoch hat Zlatanova (2000) gezeigt, dass bei der Betrachtung von Körper zu Körper genau so viele mögliche Konfigurationen wie bei Fläche zu Fläche in 2D auftreten. Insofern steigt auch hier die Komplexität der Beschreibung dieser Relationen nicht an. Die direktionalen Relationen hingegen werden in 3D durch zwei Operatoren ergänzt (*above* und *below*).

Um die Relationen, die sich durch eine räumliche Szenenanalyse ergeben haben, anderen Softwareagenten zur Verfügung zu stellen, müssen diese in maschinenlesbarer Form übermittelt werden. Hierzu wurden drei unterschiedliche Herangehensweisen betrachtet: John und Freeman (1975) verwenden Prädikate, Herzog u. a. (1990) benutzen Relationentupel und Hudelot u. a. (2008) haben hierzu eine Ontologie entwickelt, um die Relationen zu beschreiben.

¹⁵Webseite: <http://www.sfbtr8.uni-bremen.de>

Da die eben vorgestellten Verfahren zur geometrischen Szenenbeschreibung sich z.B. nicht besonders zur Sprachausgabe eignen, wurden diese Relationen letztlich aus dem Blickwinkel der menschlichen Raumwahrnehmung betrachtet. Hier ist z.B. die *Deixis* von besonderer Bedeutung. Zur Beschreibung wird hier ein Referenzrahmen ausgehend vom Beobachter gewählt („Der Schlüssel liegt vor *dir*.“). Des Weiteren werden in der zwischenmenschlichen Kommunikation selten präzise Entfernungsangaben gemacht, sondern vielmehr qualitative Angaben vorgezogen. Dies kann z.B. die Beschreibung durch *Fuzzy Sets* (Zadeh (1965)) leisten. Letztlich ist ein Exkurs in das Themengebiet der *Naive Geography* vorgenommen worden. Diesem von Egenhofer und Mark geprägten Begriff liegt die Forderung inne, dass computergestützte, geographische Informationssysteme losgelöst vom Fachwissen durch die Intuition des Anwenders bedienbar sein müssen. Diese Systeme sollten somit auf Fragen des Alltags (z.B. „Welche Bahnstation ist in meiner Nähe?“) plausible Antworten liefern können.

3.4. Erweiterte Modelle zur Kontextinterpretation in intelligenten Umgebungen

Im Folgenden werden zwei Ansätze aufgezeigt, die die vorgestellten semantischen Raummodelle um ubiquitäre Aspekte erweitern. Zunächst wird auf *Spatial Artefacts* eingegangen. Mit ihnen können Raumentitäten mit nicht-physischen, aber dennoch raumeinnehmenden, funktionalen Artefakten annotiert werden. Dies geschieht mit Hinblick auf eine feingranularere Aufenthaltsanalyse der Bewohner. Daraufhin wird ein Modell vorgestellt, das die sehr generischen Modellierungsstandards (wie CityGML und IFC) um einen ubiquitären Layer erweitert.

3.4.1. Spatial Artefacts

Im Papier „Spatio-Terminological Inference for the Design of Ambient Environments“ haben Bhatt u. a. (2009) vom *SFB/TR 8 Spatial Cognition*¹⁶ einen Ansatz vorgestellt, um den (architektonischen) Designprozess intelligenter Umgebungen durch automatische Validierung von Raummodellen zu unterstützen. Hierbei werden nicht nur strukturelle Aspekte, sondern auch funktionale Aspekte des Designs inklusive der Sensoren und interaktiven Gegenstände berücksichtigt.

Die Validierung der Modelle findet ontologiebasiert auf Basis von *Requirement Constraints* statt, die zwischen räumlichen Gegenständen und abstrakten räumlichen Artefakten („Spatial

¹⁶Webseite: <http://www.sfbtr8.spatial-cognition.de>

Artefacts“) bestehen. Eine in der räumlichen Ontologie formulierte Bedingung könnte z.B. lauten: „Der Funktionsbereich einer Tür in jedem Büro sollte sich mit mindestens einem von Bewegungssensoren abgedeckten Bereich überschneiden“. Diese „Bereiche“ oder „Spatial Artefacts“ (s. Abb. 3.13) werden von [Bhatt u. a. \(2009\)](#) wie folgt definiert:

Operational Space ist der Raum, den ein Objekt benötigt, um seine „intrinsische Funktionalität“ auszuführen. Z.B. wird zum Öffnen einer Tür ein freier Raum benötigt – dieser Raum, von der geschlossenen bis zur vollständig geöffneten Tür, wird als *Operational Space* bezeichnet.

Functional Space ist der Raum, in dem ein Agent sich befinden kann, um physisch mit dem Objekt zu interagieren oder es zu manipulieren. Die geometrische Ausprägung dieses Raumes hängt stark von der des betrachteten Objektes ab (teilweise auch von seiner intrinsischen Vorderseite) und den Objekten der Umgebung – z.B. können Wände den Functional Space einschränken.

Range Space ist der Bereich, der von Sensoren abgedeckt wird (z.B. von Temperatur-, Bewegungs-, Feuersensoren, Laserscannern oder Kameras).

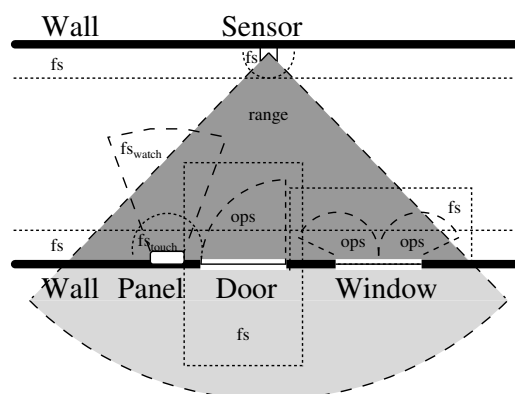


Abb. 3.13.: Beispiele für *Functional Space* (fs), *Range Space* (range) und *Operational Space* (ops) (Quelle: [Bhatt u. a. \(2009\)](#))

Die Relationen und Bedingungen zwischen Entitäten (Möbiliar, architektonische Elemente, Spatial Artefacts und Sensoren) der intelligenten Umgebung werden in einer Ontologie abgelegt. Mit Hilfe der Reasoning Engine *RacerPro*¹⁷ werden die Entitäten der Ontologie instanziiert, mit ihrer räumlichen Repräsentation aus einem IFC Gebäudemodell verbunden und anschließend die in der Ontologie fixierten Bedingungen überprüft. Dieser Mechanismus erlaubt in einer frühen Designphase die Überprüfung der korrekten Anordnung der Gegenstände und Sensoren.

¹⁷Webseite: <http://www.racer-systems.com>

3.4.2. Ubiquitous Space Information Model

Nach [Choi u. a. \(2008\)](#) seien die gängigen semantischen Modelle für den Innenraum bislang nicht in der Lage, die Anforderungen ubiquitärer Umgebungen in angemessener Weise abzubilden, um sie für *Indoor GIS* bereitzustellen. Daher wurde von ihnen ein Modell entwickelt, das sie im hier vorgestellten Papier „Developing Ubiquitous Space Information Model for Indoor GIS Service in UbiComp Environment“ ([Choi u. a. \(2008\)](#)) diskutieren.

„Existing BIM and GIS Standards such as Industry Foundation Classes (IFCs), OpenGIS and CityGML cannot explain the information of [ubiquitous] indoor environment in detail. In addition [...] there is no solution to integrate U-service related components into spatial data model of indoor environment.“
– [Choi u. a. \(2008\)](#)

Das Modell, das sie als *Ubiquitous Space Information Model* (USIM) bezeichnen, kann als Erweiterung des bereits diskutierten IFC Standards durch einen „UbiComp“-Layer angesehen werden. Es integriert ubiquitäre Entitäten (wie Sensoren und Aktoren) unter Bewahrung ihrer dynamischen Aspekte. Neben einer Gebäudeontologie und einem STR-Plan (Form eines semantischen Flurplans) enthält das USIM-Modell eine neu definierte Datenebene, das die Gebäudetopologie sowie die intelligenten Gebäudeentitäten abbildet.

Das sog. *Mash-up Module*, das Teil des USIM-Modells ist, ist an die gleichnamige Technik des *semantic Web* angelehnt, das die Kombination mehrerer Informationsquellen ermöglicht. In USIM definiert es verschiedene *Smart Components*: Point of Interests, Sensoren, Aktoren, mobile Objekte (Menschen, Vehikel oder auch Roboter), Knotenpunkte für Routen zur Pfadgenerierung und sog. *Route Links*, die die Relation zweier Elemente modellieren. Mit Letzterem können bspw. Sensoren mit bestimmten Elementen, wie Türen o.ä. verknüpft werden.

3.5. Fazit

In diesem Kapitel wurden wissenschaftliche Forschungsprojekte aus unterschiedlichen Fachdomänen untersucht, die für einen modellbasierten räumlichen Service in Smart Home Umgebungen relevant sind. Im Folgenden findet eine Abgrenzung der eigenen Arbeit zu den betrachteten Arbeiten statt. Im Zuge dessen werden Vor- und Nachteile der Lösungen besprochen und erörtert, welche Erweiterungen über die vorgestellten Arbeiten hinaus notwendig sind.

Hierzu wurde zunächst der [Einsatz dreidimensionaler Gebäudemodelle in intelligenten Umgebungen](#) betrachtet. Es wurde deutlich, dass in der wissenschaftlichen Literatur noch keine vergleichbare Realisierung existiert, die den Funktionsumfang und Anforderungskatalog des

räumlichen Services abdeckt (mit Ausnahme des Papiers von [Brumitt u. a. \(2000\)](#), das jedoch im Wesentlichen als Ideenskizze anzusehen ist). Der Fokus liegt in den aktuellen Arbeiten vielmehr auf der 3D Gebäudemodell-basierten *Visualisierung*, *Simulation* und *Mensch-Maschine Schnittstelle*. Zu Letzterem ist insbesondere die Arbeit von [Hossain u. a. \(2011\)](#) hervorzuheben, die einerseits ein 3D Modell als grafisches Interaktionsmedium verwenden und andererseits die Synchronisation zwischen realer Welt und virtuellem Modell realisiert haben. Diese Form der Synchronisation wird auch von [Brumitt u. a. \(2000\)](#) gefordert und ist somit auch übertragbar auf den angestrebten räumlichen Service.

Den bisherigen Projekten ist gemein, dass kein erweiterbares, standardisiertes Geometriemodell verwendet wird. Dies hat einige negative Konsequenzen: Anpassungen des Modells an das Programm (z.B. durch Attributierungen) könnten eine Weiterverarbeitung in anderen Tools unmöglich machen. Die Folge ist ein Verlust der *Interoperabilität*, sodass bei Änderungen am Modell (z.B. durch einen Architekten) die programminternen Anpassungen verloren gehen und stets wiederholt eingegeben werden müssen.

Weiterhin wird dadurch die *Portierbarkeit* in eine neue (Wohn-)Umgebung erschwert – es müssen stets Adaptionsprozesse (u.a. Formatkonvertierungen evtl. vorhandener Modelle) entwickelt oder ein komplett neues Modell erstellt werden.

Aufgrund dessen ist der räumliche Service auf Basis eines standardisierten, semantischen Modells zu entwickeln, das durch eine Klassenhierarchie oder Attributierungen eine standardkonforme Erweiterung des Modells ermöglicht. Rechnet man mit einer stetig ansteigenden Verbreitung standardisierter Formate aus dem Bauwesen oder im Bereich der Geoinformationssysteme, liegen semantische Modelle künftig für (nahezu) jedes Gebäude vor. Die Verwendung dieser Modelle führt daher zu einer *Minimierung des Modellierungsaufwandes*, ermöglicht die *Interoperabilität* zwischen Softwarekomponenten (z.B. zwischen Architekturtools, Simulationsframeworks) und gewährleistet daher die *Portierbarkeit* des räumlichen Services. Deswegen wurden anschließend die wichtigsten Fachdomänen für semantische Gebäudemodelle betrachtet.

In Kapitel 3.2 wurden *BIM und GIS – Lieferanten semantischer 3D Gebäudemodelle* untersucht, mit dem Ziel Vor- und Nachteile sowie die vergangenen und aktuellen gemeinsamen Problemstellungen aufzuzeigen und dabei im Kontext eines räumlichen Services für intelligente Umgebungen zu betrachten. Hierbei stehen die in einer Fülle an Forschungsprojekten angewandten internationalen Standards *CityGML* (GIS) und *IFC* (BIM) im Vordergrund der Untersuchungen. Die Recherchen haben ergeben, dass es sich um sehr *generische Modelle* handelt, die nur in Richtung einzelner Fachdomänen Spezialisierungen aufweisen (z.B. für den Brandschutz). Die IFC Klassen bieten zwar ein sehr hochdetailliertes Innenraummodell an – dieses genügt dennoch nicht den Anforderungen einer ubiquitären Umgebung. Daher steht im Rahmen des räumlichen Services neben den genannten Aspekten der Interoperabilität, Portierbarkeit und der Minimierung des Modellierungsaufwandes die *Erweiterbarkeit* des semantischen Modells im Vordergrund. Hier sind zunächst *statische Zusatzinformatio-*

nen von Interesse, welche die spezifischen Eigenschaften eines Smart Homes (z.B. besondere Objekte wie Lokalisationstags oder Objekteigenschaften wie geschlossen/offen) repräsentieren. Beide Modelle haben die Fähigkeit erweitert zu werden. CityGML durch sog. *Application Domain Extensions* (ADE), die eine *Unterklassenbildung* und das Hinzufügen von *Properties* ermöglichen mit dem Nachteil, dass ein Mehraufwand durch das Schreiben der erforderlichen Schema-Definitionen (XSD) entsteht¹⁸. BIM-Modelle können lediglich durch *Properties* erweitert werden, was einerseits eine Beschränkung darstellt, andererseits aber leicht zu realisieren ist und von gängigen Modellierungswerkzeugen unterstützt wird.

Der zweite Aspekt (neben der Erweiterbarkeit) sind die Möglichkeiten zur *räumlichen Analyse* der semantischen Modelle. Im 2D GIS Bereich besteht allgemeiner Konsens darüber, dass diese Systeme, in allen von [Raper und Maguire \(1992\)](#) an GIS formulierten Anforderungen (Datenerfassung, -strukturierung, -manipulation, -analyse und -visualisierung), erfüllt werden. Insofern kann hier auf robuste Bibliotheken zur räumlichen 2D Analyse zurückgegriffen werden.

Herausforderungen finden sich bei GIS und BIM insbesondere im 3D Bereich. Hier haben sich zwei Problemstellungen herauskristallisiert: 1. ist die Integration von BIM in GIS Stadtmodelle aufgrund der unterschiedlichen semantischen Modellierungen schwierig zu realisieren 2. sind noch keine umfangreichen, robusten räumlichen DBMS für 3D Analysen erhältlich. Der erste Aspekt bezieht sich auf die *Portierbarkeit* des räumlichen Services – dieser sollte möglichst viele semantische Modellarten als Datenbasis unterstützen. Der zweite Aspekt betrifft die räumliche Analyse der 3D Geometriedaten, die nur mit entsprechenden Bibliotheken oder SDBMS realisiert werden kann.

Bislang gibt es hier nur eine Realisierung durch die Forschungsgruppe um [Borrmann u. a. \(2006\)](#). Diese haben die wesentlichen räumlichen Operatoren umgesetzt, eine Analyse kann aber bislang nur über das nicht-semantische VRML-Format erfolgen, das derzeit *manuell* erzeugt werden muss. Dennoch sollte eine Integration der Umsetzung von Borrmann vorgenommen werden. Insofern wird angestrebt, die Vorzüge beider Welten – 2D GIS und 3D BIM – in Bezug auf ihr semantisches Modell und eine geometrische Analyse in den räumlichen Service zu integrieren.

Durch ein Beispielszenario in der *Motivation* zu dieser Arbeit wurde deutlich, dass die Analyse räumlicher Relationen ein wichtiger Bestandteil des räumlichen Services ist. Zum *Austausch* dieser Relationen bedarf es einer genaueren Analyse, welche Relationen in 2D und 3D existieren, ob und wie sie sich unterscheiden und welche Formalismen sich zur Beschreibung eignen, um diese als Repräsentationsform zwischen Subsystemen einzusetzen. Dieses wurde im Kapitel *Räumliche Relationen* genauer untersucht.

Zunächst sind in diesem Kapitel die Grundlagen zur Analyse und Repräsentation *räumlicher Relationen* veranschaulicht worden. Hier wurden die Operatoren *topologisch*, *metrisch*,

¹⁸Webseite der TU-Berlin: [Adding your own Application Domain Extensions \(ADE\) to citygml4j](#)

direktional und *fuzzy* zur Beschreibung der Relationen identifiziert. Zunächst wurden Relationen in 2D betrachtet, die vor allem durch [Egenhofer und Herring \(1990\)](#) vorangebracht worden sind. Die dritte Dimension hat schließlich [Zlatanova \(2000\)](#) formal beschrieben und Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede zum 2D Bereich hervorgehoben.

Für diese Arbeit ist die Erkenntnis wichtig, dass bei der topologischen Betrachtung von Körper und Körper in 3D genauso viele mögliche Konfigurationen wie bei Flächen in 2D vorhanden sind – die Formalismen zur Beschreibung der Relationen müssen demnach in den für den räumlichen Service relevanten Szenarien keine prinzipielle Unterscheidung in 2D und 3D aufweisen. Die dritte Dimension erweitert lediglich die zweite um die gerichteten Präpositionen *above* und *below*.

[Borrmann u. a. \(2006\)](#) hat im Sinne einer räumlichen 3D Abfragesprache für Bauwerksmodelle hierauf hin die Operatoren in *metrisch*, *topologisch* und *direktional* unterteilt und für Letztere zwei Modelle definiert, die wiederum in *strict* und *relaxed* gegliedert sind. Hier war z.B. die Erkenntnis wichtig, welche semantische Bedeutung z.B. dem Prädikat „above_halfspace_strict“ von Borrmann inne liegt, da die in seinem Projektteam entwickelte 3D Abfragesprache verwendet werden soll.

Nach der formalen Beschreibung räumlicher Relationen durch z.B. Relationentupel oder Prädikate zum Austausch von Szenenbeschreibungen zwischen Softwareagenten, folgte eine der *menschlichen Raumwahrnehmung* gewidmete Betrachtung, die sich auf unterschiedliche Referenzsysteme, Fuzzyness und Naive GIS konzentrierte.

Schließlich wurden [Erweiterte Modelle zur Kontextinterpretation in intelligenten Umgebungen](#) vorgestellt. Zunächst sind die von [Bhatt u. a. \(2009\)](#) definierten *Spatial Artefacts* untersucht worden, die Entitäten einer Wohnumgebung mit nicht-physischen, aber dennoch raumeinnehmenden Volumina annotieren. Ein Waschbecken ist in diesem Modell z.B. von einem *Functional Space* umgeben, der den Bereich angibt, in dem Menschen mit dem Becken „interagieren“ können. Der Raumbereich, der von Sensoren abgedeckt wird, wird hier als *Range Space* bezeichnet. Die räumlichen Artefakte werden im Forschungsbereich von Bhatt für eine Validierung von Gebäudemodellen in der Planungsphase eingesetzt (z.B. können dadurch Fragestellungen wie „Wird Raum 3 komplett durch Kameras erfasst?“ beantwortet werden). Diese Artefakte könnten als Basis zur kontinuierlichen, räumlichen Analyse des Aufenthalts der Bewohner verwendet werden. So könnten (u.a. zur *Activity Pattern Recognition*) die Raumpunkte eines Lokalisationssystems in Kombination mit diesen Artefakten eine symbolische Deutung erfahren (z.B. zur Abbildung (1.3, 9.2, 3.0) \mapsto „FunctionalSpace Oven“). Dies gilt es noch genauer zu untersuchen.

In der von [Choi u. a. \(2008\)](#) untersuchten Arbeit wurde bemängelt, dass verbreitete, semantische Modelle für den Innenraum nicht in der Lage seien, die *Anforderungen ubiquitärer Umgebungen* in angemessener Weise abzubilden. Deswegen wurde von ihnen das auf IFC aufbauende *Ubiquitous Space Information Model* (USIM) entwickelt. Zusammen mit Tools

zur Modellierung und einer API, die im Rahmen des Projektes realisiert wurden, könnten hiermit schnell Indoor GIS entwickelt werden, die ubiquitären Anforderungen genügen.

Der Nachteil ihrer Lösung ist zum einen, dass die Modellierung des USIM-Modells und der Geometrien mit einem eigenen Tool vorgenommen wird und nicht glaubwürdig dargelegt wurde, dass die Interoperabilität mit professionellen IFC-Tools aus dem AEC¹⁹ Sektor gewährleistet ist. Zum anderen findet die Modellierung ausschließlich in 2D statt – in 3D gibt es lediglich eine Walkthrough-Ansicht. Auch wenn die Problemstellungen generischer Modelle im ubiquitären Kontext von ihrem Papier auf anschauliche Weise verdeutlicht wurden und mit dem USIM-Modell ein umfangreicher Lösungsansatz aufgezeigt wurde, fehlt es dennoch an einer nahtlosen Integration in den AEC-Prozess. Hier ist zu eruieren, in wie weit und ob überhaupt das USIM-Modell für den räumlichen Service anwendbar ist, oder ob Lösungen innerhalb der IFC-Klassen möglich sind.

¹⁹AEC: Architecture, Engineering & Construction

4. Analyse

Dieses Kapitel befasst sich in erster Linie mit den *Anforderungen*, die sich an einen räumlichen Service ergeben. Hierzu werden zunächst in Kap. 4.1 Szenarien aufgezeigt, die das Einsatzspektrum verdeutlichen. Die Szenarien sind in sechs Bereiche unterteilt: *Multimodale Interaktionen*, *Location Based Media*, *Virtuelle Raumannotationen*, *Räumliche Suche*, *Activity Pattern Recognition* und *Zustandsabbild physischer Objekte*. Zu jedem Szenario wird jeweils kurz der Beitrag des räumlichen Services skizziert.

Anschließend werden in Kap. 4.2 in einer umfangreichen Anforderungsanalyse die zur Realisierung der Szenarien erforderlichen Eigenschaften eines räumlichen Services dargelegt. Hierzu wird zunächst die Notwendigkeit eines *semantischen Geometriemodells* und der *Konsistenzwahrung zwischen virtuellem Modell und Realität* erörtert. Darauf folgend wird in *Kontinuierliche Aufenthaltsanalyse* und *Analyse räumlicher Relationen* auf die Analysefähigkeiten des Services eingegangen.

Schließlich werden die *technischen Anforderungen*, unterteilt in die Komponenten *Kommunikation*, *Visualisierung*, *Persistenz*, *Analyse und Modifikation*, beschrieben.

4.1. Szenarien

In Abb. 4.1 sind Anwendungsbereiche digitaler Gebäudemodelle in *Smart Homes* klassifiziert. Auf der linken Seite sind die größtenteils in anderen Arbeiten untersuchten Anwendungsfelder *Navigation und Lokalisierung*, *Simulation und Visualisierung*, *Planung* und *User-Interface* aufgeführt, rechts davon Anwendungsbereiche, die den *räumlichen Service* betreffen. Die gestrichelten Pfeile deuten eine enge Beziehung der Gebiete untereinander an.

Zu diesen Bereichen werden im Folgenden eine Reihe an Beispielszenarien mit *Sal* als Bewohnerin einer intelligenten Wohnumgebung aufgeführt (adaptiert von [Weiser \(1991\)](#)). Die Rolle des räumlichen Services wird jeweils kurz diskutiert.

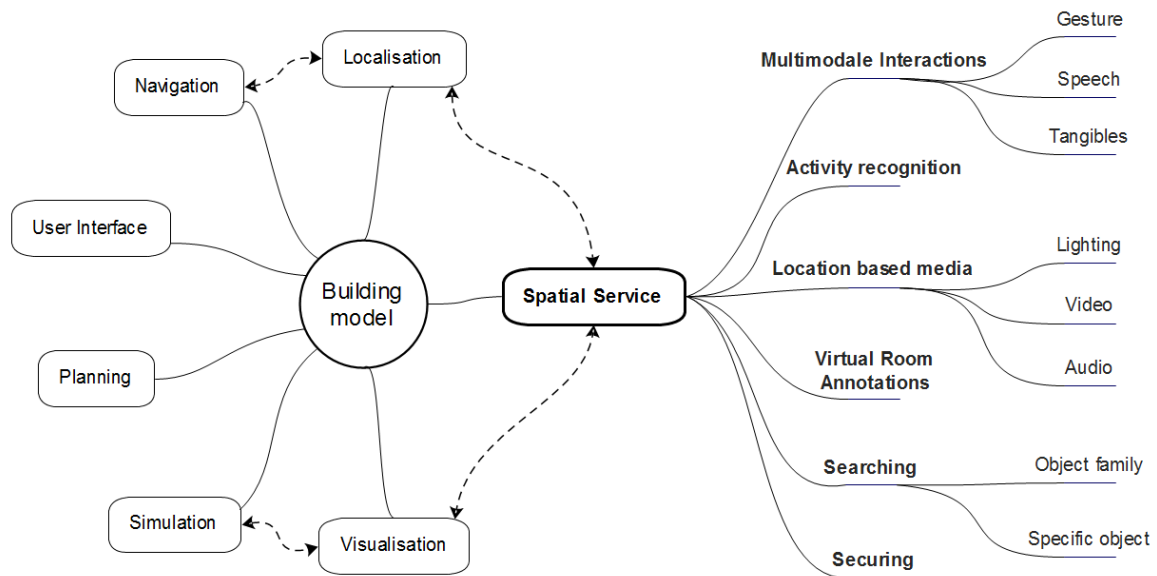


Abb. 4.1.: Modell-basierte Anwendungen in intelligenten Umgebungen

4.1.1. Multimodale Interaktionen

Die Komplexität vernetzter, inhomogener Systeme in Smart Homes erfordert einfache Interaktionsmöglichkeiten für die Bewohner. Daher werden multimodale Interaktionsformen zunehmend für ihren Einsatz in intelligenten Umgebungen untersucht (vgl. [Manchón u. a. \(2007\)](#), [Blumendorf u. a. \(2008\)](#), [Weingarten u. a. \(2010\)](#) uem.). Insbesondere GBI (Gesture Based Interaction) und SUI (Speech User Interface) stehen im Fokus, aber auch Devices wie *Tangibles* (vgl. [Butz u. a. \(2005\)](#)) werden entwickelt (kurz TUI – Tangible User Interface).

[Grimm u. a. \(2004\)](#) fordern in diesem Zusammenhang, dass Anwendungen bzw. Agenten untereinander und mit anderen Netzwerkservices interagieren und sich selbst anpassen müssen. Diese Fähigkeit bezeichnen sie als *Interposition*:

„Interposition makes it possible to dynamically change the behavior of an application or add new behaviors without changing the application itself.“
– [Grimm u. a. \(2004\)](#)

Es folgen einige Beispiele, in denen der räumliche Service multimodale Interaktionsformen durch Kontextwissen zu erweiterten Möglichkeiten verhilft.

Gesten-basierte Steuerung *Um das Licht über dem Esstisch zu dimmen, zeigt Sal darauf und signalisiert mit einer sanften Bewegung ihrer Hand nach unten, dass das Licht gedimmt werden soll.*

Hier wird mit Hilfe von Bilderkennungsverfahren die Geste erkannt und gedeutet, sowie

der räumliche Bereich erfasst, der Ziel der Geste war. Eine Anfrage an den räumlichen Service ergibt eine begrenzte Menge an Objekten, die sich in diesem Bereich befinden. Die Semantik der Geste wird auf das wahrscheinlichste Element angewandt – in diesem Beispiel ist es die Zimmerleuchte.

Steuerung per Sprache *Da die morgendlichen Sonnenstrahlen Sal beim Lesen stören, fordert sie: „Bitte die Rollläden hier schließen.“*

Eine Spracherkennungskomponente (u.a. realisiert in [Witt \(2011\)](#)) erkennt, dass die Rollläden geschlossen werden sollen. Der *lokaledeiktische* Begriff *hier* stellt eine besondere sprachliche Herausforderung dar, da sich die Semantik nur aus dem Kontext erschließt ([Witt \(2011\)](#)). Der räumliche Service schafft hierbei Abhilfe, indem der Aufenthaltsort von Sal, der z.B. durch ein Lokalisationssystem detektiert wird, mit dem Gebäudemodell überlagert wird. Dadurch kann der deiktische Begriff *hier* zu „im Esszimmer“ aufgelöst werden. Zudem ist im Modell bekannt, welche Rollläden der Raum enthält, sodass das Schließen veranlasst werden kann.

Steuerung per Tangible *Sal möchte die Farbstimmung im Esszimmer ändern. Hierzu nimmt sie den Cubicle (siehe Abb. 4.2) und kippt ihn um, bis die Seite mit dem Farbsymbol oben liegt. Sie dreht den Cubicle nun so lange, bis der gewünschte Farbton im Zimmer erreicht ist.*

Der *Cubicle* (realisiert in [Gregor u. a. \(2009\)](#)) gehört zu den *Tangible Interaction Devices* – Objekte, die als Human-Computer-Interface dienen. In diesem Beispiel bezieht sich die Funktion „Drehen des Würfels zur Farbänderung“ auf den Ort des Tangibles (in diesem Fall das Esszimmer). Hier wird der Aufenthaltsort des Cubicles erfasst und die Funktionsweise auf Basis seines räumlichen Kontextes interpretiert.

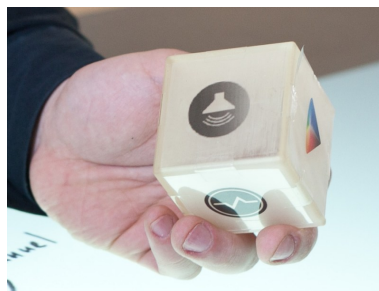


Abb. 4.2.: Hamburg Cubicle – ein Tangible Interaction Device ([Gregor u. a. \(2009\)](#))

4.1.2. Location Based Media

Medien wie Licht, Bild und Ton werden nur dort benötigt, wo sich die Bewohner aufhalten. Ist der Aufenthaltsort bekannt, können die Medien mit Hilfe des räumlichen Services nahtlos in

alle Räume folgen („Seamless Media“). [Brumitt u. a. \(2000\)](#) sprechen hier von der Aufrechterhaltung einer interaktiven „Session“.

Location Based Media *Sal sitzt auf dem Sofa im Wohnzimmer und unterhält sich per Videokonferenz mit ihrer Mutter. Sie geht in die Küche, um den Braten im Backofen zu begutachten. Ohne ihr Zutun geht das Licht in der Küche an, das Bild ihrer Mutter wird auf den Touchtresen und ihre Stimme über die nächstgelegenen Lautsprecher übertragen. Licht, Bild und Ton sind währenddessen im Wohnzimmer automatisch ausgeschaltet worden.*

In diesem Szenario der „folgenden“ Medien stellt der räumliche Service kontinuierliche Informationen über den Aufenthalt von Sal bereit, sodass Softwareagenten Licht, Bild und Ton dort anschalten können, wo sie benötigt werden. Auch die zu Sal nächstgelegenen Medien (z.B. das nächste Display) können über eine Serviceanfrage ermittelt werden.

4.1.3. Virtuelle Raumnotationen

Einige Forschungsarbeiten befassen sich damit, die reale Welt mit der digitalen zu verbinden und mit *virtuellen Annotationen* anzureichern oder (z.B. mit *augmented Reality*) darzustellen. Dies geschieht u.a. mittels *Contextual Bookmarks* (vgl. [Henze u. a. \(2008\)](#)), *Seamless Media Space* ([Hirakawa u. a. \(2003\)](#)), *GeoNotes* ([Espinoza u. a. \(2001\)](#)) oder *Virtual Notes* ([Rudolf \(2011\)](#)). Digitale Daten mit dem Kontext der Bewohner bzw. Nutzer zu verknüpfen, bezeichnen [Abowd u. a. \(1999\)](#) allgemein als *Contextual Augmentation*. Hierzu folgt nun ein Beispiel.

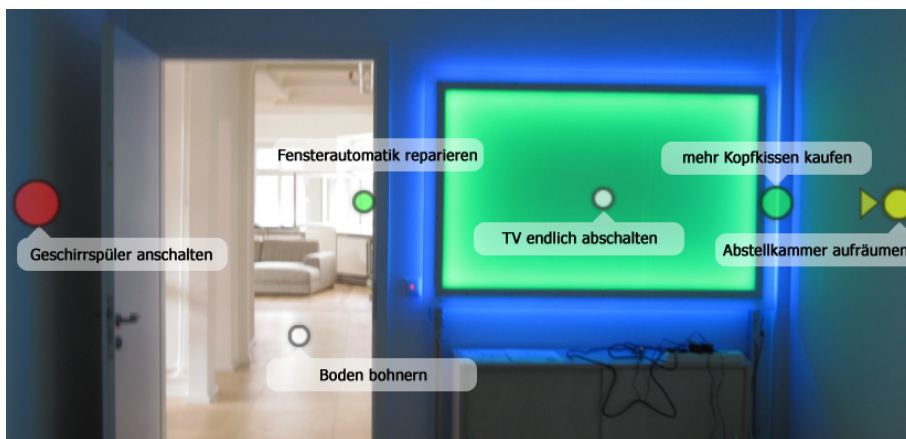


Abb. 4.3.: Virtual Notes (Quelle: [Rudolf \(2011\)](#))

Shared notes – virtuelle Notizen *Sal möchte Milch aus dem Kühlschrank holen, stellt aber fest, dass keine mehr da ist. Sie holt ihr Smartphone aus der Hosentasche und fokussiert mit der Kamera den Kühlschrank, sodass sie ihn auf dem Display sieht. Sie tippt auf den Kühlschrank und hinterlässt eine Nachricht mit hoher Priorität für ihren Freund. Wenn dieser das nächste Mal in die Nähe kommt, erhält er einen entsprechenden Hinweis Milch einzukaufen.*

Zur Realisierung dieses Szenarios ist es erforderlich, dass das Objekt (hier der Kühlschrank) erkannt wird. Zur Objekterkennung ließe sich *Image Recognition* einsetzen – in [Rudolf \(2011\)](#) werden jedoch die im Gebäudemodell enthaltenen Geometrien des räumlichen Services genutzt und durch eine Serviceanfrage, basierend auf dem Standpunkt und der Blickrichtung des Betrachters, das entsprechende Objekt erfragt.

4.1.4. Räumliche Suche

Die Suche in Form eines *Spatial Assistance Systems* (vgl. [Knauff u. a. \(2002\)](#), [Schultz und Bhatt \(2010\)](#)) unterstützt die Bewohner beim Auffinden von Gegenständen. Sie befasst sich aus Sicht des räumlichen Services mit der Analyse räumlicher Relationen von Gegenständen. Die Relationen (*in, darauf, daneben, in der Nähe* etc.) dienen zur Beschreibung des Fundortes.

Die Suche kann sich beispielsweise auf eine *Familie* von Objekten (z.B. auf *einen Stuhl* oder *eine Schere*) oder auf ein spezifisches Objekt (z.B. *die TV-Fernbedienung* oder *mein Mobiltelefon*) beziehen.

Objektsuche – Auflösung räumlicher Relationen *„Wo ist meine Sonnenbrille?!“, fragt Sal die Wohnung. „Die Sonnenbrille liegt in der Küche auf dem Küchentresen in der Nähe der Kaffeemaschine.“ ertönt es.*

Mit Hilfe von Bilderkennungsverfahren (z.B. SIFT oder SURF) wird zunächst die Position des Gegenstandes im Raum berechnet (vgl. [Najem \(2011\)](#)). Durch eine Anfrage an den räumlichen Service werden die Gegenstände in unmittelbarer Umgebung inklusive ihrer räumlichen Relationen zurückgegeben und Sal daraufhin eine verbale Beschreibung des Fundortes geliefert. Das Gebäudemodell wird hier als Dienst zur Auflösung räumlicher Relationen verstanden.

4.1.5. Activity Pattern Recognition

Die *Activity Pattern Recognition* befasst sich mit dem Erkennen von Tagesroutinen bzw. alltäglichen Abläufen, sog. *Activities of Daily Living*¹ (ADL). Sind ADL erkannt, kann eine entsprechende Reaktion der Wohnung bzw. Zustandsänderungen von Softwareagenten erfolgen.

Morgenroutine *Sal steht früh am Morgen auf. Sie geht zum Bad, um sich zu duschen. Danach zieht sie sich im Schlafzimmer an und isst anschließend ihr Frühstück in der Küche. Daraufhin verlässt sie ihr zu Hause und fährt zur Arbeit.*

Um für die morgendlichen Abläufe („Aufstehen“, „Waschen“, „Anziehen“ etc.) eine adäquate Atmosphäre zu schaffen, ist es erforderlich, diese Muster zu erkennen. Dadurch können angemessene Reaktionen der Umgebung erfolgen (z.B. aktivierende Beleuchtung, Lüften des Schlafzimmers).

Das Gebäudemodell kann hierbei durch Analyse des Aufenthaltsortes von Sal hilfreiche Informationen liefern (vgl. [Ellenberg u. a. \(2011a\)](#)). Eine feingranularere Aufenthaltsbestimmung als ausschließlich über Räume, bieten die bereits erwähnten *Spatial Artefacts* an (vgl. [Bhatt u. a. \(2009\)](#)). Wenn Sal ihr Frühstücksei kocht, wird sie sich z.B. längere Zeit im Funktionsbereich (sog. *functional space*) des Herdes aufhalten. Dies stellt einen weiteren Beitrag zur Kontexterkennung in Smart Environments dar.

4.1.6. Zustandsabbild physischer Objekte

Die semantische Anreicherung von Sensorwerten durch den räumlichen Service stellt eine weitere Einsatzmöglichkeit von Gebäudemodellen dar. Hierbei spiegeln die Gegenstände im digitalen Gebäudemodell den Zustand ihrer realen Pendanten wider. Die Sensorrohdaten werden den entsprechenden Entitäten zugewiesen (z.B. ein Temperaturwert einem Raum, ein Kippschalter einem Fenster) und bei Änderungen sowie auf Nachfrage anderen Softwaresystemen semantisch angereichert zur Verfügung gestellt. Anfragen können beispielsweise auch an eine *Familie* von Objekten gerichtet sein, z.B. „Ist ein Fenster geöffnet?“.

Verlassen der Wohnung *Beim Verlassen der Wohnung wird Sal gewarnt: „Die Fenster im Schlafzimmer sind geöffnet und eine Herdplatte in der Küche ist noch eingeschaltet.“ Daraufhin schließt Sal die Fenster und schaltet den Herd aus.*

Der räumliche Service reichert hierbei Sensorwerte semantisch an, indem es z.B. „Sensor x2 = false“ als „Fenster 3 ist geöffnet“ interpretiert.

¹ *Activities of Daily Living* (ADL) entstammen einem konzeptionellen Modell der Pflege Älterer (eingeführt in [Katz und Akpom \(1976\)](#))

Schließen der Rollläden *Sal möchte sich umziehen und veranlasst das Schließen der Rollläden. Es ertönt ein Warnhinweis: „Achtung, die Rollläden können nicht geschlossen werden, da noch Fenster im Wohn- und Schlafzimmer geöffnet sind. Bitte schließe erst die Fenster.“*

Durch das Gebäudemodell ist bekannt, dass die Rollläden, die über den Fenstern angebracht sind, bei geöffnetem Fenster nicht heruntergelassen werden dürfen, da diese sonst beschädigt werden. Daher wird Sal gewarnt die Fenster zunächst manuell zu schließen.

4.2. Anforderungsanalyse

Es folgt eine Analyse der in den Szenarien implizit enthaltenen Eigenschaften, dessen Realisierung für einen räumlichen Service erforderlich sind.

4.2.1. Semantisches Geometriemodell zur räumlichen Analyse

Zur Realisierung der räumlichen Kontextinterpretation im Sinne der *Location Awareness* ist ein Modell erforderlich, dessen geometrische Ausprägungen die Basis der räumlichen Analyse bilden. Um exakte Analyseergebnisse erzielen zu können, ist eine adäquate Abbildung der realen Umgebung erforderlich. Diese manifestiert sich in einem 3D Modell der Wohnung mit Inneneinrichtung, bestehend aus beweglichem Mobiliar (Stühle u.ä.) sowie fest platzierten Elementen (Ofen u.ä.). Die dritte Dimension ist z.B. im Szenario *Räumliche Suche* erforderlich, da ansonsten nicht bekannt ist, ob sich ein Objekt *unter* oder *über* einem anderen befindet.

Da der *Detailgrad der 3D Modellierung* sowie die Auswahl der zu modellierenden Entitäten von den Anwendungsfällen abhängt, ergibt sich ein Mindest-, Standard- und Hochdetailierungsmaß. Das Mindestmaß an enthaltenen Raumentitäten umfasst Wände, Türen und Fenster. Es deckt somit nicht alle Szenarien ab – ein räumlicher Service kann in dieser Ausprägung nur eine grundlegende Kontextanreicherung bieten (u.a. Aufenthalt in Räumen, Ein- und Austritt aus der Wohnung). Das Standardmaß zur Erfüllung der *Szenarien* enthält außerdem alle explizit genannten Objektfamilien. Hierzu gehören insbesondere Bildschirme, Lampen und Möbel (darunter *mobile Gegenstände*). Diese Granularität bietet bereits eine hohe Detailgenauigkeit bei der Aufenthaltsanalyse („Sal befindet sich im Esszimmer und ruht längere Zeit auf dem Stuhl vor dem Esstisch.“). Ein hochdetailliertes Modell beinhaltet zudem *alle* physisch vorhandenen Gegenstände (z.B. Mobiltelefon, Fernbedienung).

Für die in Kap. 4.1 vorgestellten Szenarien sind die Beschaffenheit der Objekte in Form von Texturierung, Farbe und Material nicht von Interesse – die relevanten Informationen der

Objekte sind vielmehr in ihren *räumlichen Ausmaßen* und Annotationen (z.B. Objekttyp) enthalten.

Zudem sind weiterreichende, im Modell *geometrisch explizit* enthaltene *nicht-physische* Informationen von Nutzen, die die Relation von Personen zu Gegenständen der Wohnung widerspiegeln (vgl. *Spatial Artefacts*). Z.B. hält sich eine Person beim Kochen längere Zeit *in der Küche* im *Bereich vor dem Herd* auf. Das Areal der *Küche*, die nicht zwangsweise durch Wände vom Rest der Wohnung abgetrennt sein muss, sollte explizit im Modell enthalten sein. Die *Aufenthaltszone* vor dem Herd (und anderer Gegenstände) sollte aus der Entitätsgeometrie abgeleitet oder manuell definiert werden können und ebenfalls Teil des Modells sein.

Das Modell muss über die geometrischen Informationen hinaus expliziten *Zugriff* auf einzelne Entitäten bzw. Typen von Entitäten ermöglichen. D.h., dass einerseits *alle* Räume, Mobiliar, Türen, Fenster usw., aber auch einzelne Entitäten selektierbar sein müssen. Hierzu ist ein *Objektmodell* in Form einer *Taxonomie* erforderlich, in der die Entitäten des Gebäudemodells – gleichsam einer Ontologie – eingeordnet werden.

Ein zusätzlicher Attributierungsmechanismus (u.a. auch um Zustände wie offen/geschlossen abzubilden), der auf Klassen von Objekten oder einem speziellen Objekt angewandt werden kann, ist obligatorisch. Zudem sollten weitere semantische Informationen modelliert werden können, wie z.B. die Verknüpfung zweier Räume durch Türen, so dass hierzu keine weiteren geometrische Analysen erforderlich sind.

Die Modellierung und somit letztlich das Ausgabeformat des Gebäudemodells sollte im Sinne eines interdisziplinären Austausches und der Portierbarkeit einem offenen und *semantischen* Standard folgen.

4.2.2. Konsistenzwahrung zwischen virtuellem Modell und Realität

„Wohnen“ impliziert die Interaktion der Bewohner mit Gegenständen der Wohnung. Dies hat zur Folge, dass dabei sowohl *Zustände* verändert werden (z.B. Anschalten des Fernsehers, Öffnen der Rollläden und Fenster) als auch *Positionen* (z.B. werden Stühle beim Essen am Tisch verschoben). Außerdem werden üblicherweise neue Gegenstände in die Wohnung eingebracht und andere entfernt. Das digitale Gebäudemodell muss dieser dynamischen Welt angepasst werden, sich mit ihr synchronisieren.

Eine Synchronisation zwischen realer Welt und virtuellem Abbild wurde auch im Papier von [Brumitt u. a. \(2000\)](#) gefordert und in den Arbeiten von [Hossain u. a. \(2011\)](#) (vorgestellt in [3D Gebäudemodelle als Basis für Mensch-Maschine-Schnittstellen](#)) vorgenommen. Hier wurde ein virtuelles Pendant einer Wohnung in *Second Life* (SL) geschaffen. Aktionen der Bewohner in SL (z.B. Dimmen des Lichts) werden hier in die reale Welt übertragen, aber ebenso

wird umgekehrt beispielsweise das Öffnen einer Tür auch in der virtuellen Welt visualisiert. Der Fokus liegt vor allem in einer verbesserten Mensch-Maschine-Kommunikation.

Die Anforderungen, die sich für den räumlichen Service ergeben, sind ähnlich und werden im Folgenden beschrieben.

Ortskonsistenz

Der Großteil der Gebäudemodellentitäten ist statisch. Hierzu zählen u.a. Wände, Deckenplatten, Türen, Fenster und andere vorwiegend statische Einrichtungsgegenstände (Einbauküche, Bett, Beleuchtung, Rollläden etc.). Auch wenn einige Objekte dieser Gruppe dynamischen Charakter haben (z.B. Türen, Fenster, Rollläden), sind sie dennoch örtlich fest gebunden.

Demgegenüber stehen mobile Gegenstände, deren Position sich durch die Bewohner oder autonom (neuartige Staubsauger o.ä.) ändert. Dies führt zwangsläufig dazu, dass die Gegenstände im digitalen Gebäudemodell einen anderen Aufenthaltsort haben, als ihre realen Pendanten. Ohne eine Korrektur des Modells, können Anfragen über räumliche Relationen (wie im Szenario der *räumlichen Suche*) fehlerhafte Ergebnisse liefern, z.B. wenn eine Person als im Raum stehend interpretiert wird, obwohl sie auf einem Stuhl vor dem Esstisch sitzt, weil der Stuhl zuvor verschoben wurde.

Daher ist ein Mechanismus umzusetzen, der zunächst die Positionsänderungen einzelner Gegenstände inklusive deren Rotation detektiert und die aktuelle Position an das Modell weiterreicht. Daraufhin muss das Modell entsprechend der neuen Positionen angepasst werden. Um die Position der Gegenstände ermitteln zu können, muss auf Informationen externer Lokalisierungssysteme (z.B. kamera- oder funkbasiert) zurückgegriffen werden.

Zustandskonsistenz

Die meisten Gebäudemodellentitäten sind lediglich von ihren geometrischen Ausmaßen her interessant (u.a. Wände oder Stühle). Wie im Szenario *Zustandsabbild physischer Objekte* beschrieben, wird bei einigen aber auch ihr *Zustand* zur Kontextanreicherung in Serviceanfragen integriert (z.B. „In welchen Zimmern sind Fenster und Türen *geöffnet*, in welchen Geräte *eingeschaltet*?“).

Im Gebäudemodell müssen diese Zustände zunächst abgebildet werden, um sie daraufhin verändern zu können. Die entsprechenden Zustandswerte haben unterschiedlichste Ausprägungen, da sie von der Art des Sensors abhängen, über die die Zustandsänderungen mitgeteilt werden (z.B. Kippschalter, Temperatur- oder Durchflusssensoren). Aus diesem Grund sind die entsprechenden Entitäten des Modells mit geeigneten Attributen zu versehen.

Änderungen im Wohnungsinventar

Werden der Wohnumgebung neue Gegenstände (temporär oder dauerhaft) hinzugefügt oder entnommen, muss ein einfacher Mechanismus dafür sorgen, dass diese entsprechend im Modell integriert oder daraus entfernt werden. [Brumitt u. a. \(2000\)](#) beschreiben und fordern hierfür eine Art „Plug and Play“ Prozedur, die den Bewohnern geringstmögliches Zutun abverlangt.

Hierfür muss zunächst der Gegenstand erkannt werden, bspw. durch Vergleich seiner Gestalt mit Gegenständen aus einer Datenbank oder besser noch direkt über eine identifizierende Markierung (Barcode, RFID-Tag o.ä.). Weiterreichende Informationen über den Gegenstand könnten dann z.B. communitygestützt oder ausgehend von den Herstellern über Webservices abrufbar sein. Hierzu gehört insbesondere die Geometrie des Objektes (die andernfalls durch bildgebende Verfahren rekonstruiert werden müsste), zu welchem Typ der Gegenstand gehört und ob der Gegenstand einen Sensor hat oder gar selbst einer ist. Zur Datenbeschreibung und -übertragung würde sich ggf. der *Web 3D Service (W3DS)*² des Open Geospatial Consortiums (OGC) eignen.

4.2.3. Kontinuierliche Aufenthaltsanalyse zur Anreicherung des räumlichen Kontextes

In den meisten Szenarien spielt der *Aufenthaltort* der Bewohner eine zentrale Rolle. So ist z.B. das *automatische Anpassen* der Umgebung, das von [Schilit u. a. \(1994\)](#) als *Context-triggered Action* bezeichnet wird, bei Ereignissen wie „Bewohnerin betritt Wohnzimmer“ nur mit genauer Kenntnis über den Aufenthalt möglich. Im Folgenden wird dies anhand einiger Beispiele verdeutlicht.

Bei den *Multimodalen Interaktionsformen*, wie der Sprachsteuerung, können deiktische Begriffe (z.B. „hier“) unter Zuhilfenahme des Gebäudemodells aufgelöst werden zu „im Wohnzimmer auf dem Sofa“. Im Szenario der *Location-based Media*, können die Medien (TV, Licht etc.) den Bewohnern nur „folgen“, wenn ihr Aufenthaltsort in Relation zu ihnen bekannt ist. Insbesondere bei der *Activity Pattern Recognition* sind Informationen über den Aufenthalt (z.B. „in der Küche vor dem Herd“) von großem Interesse, da hierbei die Wohnumgebung aktiv – im Sinne der *Active Context Awareness* ([Chen und Kotz \(2000\)](#)) bzw. *Context Adaptation* ([Pascoe \(1998\)](#)) – den Bedürfnissen angepasst werden kann.

Ebenso ist die Kenntnis des Aufenthaltsortes von Gegenständen, wie z.B. den *Tangibles*, wichtig. Im Szenario *Steuerung per Tangible* werden die Zielelemente der Interaktion anhand

²W3DS Draft: http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=8869

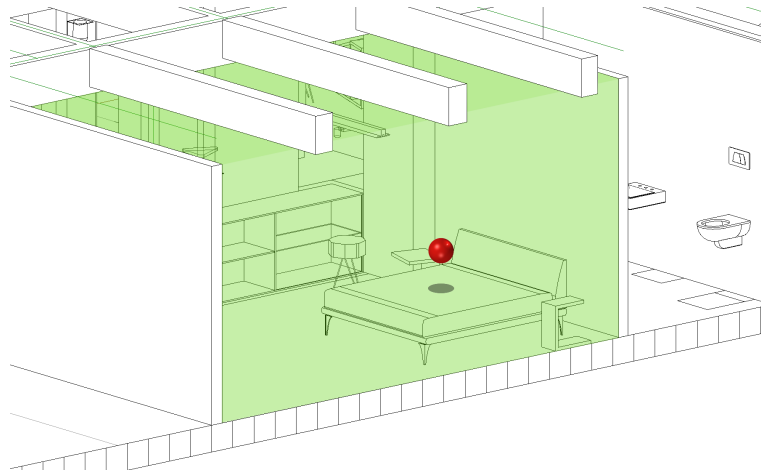


Abb. 4.4.: Skizze: Ortskoordinate (rot) im Gebäudemodell (Schlafzimmer [grün])

der Position des Tangibles ausgewählt – im Beispiel des *Cubicle* wird die Farbstimmung *im Esszimmer* durch Drehen des Tangibles geändert.

Ein *Aufenthaltort* kann, wie in Kap. 2 beschrieben, auf verschiedene Weise angegeben werden:

1. Symbolisch – z.B. „im Wohnzimmer auf dem Sofa“
2. Absolut – z.B. (7.1,8.2,1.2)

In dieser Arbeit sollen *Symbolic Locations* durch eine räumliche Analyse auf Basis eines geometrischen Weltmodells respektive Gebäudemodells und einer *absoluten Ortskoordinate* (Raumpunkt in $(X; Y; Z)$ Koordinaten), wie sie einige *Lokalisationssysteme* liefern, ermittelt werden. Da diese Transformation eine semantische Anreicherung darstellt, wird im Folgenden synonym zur *Symbolic Location* auch von einer *semantisch angereicherten Positionsinformation* (SAP) gesprochen. Das Bereitstellen dieser kontextuellen Information stellt eine der Herausforderungen dieser Arbeit dar.

Anreicherungen auf Basis der Raumtopologien

Betrachtet man das Beispiel der Transformation einer *absoluten Ortskoordinate* in die SAP-Form „im Wohnzimmer auf dem Sofa“ wird deutlich, dass zunächst das *Zimmer* als primärer Aufenthaltsort der Bewohner von Interesse ist. Auch im Szenario der *räumlichen Suche* wird deutlich, dass zunächst das *Zimmer* als primärer Fundort von Interesse ist („Deine Brille liegt *im Wohnzimmer* auf dem Sofa!“).

Abhängig von der Topologie einer Wohnung, wird ein Zimmer (oder *Raum*) meist durch Wände getrennt, hat ein Fenster und ist nur über eine Tür erreichbar. Im Falle eines Lofts, bei dem eine solch physische Trennung nicht vorhanden ist, wird die *Funktion* eines *Areals* (z.B. Küche, Schlafbereich, Wohnbereich) erst durch die Art der Möblierung ersichtlich.

Um die Eindeutigkeit von Räumen und Arealen zu gewährleisten, ist das Gebäudemodell des räumlichen Services inklusive expliziter Ausprägungen der Zimmer bzw. Bereiche zu modellieren, sodass räumliche Analysen auf Basis dieser Geometrien durchgeführt werden können.

***Spatial Artefacts* zur feingranularen Bestimmung des Aufenthaltsortes**

Neben *Räumen* ist eine differenziertere Ermittlung des Aufenthaltes für die Realisierung der genannten Szenarien erforderlich. Hierzu gehört insbesondere der Aufenthalt auf oder in der Nähe von Mobiliar und Einrichtungsgegenständen, Fenster und Türen sowie im Bereich von Sensoren und Aktoren.

Personen halten sich nicht immer direkt *auf* Gegenständen auf (wie z.B. bei einem Bett, Sofa, oder Stühlen), wenn sie diese benutzen, sondern interagieren mit ihnen innerhalb eines bestimmten *Bereiches* (z.B. Herd, Fenster, Tisch). Dies wird insbesondere im *Activity Pattern Recognition* Szenario der Morgenroutine deutlich: wenn sich Sal längere Zeit in einem *Bereich* vor dem Herd aufhält, bereitet sie wahrscheinlich eine Mahlzeit zu.

Außerdem ist es, wie im Szenario *Location-based Media*, von hohem Nutzen zu wissen, ob sich ein Bewohner in der *Reichweite* von Medien aufhält, oder welche Lampen in der Nähe sich zur Beleuchtung am besten eignen. Aus den angegebenen Beispielen der Aktivitätserkennung und Location-based Media wird ersichtlich, dass Objekte mit zusätzlichen, nicht-physischen „Zonen“ annotiert werden sollten, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Wie in Kap. 3.4.1 erläutert, wurden von *Bhatt u. a. (2009)* sog. *Spatial Artefacts* eingeführt, die Objekte mit nicht-physischen Zonen annotieren, um in einer frühen Gebäudeplanungsphase räumliche Fehlplatzierungen erkennen zu können. Zu diesen Artefakten zählen: *Functional Space* (Raum, in dem eine physische Interaktion mit dem Objekt möglich ist), *Range Space* (von Sensoren abgedeckter Bereich) und *Operational Space* (Raum, der z.B. beim Öffnen einer Tür eingenommen wird).

Um eine feingranuläre Aufenthaltsbestimmung der Bewohner zu gewährleisten, wird vorgeschlagen, die Artefakte *Functional-* und *Range Space* auch im räumlichen Service einzusetzen. Außerdem ist die Definition des Range Spaces um *Sichtbarkeitsbereiche* zu erweitern, d.h. Bereiche, in denen z.B. Bildschirme, Gemälde oder auch Hinweissignale (wie z.B. ein Fluchtschild) von Bewohnern gut erkannt werden können. Dies ist z.B. im Szenario der „folgenden Bildschirme“ bei einer Videokonferenz sinnvoll.

Zusammenfassung

Zunächst ist die Integration eines Lokalisationssystems in den räumlichen Service zu leisten. Da zu Beginn kaum reale Daten vorliegen, sollte zum Testen ein Tool entwickelt werden, das Lokalisationssysteme inklusive ihrer Ungenauigkeiten simuliert. Weiterhin ist eine Erweiterung des Modells durch *Spatial Artefacts* erforderlich, um – in Verbindung mit der absoluten Ortskoordinate – eine räumliche Analyse zur Interpretation des Aufenthaltsortes (siehe Abb. 4.5) zu realisieren. Die Artefakte sind nicht explizit im Gebäudemodell zu modellieren, sondern von der Geometrie der Objekte abzuleiten. Die konkrete Form der Artefakte – z.B. ein *Kegel* bei einem Sensor – ist experimentell zu ermitteln.

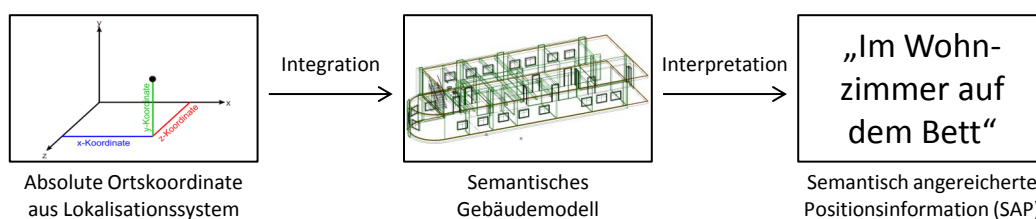


Abb. 4.5.: Ablauf der Aufenthaltsanalyse zur semantischen Anreicherung

Zur zeitnahen Analyse des Aufenthalts der Bewohner sind *kontinuierliche* Ortsinformationen mit ausreichend hoher Frequenz (i.A. >1Hz) erforderlich. Da mit jeder neuen Koordinate auch eine neue Analyse des Aufenthaltsortes stattfinden muss, ist aus Performanzgründen ggf. eine Reduktion der Raumdimensionen des Gebäudemodells von drei auf zwei erforderlich. Hier gilt es herauszufinden, ob Analysen im 3D Modell performant genug sind und – wenn nicht – welche Einbußen bei der Verwendung eines 2D Modells zur Kontextanreicherung (und letztlich Aktivitätserkennung) entstehen.

4.2.4. Analyse räumlicher Relationen durch Serviceanfragen

Neben der zuvor vorgestellten *kontinuierlichen Aufenthaltsanalyse*, bei der fortwährend die absoluten Ortskoordinaten vom Aufenthalt der Bewohner (oder auch von Gegenständen) analysiert werden, wird im Folgenden eine weitere Verwendung des räumlichen Services beschrieben. Bei dieser stellen Softwareagenten, ausgelöst durch eine Interaktion mit den Bewohnern, *Serviceanfragen* über räumliche Relationen. Schilit u. a. (1994) bezeichnen diese Art *aktiver* Interaktion, die zumeist durch die Bewohner ausgelöst wird, als *Contextual Command*. Im Folgenden wird dies anhand einiger Szenarien verdeutlicht.

Szenarien mit räumlichen Serviceanfragen

Bei der *kontinuierlichen Aufenthaltsanalyse* stehen **topologische** Berechnungen (insbesondere „enthalten in“ Relationen) im Vordergrund. Das gleiche gilt u.a. für die Szenarien der *Multimodalen Interaktionen*: bei der *Steuerung per Tangible*, bei der z.B. die Farbstimmung im aktuellen Raum angepasst wird, ist es zunächst interessant zu wissen *in welchem* Raum sich der Cubicle aufhält (dies ergibt sich aus der kontinuierlichen Aufenthaltsanalyse) und schließlich welche Beleuchtungselemente die Farbstimmung beeinflussen können. Letzteres kann durch das Gebäudemodell ermittelt werden, wenn ebenfalls die Beleuchtung in den Räumen modelliert wurde.

Bei der *Gesten-basierten Steuerung* wird versucht, mit Hilfe des Gebäudemodells das Ziel einer Geste zu bestimmen. Hierbei wird zunächst durch einen anderen Softwareagenten der Standort einer Person sowie die Richtung der Geste ermittelt. Auf Basis dieser (in einer räumlichen Serviceanfrage enthaltenen) Details, wird im virtuellen Gebäudemodell in einem entsprechend der realen Geste angeordnetem Kegelvolumen nach Objekten gesucht. Die gefundenen Objekte werden als Antwort zurückgeliefert, sodass das Ziel der Geste aufgelöst werden kann. Der räumliche Service wird bei den *virtuellen Raumnotationen* auf ähnliche Weise verwendet: auf Basis der Position und Blickrichtung der Smartphone-Kamera werden mit Hilfe des Gebäudemodells alle Objekte in unmittelbarer Umgebung zurückgeliefert, sodass der Benutzer eines auswählen und mit einer Notiz versehen kann.

Ein Beispiel für eine **direktionale** Analyse liefert das Szenario *Schließen der Rollläden* (Kap. *Zustandsabbild physischer Objekte*). Die Bewohnerin Sal veranlasst hier das Schließen der Rollläden. Dies darf nur durchgeführt werden, wenn die Fenster geschlossen sind, da ansonsten die Rollläden beim Schließen Schaden nehmen können. Durch das Gebäudemodell ist bekannt, dass die Rollläden sich *über* den Fenstern befinden. Da ebenfalls bekannt ist, ob die Fenster geschlossen oder geöffnet sind, wird in letzterem Fall eine Warnung durch den räumlichen Service ausgegeben.

Im Szenario der *räumlichen Suche* werden zur Beschreibung des Fundortes diverse geometrische Beziehungsangaben herangezogen, die im dreidimensionalen Raum existieren. Neben den bereits genannten topologischen und direktionalen Relationen, kommen nun noch **metrische** in Form von Abstandsmaßen hinzu. So könnte die Wohnung bspw. auf die Nachfrage „*Wo ist meine Brille?*“ mit „*Die Sonnenbrille liegt in der Küche auf dem Küchentresen in 0.5 Meter Entfernung von der Kaffeemaschine.*“ antworten. Neben einer *topologischen* Angabe (*in der Küche*) sowie einer *direktionalen* (*auf dem Küchentresen*), enthält diese Antwort eine Entfernungsangabe („0.5 Meter“). Diese präzise Beschreibungsform entspricht jedoch nicht dem menschlichen Sprachgebrauch – vielmehr verwenden wir qualitative Begriffe, wie z.B. „in der Nähe von“. Diese können, wie bereits in Kap. 3.3.3 beschrieben, durch **fuzzy** Operatoren abgeleitet werden, was verdeutlicht, dass bei räumlichen Analysen nicht

ausschließlich *exakte* Werte, sondern an der menschlichen Raumwahrnehmung angelehnte Rückgabewerte erwünscht sind.

John und Freeman (1975) merken bzgl. der Beschreibung räumlicher Szenen an:

„*The problem of specifying the spatial relations between objects in a scene is a subpart of the much more general problem of picture description.*“
– John und Freeman (1975)

Im Gegensatz zu dem von John und Freeman beschriebenen Problem, kann im Szenario der *räumlichen Suche* auf einem geometrischem 3D Modell an Stelle eines 2D Bildes aufgebaut werden – die Herausforderungen der *Szenenbeschreibung* ähneln sich dennoch sehr. Auf diesen Aspekt wird im Folgenden eingegangen.

Räumliche Operatoren

Anhand der vorigen Szenarien wurde ersichtlich, dass geometrische Analysen zu den Kernaufgaben eines räumlichen Services gehören. Wie bereits durch die Szenarien verdeutlicht wurde, sind folgende grundlegende Operatoren zur Analyse räumlicher Relationen notwendig:

- topologische Operatoren (Lagebeziehungen – *contains, within, touch* etc.)
- direktionale Operatoren (Richtungsbeziehungen – *northOf, southOf, eastOf, westOf*)
- metrische Operatoren (Distanzangaben)

Zur Repräsentation der räumlichen Relationen ist eine geeignete *formale Beschreibung* zu wählen, die anderen Agenten eine einfache Weiterverarbeitung der Informationen ermöglicht. Hier wurden in Kap. 3.3.2 einige Beschreibungsformen, wie z.B. Relationentupel, Ontologien und Prädikate vorgestellt, aus denen eine geeignete Variante gewählt werden muss.

Die in Kap. 3.3.1 vorgestellte räumliche Abfragesprache von Borrmann (2007) für 3D Modelle beherrscht die oben erwähnten Operatoren. Die Anforderungen, die sich aus den genannten Szenarien ergeben, gehen jedoch teilweise über die Möglichkeiten und ursprünglichen Zielstellungen der Abfragesprache hinaus. Vor allem für das Szenario der *räumlichen Suche* ist eine möglichst natürlichsprachliche Beschreibung erforderlich. Mögliche Wege diese Anforderung umzusetzen, wurden im Kapitel über *räumliche Relationen in der menschlichen Wahrnehmung* beschrieben. Eine Realisierung dieser Themen aus der Raumkognition kann aufgrund der Komplexität in dieser Arbeit nicht geleistet werden. Da diese aber von hohem Wert wäre, wird im *Ausblick* darauf eingegangen.

4.2.5. Technische Anforderungen

Aus den grundlegenden funktionalen Anforderungen, wie sie zuvor beschrieben wurden, folgt nun eine Übersicht der expliziten technischen Anforderungen, die sich für einen räumlichen Service ergeben. Im Wesentlichen lassen sich folgende Bereiche der Fülle der Anforderungen entnehmen:

- Kommunikation
- Visualisierung
- Persistenz
- Analyse und Modifikation

Im Folgenden werden diese Bereiche genauer betrachtet und die vielfältigen technischen Anforderungen, die zur Realisierung der genannten *Szenarien* umgesetzt werden müssen, untersucht.

Kommunikation

Sensorreiche Umgebungen mit interagierenden Softwareagenten, wie man sie bei Smart Homes vorfindet, haben hohe Ansprüche an die Kommunikationsinfrastruktur. Bewährt hat sich hier eine *Blackboard* Architektur, da sie die Kommunikation zentralisiert, die Systeme entkoppelt und austauschbar macht und eine einfache Erweiterbarkeit garantiert (vgl. [Hayes-Roth \(1985\)](#)).

In [Otto und Voskuhl \(2010\)](#) wurde diese Architektur als Basis der Kommunikationsinfrastruktur im Living Place Hamburg gewählt. Zur Evaluation des räumlichen Services ist, wie bereits erwähnt, eine Integration in diese Umgebung vorzunehmen.

Indoor Spatial Information Service		
Context Provider		
Spatial Relations		
	Continuous	"The habitant is {in room 1b/within the functional space of the oven/moves towards the dining room/...}"; ...
	On Request	"Object a is above c next to d in room 2"; "Within a radius of 1m at (7.1/2.3/3.1) is d,h,k and f"; ...
Entity States		
	Continuous	"door 3 has been opened"; "window 4 was closed"; "the oven was switched on"; "the sink in the kitchen is in use"; ...
	On Request	"lamp x2 is switched on fading slowly"; "heater 3 is on at 46°C"; "all windows in the dining room are open"; ...

Abb. 4.6.: Übersicht der Aufgabenbereiche und Kommunikationsarten im räumlichen Service

Die *kontinuierliche Aufenthaltsanalyse*, die *Analyse räumlicher Relationen durch Serviceanfragen* sowie die *Konsistenzwahrung* (die jeweils stellvertretend für die *Szenarien* stehen) sind auf geeignete Weise im Rahmen der Blackboardarchitektur umzusetzen.

Abbildung 4.6 verdeutlicht die beiden essentiellen Aufgabenbereiche (*Spatial Relations* und *Entity States*) des räumlichen Services sowie die Art und Weise ihrer Einbindung in die Kommunikationsinfrastruktur:

continuous stetige Analyse von Raumpunkten zur Transformation in *Symbolic Locations*

on request räumliche Serviceanfragen durch einen Agenten

Die kontinuierliche Analyse kann im Sinne von Schilit u. a. (1994) für *Context-triggered Actions* verwendet werden – der Aufgabenbereich *on request* entspricht den *Contextual Commands*.

Des Weiteren sind zur Realisierung der Szenarien die Daten folgender Informationsgeber in den räumlichen Service zu integrieren:

- Positionsinformationen eines Lokalisationssystems
- Zustandsinformationen (Kippschalter, Durchflusssensoren etc.)
- Mobiliarinformationen bei Änderungen im Wohnungsinventar

Zum Testen des räumlichen Services während der Entwicklungsphase außerhalb der Wohnumgebung sind *Sensormockups* zu erstellen. Dadurch soll auf einfache Weise das Verhalten der Bewohner *simuliert* werden (Bewegung in der Wohnung; Öffnen und Schließen von Fenstern und Türen; Bewegen von Mobiliar wie z.B. Stühlen etc.). Ggf. kann hier auf Erkenntnisse aus dem Kapitel *3D Gebäudemodelle als Basis für Simulatoren in Smart Homes* zurückgegriffen werden. Hier wurden quelloffene *Smart Home Simulatoren* vorgestellt, die u.a. skriptgesteuerte alltägliche Abläufe nachbilden.

Visualisierung

Zur Verifikation von Analyseergebnissen während der Entwicklungsphase und als optisches Feedback über den momentanen Zustand und aktuelle Änderungen in der Wohnumgebung, ist das Gebäudemodell samt weiterer Details auf geeignete Weise zu visualisieren. Folgende Aspekte sollten hierbei Teil der Visualisierung sein:

- Gegenstände des 3D Gebäudemodells
- Position der Bewohner
- Spatial Artefacts und Räume

- Zustandsänderungen (Verschieben von Stühlen, Öffnen von Fenstern etc.)

Eine möglichst realitätsnahe Darstellung des Gebäudemodells ist *nicht* erforderlich. Zur Positionsdarstellung der Bewohner ist ein (z.B. durch eine Kugel) symbolisierter Aufenthalt ausreichend. Beim Aufenthalt in den nicht-physischen *Spatial Artefacts* und Räumen sollten diese auf geeignete Weise (z.B. durch Änderung der Transparenz) hervorgehoben werden. Der räumliche Service muss weiterhin in der Lage sein *ohne* jegliche Visualisierungen zu funktionieren (z.B. in einer Serverumgebung).

Persistenz

Das Gebäudemodell im räumlichen Service ist ständigen Veränderungen unterworfen. Zum einen finden sich die Ursachen von Änderungen am Modell in den Szenarien der *Konsistenzwahrung* (z.B. neues Mobiliar, Zustandsänderungen von Fenstern und Türen) wieder, zum anderen können manuell durchgeführte Erweiterungen des Modells durch das Modellierungstool vorgenommen werden.

Des Weiteren kann es diverse Interessenten am Gebäudemodell geben, die das (aktuellste) Modell zur Weiterverarbeitung nutzen möchten. Beispielsweise wird das Gebäudemodell (in unterschiedlichsten Formaten) für die Akustik- und Lichtsimulation (Letzteres z.B. mit Relux oder DIALux) oder zur Planung bei der Anschaffung von neuem Mobiliar verwendet.

Aufgrund dieser Nutzungsformen ist eine *zentrale Verwaltung* des Modells auf einem Produktmodellserver angeraten. Dadurch können Änderungen persistiert werden und weitere Interessenten (z.B. zur modellbasierten Simulation) erhalten stets ein aktuelles Modell. Der Server sollte eine Versionierung, verschiedene Exportformate und einen authentifizierten Zugriff über ein Webinterface anbieten.

Analyse und Modifikation

Es ist ein Modul zu realisieren, das *Änderungen* an und *Abfragen* auf ein Gebäudemodell ermöglicht. Zu ersterem zählt bspw. das Hinzufügen neuer Objekte (vgl. *Änderungen im Wohnungsinventar*) und das Ändern von Objekteigenschaften, wie der Attributierung (vgl. *Zustandskonsistenz*) oder Position (vgl. *Ortskonsistenz*).

Für Serviceanfragen an das Gebäudemodell bzgl. des Zustands von Objekten sind z.B. die genannten Objektattributierungen auszulesen. Bei Anfragen geometrischer Natur (vgl. *kontinuierliche Aufenthaltsanalyse* oder die *Analyse räumlicher Relationen durch Serviceanfragen*) sind räumliche Operatoren (topologisch, direktional, metrisch, fuzzy) in geeigneter Weise z.B. zur Auflösung räumlicher Relationen einzusetzen. Die Rückgabemenge der Relatio-

nen sollte durch eine *optionale Filterung prominenter Objekte* eingeschränkt werden können. Außerdem sollte die Wahl des *Referenzrahmens* möglich sein.

4.3. Fazit

In diesem Kapitel wurde zunächst die Fülle an unterschiedlichen Szenarien aufgezeigt, zu dessen Realisierung ein räumlicher Service beitragen kann. Anschließend wurden auf Basis der Szenarien in einer Analyse die grundlegenden Anforderungen extrahiert und letztlich die wesentlichen technischen Aspekte betrachtet.

Die Szenarien (Kap. 4.1) spiegeln die „Anwendungssicht“ des räumlichen Services wieder. Abbildung 4.1 zeigt hierbei eine strukturierte Übersicht dieser Bereiche, die selbst wiederum unterteilt werden in: *Unterstützung der Benutzerinteraktionen* (Searching, Multimodale Interactions etc.), *Zustandsabbild physischer Objekte* (z.B. als Sicherheitsmechanismus beim Verlassen der Wohnung) und *Unterstützung der Activity Pattern Recognition*.

In dem Kap. 4.2 wurden die Szenarien auf Gemeinsamkeiten in ihren Anforderungen hin untersucht, die zum Design und der Realisierung des räumlichen Services erforderlich sind. Basis aller Szenarien ist zunächst ein geometrisches Raummodell in möglichst hohem Detaillierungsgrad. In Kap. 4.2.3 wurde daraufhin dargelegt, dass das Raummodell eine Fähigkeit zur Synchronisation mit der realen Welt bzw. zur *Konsistenzwahrung* besitzen muss (z.B. beim Ändern der Position des Mobiliars).

In den darauffolgenden Kapiteln wurden die räumlichen Analysefähigkeiten des Services untersucht, die für eine *kontinuierliche Aufenthaltsanalyse* der Bewohner und in Form *räumlicher Serviceanfragen* erforderlich sind.

Letztlich wurden die technischen Anforderungen spezifiziert, die sich in den Komponenten *Kommunikation*, *Visualisierung*, *Persistenz* sowie *Analyse und Modifikation* widerspiegeln. Mit ihnen werden zugleich die meisten der von *Raper und Maguire (1992)* an GIS Systeme formulierten Anforderungen erfüllt: Datenerfassung, -strukturierung, -manipulation, -analyse und -visualisierung. Diese werden im Folgenden in das Design der Anwendungsarchitektur einfließen.

5. Design und Evaluation

In diesem Kapitel werden die bei der Analyse diskutierten Anforderungen und Komponenten des zukünftigen Systems als Einheiten des geplanten räumlichen Services vorgestellt. Dieser Service wird in diesem Kapitel in seiner konkreten Realisierung als „Indoor Spatial Information Service“ (ISIS) bezeichnet werden, wobei die Begriffe „räumlicher Service“ und „ISIS“ stets als synonym angesehen werden können.

Die Betrachtung des Gesamtsystems inklusive der umgebenden Infrastruktur erfolgt hierbei „Top-Down“, angefangen von der höchsten Abstraktionsebene (Einbindung des Services in die Infrastruktur) bis hin zu relevanten Details der Implementierung (Designentscheidungen, Tools, Bibliotheken etc.).

Zunächst wird die semantische Gebäudemodellierung beschrieben. Im Fokus liegen hier insbesondere die Erweiterungen des standardisierten IFC Modells um Entitäten der intelligenten Umgebung.

Daraufhin wird das Umfeld und die technische Infrastruktur betrachtet, in die der räumliche Service zu integrieren ist. Zur Veranschaulichung wird die Einbettung des räumlichen Services in die Kommunikationsinfrastruktur detailliert dargestellt.

Anschließend wird die Wahl der Systemarchitektur ausführlich diskutiert und schließlich eine Schichten-Architektur für den räumlichen Service entworfen. Der „Top-Down“-Beschreibung folgend, werden weiterhin die einzelnen Schichten dargestellt, die eingesetzten Techniken und Tools vorgestellt und schließlich eine Bewertung der Architektur vorgenommen.

Abschließend findet eine Evaluierung des Gesamtsystems anhand detaillierter Kommunikationsabläufe, einem Leistungsnachweis im Live-Betrieb und dem Einsatz des räumlichen Services als Testumgebung in anderen Projekten statt.

5.1. Gebäudemodellierung mit Smart Home-Anpassungen

Eine unabdingbare Voraussetzung der räumlichen Kontextinterpretation ist die geometrische Repräsentation der Wohnumgebung. Die Analyse hat aufgezeigt, dass hierzu ein hochdetailliertes, semantisches Gebäudemodell erforderlich ist, das einem offenen Standard folgt und

Key	Value	Beschreibung
ObjectId	<string>	Projektweite ID
ObjectType	<string>	Projektweiter Typ (siehe Projekt-Ontologie)
TagLocations	<json-string>	Position von Ortungstags am Mobiliar
IsUbisenseTag	<bool>	Entität repräsentiert Ortungstag
TagId	<string>	ID des Ortungstags
SpatialArtefact	<json-string>	Typ und Maße der SpatialArtefacts einer Entität
HideElement	<bool>	Steuerung der Sichtbarkeit in der 3D Visualisierung

Tab. 5.1.: Attribute des IFC-Gebäudemodells

beliebig erweiterbar ist. Hierzu wurden in den vergleichbaren Arbeiten der CityGML- und IFC-Standard betrachtet, wobei IFC aufgrund des detaillierteren Innenraummodells und der vorhandenen, professionellen Modellierungstools und Softwarebibliotheken als geeigneter Kandidat gewählt wurde – dies steht einer späteren Erweiterung des Services für andere semantische Modelle dennoch nicht im Wege.

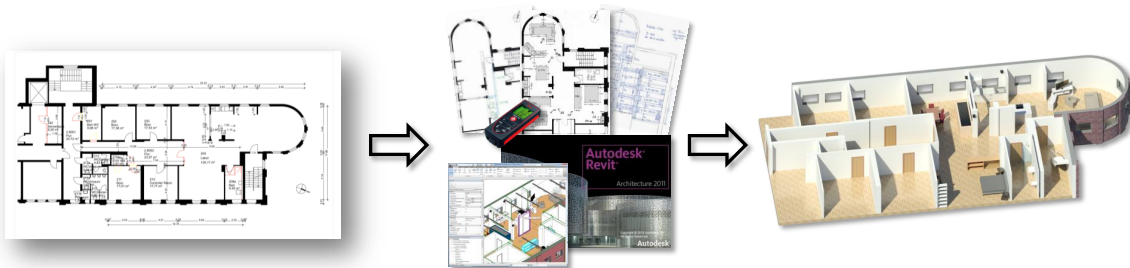


Abb. 5.1.: Modellierung des Living Place Hamburg

Da der räumliche Service zur Evaluation in den *Living Place Hamburg* integriert werden soll, wird zunächst ein Gebäudemodell dieser Wohnung erstellt (s. Abb. 5.1). Die Ausgangslage ist hier typisch zu denen vieler öffentlicher Gebäude – es existiert lediglich ein 2D CAD Grundriss des Stockwerks. Durch z.T. lasergestützte Messungen müssen hier zunächst weitere Informationen beschafft werden, bevor die 3D Modellierung beginnen kann. Hierzu zählen z.B. Höhenmessungen und Maße der Strukturdetails an Decken und Wänden, die nicht im 2D Plan abgebildet sind. Außerdem sind weitere Details in das Modell zu integrieren, wie z.B. Beleuchtung oder Mobiliar. Hierzu können ggf. vorhandene Modelle aus 3D Bibliotheken der Hersteller oder im Internet verwendet werden.

Wie bereits erwähnt, sind zusätzliche Erweiterungen erforderlich. Diese können innerhalb von IFC durch ein Attributierungsmodell aus *Key-Value*-Paaren hinzugefügt werden, mit denen individuelle Entitäten oder Klassen annotiert werden können. In Tabelle 5.1 sind die An-

notationen zu sehen, die zur Realisierung des räumlichen Services erforderlich sind. Hierzu gehören z.B. die in der Projekt-Ontologie festgelegten IDs und Typen von Entitäten der Wohnung, über die sich alle Agenten im Smart Home-System verständigen. Da in IFC keine feingranulare Unterteilung von Mobiliar vorliegt, wurde diese pragmatische Lösung gewählt.

Das Attribut `TagLocations` gibt an, wo Ortungstags an einem Gegenstand befestigt sind. Dadurch kann der virtuelle Gegenstand entsprechend der Realität im Modell verschoben werden (vgl. die Forderung zur *Ortskonsistenz* in der Analyse). `IsUbisenseTag` gibt an, ob ein Gegenstand im digitalen Modell einen Ortungstag repräsentiert, damit dieser in der Visualisierung ggf. zur Darstellung einer Person herangezogen wird.

5.2. Einbindung in die Systemumgebung

ISIS richtet sich in seinen Anforderungen und Fähigkeiten an der technischen Infrastruktur des *Living Place Hamburgs*¹ aus. Der Living Place ist ein vollmöbliertes Apartment im Loft-Stil (vgl. Abb. 1.1) mit angrenzendem Kontroll- und Serverraum. Es ist ausgestattet mit einer Fülle an *Sensoren*, u.a.: Lokalisationssystem, PTZ²- sowie 180°-Kameras mit Mikrofonen, Kippschalter, Temperatur-, Luftfeuchtigkeits- und kapazitiver Sensoren. Zu den steuerbaren *Aktoren* zählen derzeit die Lichtinstallation, die Klimaregelung durch Heizung und Fenster (siehe [Johannsen und Pautz \(2011\)](#)) sowie die Jalousien und Vorhänge. Als digitale *Interaktionsmedien* stehen Bildschirme, der bereits erwähnte Cubicle und ein Multitouch-Tresen zur Verfügung.

Um die Einbettung des ISIS in diese Infrastruktur zu verdeutlichen und eine erste Übersicht über das Gesamtsystem zu verschaffen, wird im Folgenden zunächst auf die Kommunikation mit den relevanten verteilten Softwarekomponenten eingegangen.

5.2.1. Kommunikation über das Blackboard

Die Kommunikation der Sensoren, Aktoren und Reasoning-Einheiten findet über ein zentrales *Blackboard* statt. Ein Blackboard bietet einige Vorteile in inhomogenen, sensorreichen Umgebungen: die Kommunikation ist zentralisiert, die Systeme sind entkoppelt und austauschbar, was eine einfache Erweiterbarkeit garantiert (vgl. [Hayes-Roth \(1985\)](#)).

Basis der Blackboard-Architektur ist das *Publisher-Subscriber-Modell*, wie es von [Erman u. a. \(1980\)](#) im HEARSAY II Projekt erstmals eingesetzt wurde. Hierbei handelt es sich

¹Webseite: <http://www.livingplace.org>

²PTZ: „Pen Ten Zoom“

um einen „m zu n“-Kommunikationskanal zwischen *Publishern* (z.B. Sensoren, die Informationen anbieten) und *Subscribern* (Agenten, die diese Informationen weiterverarbeiten). Einige Realisierungen der Blackboard-Metapher verfügen zudem über ein *Producer-Consumer-Modell*. Hierbei handelt es sich um eine „n zu 1“-Beziehung zwischen *Producern* und *einem* Konsumenten dieser Informationen. Um z.B. eine Lastenverteilung zu gewährleisten, ist es auch möglich, mehrere Konsumenten einzusetzen. Sobald einer der Konsumenten eine Nachricht erhalten hat, ist diese konsumiert, sodass kein weiterer diese Nachricht mehr abrufen kann.

Die im Living Place eingesetzte Blackboard-Realisierung *ActiveMQ*³ bietet eine Umsetzung beider Modelle an. Das *Publisher-Subscriber-Modell* wird hierbei über sogenannte *Topics* realisiert – *Producer & Consumer* kommunizieren über *Queues*. Abbildung 5.2 veranschaulicht den Unterschied beider Kommunikationsweisen im Living Place.

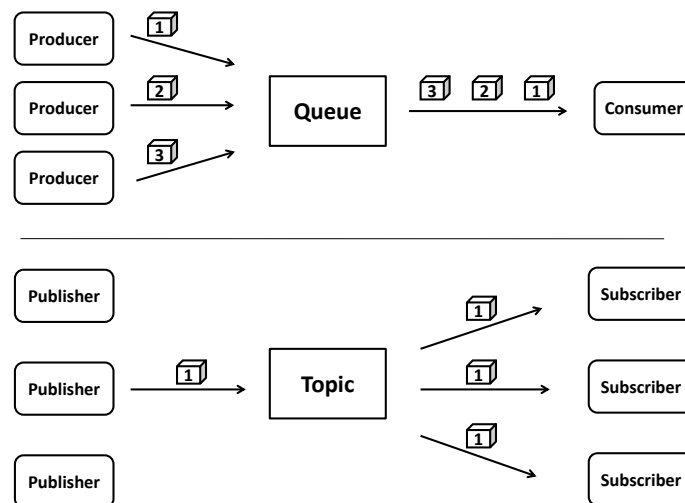


Abb. 5.2.: Veranschaulichung von Queues und Topics der Blackboard-Architektur
Quelle: Voskuhl (2012)

Der räumliche Service – eine Reasoninginstanz bzw. ein *Spatial Context Provider* – ist als Dienst zur Kontextanreicherung an diese Kommunikationsformen gebunden. Das Architekturdiesign sollte dennoch Alternativen wie SOA o.ä. berücksichtigen.

Eine Übersicht über die Einbindung des ISIS in die Blackboardumgebung gibt das Kommunikationsdiagramm in Abb. 5.3. Der räumliche Service (hier *Spatial Service*) ist mit zwei *direkten* Kommunikationspartnern verbunden. Zum einen mit einem *Produktmodellserver*, zum anderen mit dem *Blackboard*. Auf Ersterem wird das Gebäudemodell, das die Basis zur räumlichen Analyse darstellt, verwaltet. Über das Blackboard wird die gesamte Kommu-

³Webseite: <http://activemq.apache.org>

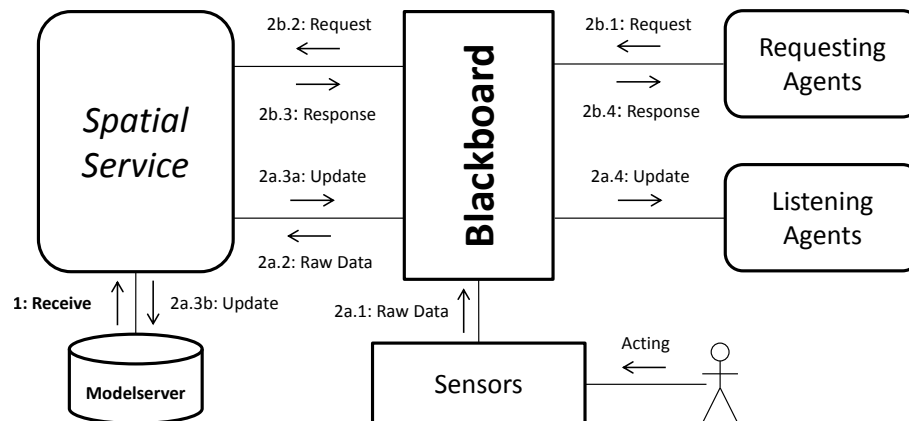


Abb. 5.3.: Kommunikationsdiagramm des ISIS

nikation mit den *Sensoren* auf der einen Seite und den *Softwareagenten* auf der anderen realisiert.

Listening Agents Sensoren stellen ihre Werte über *Topics* interessierten Agenten zur Verfügung (2a.1). ISIS lauscht hier u.a. auf Nachrichten des Lokalisationssystems *Ubisense* (2a.2), analysiert diese und stellt Änderungen (z.B. „die Bewohnerin Y ist jetzt in Raum 3“) anderen Anwendungen über ein eigenes Topic zur Verfügung (2a.3). Beliebige Agenten können anschließend auf Nachrichten, die über dieses Topic versandt werden, lauschen und weitere Verarbeitungsschritte vornehmen (2a.4). Hier fungiert der räumliche Service als *Sensor Abstraction Layer* (vgl. Brumitt u. a. (2000)). Unabhängig von den eingesetzten Lokationssystemen – seien es kapazitive-, Ultrabreitbandsensoren oder Kippschalter an Türen und Fenstern bzw. eine Kombination zur Verbesserung der Genauigkeit durch Sensorfusion – erhalten Agenten vom räumlichen Service eine vereinheitlichte, abstrakte Aufenthaltsbeschreibung.

Diese Agenten werden in Abb. 5.3 als *Listening Agents* bezeichnet (sie werden in der Blackboard-Terminologie auch *Subscriber* oder *Consumer* genannt). Die Kommunikation mit diesem Agententypus erfolgt *asynchron* – ISIS versendet stets neue Informationen, ohne auf eine Antwort zu warten. Bezogen auf die Szenarien gehören z.B. *Tangibles* (ortsbezogene Funktionalität von Interaktionselementen) oder Agenten der *Location Based Media* (Bild und Ton einer Videokonferenz *folgen* den Bewohnern) zu den *Listening Agents*.

Requesting Agents Der zweite Agententypus verfolgt eine synchrone Kommunikationsstrategie und wird in Abb. 5.3 als *Requesting Agents* bezeichnet. Anfragen an den ISIS werden zunächst an eine persistente *Queue* gesendet (2b.1) und über das Blackboard an den ISIS weitergereicht (2b.2). Die Antwort wird berechnet und über ein Topic zurückgesendet

(2b. 3–4).

Um Medienbrüche zu verhindern, wurde im Fall der *Requesting Agents* diese *Request-Response*-Metapher auf das Blackboard übertragen – dennoch sind Schnittstellen wie SOAP, REST o.ä. für diese Kommunikationsform geeigneter und ihre Integration sollte beim Design des räumlichen Services bedacht werden.

Requesting Agents machen u.a. Gebrauch von der räumlichen Kontextanreicherung durch ISIS. Hierzu zählen z.B. Interaktionsformen wie *Gesture- und Speech Recognition* (Was meint der Bewohner, wenn er auf etwas zeigt oder vom lokaldeiktischen Begriff *hier* spricht?) oder auch die *räumliche Suche*, bei der zu einem gegebenen Raumpunkt die räumlichen Relationen aufgelöst werden sollen.

Schichten-basierte Kommunikation zur Aktivitätserkennung

Im Folgenden wird eine weitere Form der *asynchronen* Kommunikation über ein Blackboard vorgestellt. Hierbei handelt es sich um eine mehrschichtige Architektur, in der durch Sensorfusion und modellabhängiger Kontextanreicherung umfassenderes Wissen über die Aktivitäten des Bewohners zusammengetragen wird. In der wissenschaftlichen Literatur finden sich *Context-aware* Architekturen, die, im Gegensatz zu dieser Herangehensweise, *synchrone* Kommunikationsmuster verwenden. Hierzu gehören z.B. RMI/RPC-basierte Architekturen wie SOCAM von Gu u. a. (2005) oder AWARE von Bardram und Hansen (2004).

In Ellenberg u. a. (2011b) „An Environment for Context-Aware Applications in Smart Homes“ wurde im Vorfeld dieser Arbeit eine blackboardbasierte Architektur entwickelt, mit der Zielstellung, alltägliche Abläufe bzw. *Activities of Daily Living* (wie z.B. Schlafen, Kochen und Fernsehen) anhand vorliegender Sensordaten zu erkennen (vgl. das Szenario *Activity Pattern Recognition*). Hierzu wurde eine mehrschichtige Architektur zur Kontexterkennung entwickelt (s. Abb. 5.4) – bezogen auf die Kommunikation stellt dies keinen Sonderfall für den räumlichen Service dar. Neu ist jedoch der Aspekt der semantischen Anreicherung kontextueller Informationen über mehrere Interpretationslevel hinweg, der im Folgenden beschrieben wird:

Auf dem niedrigsten Interpretationslevel (*Low Level Interpretation*; ausführlich diskutiert in Voskuhl (2012)), werden durch *Sensorfusion modellunabhängig* Rückschlüsse aus rohen Sensordaten (z.B. Positionsdaten), logischen Daten (Wochentag etc.) und abgeleiteten Daten (Wetterinformationen durch Webservice) gezogen. Hierbei werden über ein Topic des Blackboards an den nächsten Level (*Intermediate Interpretation Layer*) u.a. Trajektorien (Bewegungspfade) weitergereicht. Diese wurden zuvor u.a. von Ausreißern bereinigt. Auf dem nächsten Level werden sie vom räumlichen Service analysiert und semantisch angereichert (z.B. „die Bewegung des Bewohners fand vom Bett zum Kühlschrank statt“). Diese semantisch angereicherten Positionsinformationen (SAP, vgl. Kap. 4.2.3) werden anschließend dem

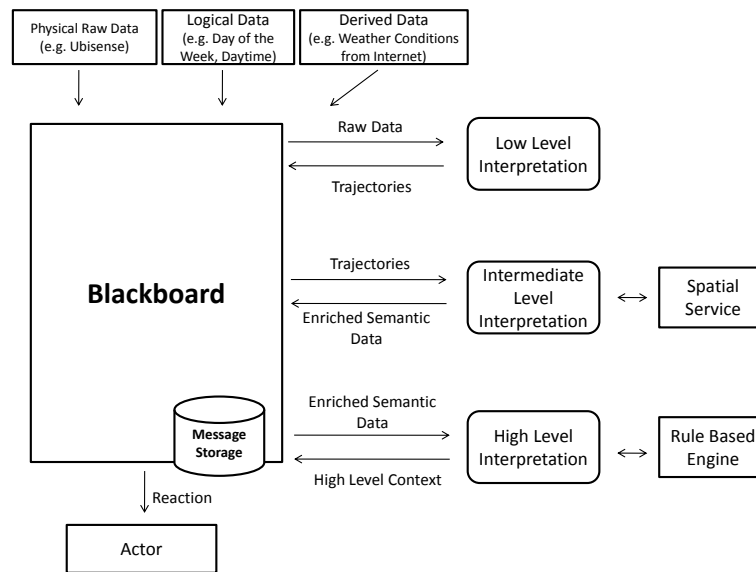


Abb. 5.4.: Architekturskizze der *Activity Pattern Recognition* (Quelle: [Ellenberg u. a. \(2011b\)](#))

höchsten Level übergeben (Details siehe [Ellenberg \(2012\)](#)). Hier werden die Informationen der unteren Level ontologie- und regelbasiert analysiert, um einzelne oder zusammengesetzte Aktivitäten zu erkennen. Wurde eine Aktivität erkannt (z.B. Kochen), wird dies wiederum über ein Topic des Blackboards weiteren Agenten zur Verfügung gestellt, sodass eine entsprechende Reaktion der Wohnung (z.B. „alle Fenster in der Küche öffnen“) erfolgen kann – [Chen und Kotz](#) sprechen hier von *Active Context Awareness*.

5.3. Wahl des Architekturmusters für den räumlichen Service

Nachdem im vorigen Kapitel die Systemumgebung und die Einbindung des räumlichen Services in die Kommunikationsinfrastruktur erörtert wurde, liegt im Folgenden die architektonische Betrachtung des Services selbst im Fokus. Es wird zunächst die Wahl des Architekturmusters erörtert und schließlich die Zerlegung des Gesamtsystems in einzelne Bausteine aufgezeigt. Daraufhin wird auf einzelne Aspekte bzw. Komponenten, die bereits in der *technischen Anforderungsanalyse* hervorgehoben wurden (Visualisierung, Kommunikation, Analyse, Modifikation und Persistenz) eingegangen.

Bevor ein konkretes Architekturmuster zur Lösung eines gegebenen Problems gewählt wird, sollten zunächst grundsätzliche Anforderungen an die Architektur formuliert werden. [Vogel](#)

u. a. (2008) formulieren hierzu folgende Aspekte als Architekturprinzipien – hier eine Auswahl: Modularität, Information Hiding, hohe Kohäsion, niedrige Kopplung und Separation of Concerns. Diese *Richtlinien* setzen vor allem die nicht-funktionalen Anforderungen an eine Architektur, wie Verständlichkeit, Erweiterbarkeit und Änderbarkeit um. Die funktionalen Anforderungen, wie sie in der *Analyse* ermittelt wurden, werden durch die Bausteine eines Softwaresystems und deren Interaktion untereinander realisiert. Bei der Wahl des Architekturmodells sind daher funktionale und nicht-funktionale Anforderungen zu berücksichtigen.

Einhergehend mit den genannten Architekturrichtlinien, orientiert sich die Wahl eines konkreten Architekturmodells auch zwischen zwei grundlegenden Problemstellungen (Vogel u. a. (2008)): Reduktion der *Komplexität* und Erhöhung der *Flexibilität*.

Komplexität und Flexibilität verhalten sich anti-proportional zueinander und werden von unterschiedlichen Architekturmodellen in verschiedenem Maße unterstützt. Hierzu haben sich diverse Basisarchitekturen bewährt, die die Systeme nach den genannten Anforderungen ganzheitlich strukturieren.

Im Folgenden werden einige Architekturmodelle kurz vorgestellt und anschließend aufgrund ihrer Vor- und Nachteile eine Wahl für den räumlichen Service getroffen und schließlich beschrieben.

Datenfluss-orientierte Architekturen sind entlang der Datenflüsse strukturiert, um eine komplexe Aufgabe in eine Reihe einfacherer Aufgaben zu unterteilen (vgl. Melzer (2010) S. 219). Ein Vertreter dieser Architekturen ist z.B. der *Pipes & Filter*-Stil. Hier werden die Teilaufgaben von Filtern übernommen und das Resultat über *Pipes* an weitere, beliebig kombinierbare Filter übergeben. Dies geschieht inkrementell, d.h., dass Filter parallel an Aufgaben arbeiten können.

Bewertung: *Die analytischen Aufgaben des räumlichen Services sind zwar durchaus komplex, können jedoch nicht im Sinne mehrerer unabhängiger Teilaufgaben nacheinander abgearbeitet werden, was eine datenflussorientierte Architektur prinzipiell ausschließt.*

Das **Model-View-Controller** (MVC) Muster ist ein weiteres, sehr verbreitetes Architekturmodell und besonders für interaktive Anwendungen mit Benutzerschnittstelle geeignet. Ziel dieser Architektur ist es, den funktionalen Kern sowie die Daten (*Model*) von der Benutzerschnittstelle (*View*) unabhängig zu halten (Buschmann u. a. (1998)). Da Benutzerschnittstellen oftmals häufigen Änderungen unterworfen sind, bewirkt diese Trennung, dass Änderungen nur am *View* vorgenommen werden müssen. Eine Steuerungskomponente (*Controller*) empfängt Benutzereingaben und reicht diese in Form einer Dienstleistungsanforderung an das *Model* oder den *View* weiter.

Bewertung: *Buschmann u. a. (1998) betonen, dass die strikte Einhaltung des MVC-Musters für einfache Oberflächen die Komplexität ohne Zugewinn an Flexibilität erhöht. Dies ist für den räumlichen Service umso nachteiliger, als dass nur sehr selten Änderungen an der Benutzeroberfläche zu erwarten sind und diese auch keine derart wichtige Funktion im Rahmen*

des Services einnehmen. Außerdem ist eine weitere Forderung, dass der Service auch ohne graphische Benutzeroberfläche betrieben werden kann. Insofern ist das MVC-Pattern eine mögliche, aber nicht die sinnvollste Variante der Umsetzung.

In **Service-orientierten Architekturen** (SOA) steht das Anbieten, Suchen und Nutzen von Diensten über ein Netzwerk im Fokus (vgl. Melzer (2010)). Bei einer SOA wird stets die lose Kopplung hervorgehoben, die zwischen einzelnen Diensten besteht (vgl. Vogel u. a. (2008), Starke (2008), Melzer (2010)), da diese bei Bedarf dynamisch gesucht, gefunden und eingebunden werden können.

Starke (2008) formuliert zudem folgende Eigenschaften einer SOA (Auswahl):

- standardisierte, technologieneutrale Kommunikation (synchron oder asynchron)
- Nutzung der Dienste kann anonym erfolgen
- Dienste sind selbstbeschreibend (z.B. durch Metadaten)
- *Lookup Service* hilft beim Auffinden von geeigneten Diensten
- Dienste sind möglichst idempotent⁴, zustandsfrei und transaktional abgeschlossen

Bewertung: Der räumliche Service erfüllt die meisten der genannten SOA-Anforderungen, was zum einen der Einbettung in die Blackboardinfrastruktur geschuldet ist, sich zum anderen aber auch aus seiner dienstorientierten Eigenschaft ableitet. Ein zentraler Aspekt der SOA bleibt im ISIS allerdings unberücksichtigt: es ist keine abrufbare Schnittstellenbeschreibung vorgesehen (wie z.B. WSDL), die die angebotenen Dienste definiert und daher auch kein *Lookup Service* vorhanden, der anderen Agenten mitteilt, welcher Dienst ihre Anfrage beantworten kann. Außerdem ist in SOA keine graphische Oberfläche vorgesehen, die jedoch Bestandteil des räumlichen Services ist. Die SOA ist daher ein grundlegend probates Muster für ISIS. Aufgrund der Kommunikationsinfrastruktur in die der ISIS einzubinden ist, wird jedoch zunächst von einer konkreten Umsetzung abgesehen.

Die **Schichten-Architektur** strukturiert eine Anwendung, indem sie unterschiedliche Aufgaben in Abstraktionsebenen kapselt. Schichten sind horizontal angeordnet, wobei jede Schicht nur eine (direkt) unter ihr liegende Schicht verwenden sollte. Jede Schicht für sich verbirgt in der Art einer Black-Box die konkrete Implementierung, was die Kopplung zwischen den Schichten minimiert. Komponenten innerhalb einer Schicht sollten einen ähnlichen Abstraktionsgrad aufweisen (vgl. Starke (2008)).

Bewertung: Die in der technischen Anforderung genannten Bereiche Visualisierung, Kommunikation, Analyse und Persistenz lassen sich gut auf die Schichten abbilden. Der Vorteil der Schichtenbildung ist zudem, dass Teilsysteme des räumlichen Services, z.B. die Analyse und Persistenz, durch die Kapselung einfach in anderen Projekten wiederverwendbar

⁴Anfragen mit gleichem Inhalt führen stets zu gleichen Ergebnissen

sind. Als Nachteile nennt [Starke \(2008\)](#), dass die Schichtenbildung mit Performanceeinbußen einhergehen kann und Änderungen am System schlecht unterstützt werden.

5.4. Architektur des räumlichen Services

Nach der Betrachtung unterschiedlicher Architekturmuster wurde für den ISIS eine klassische Schichten-Architektur mit SOA Aspekten (u.a. technologie neutrale Kommunikation, anonyme Nutzung, Zustandsfreiheit etc.) gewählt und kann als eine „Service-orientierte Schichten-Architektur“ angesehen werden.

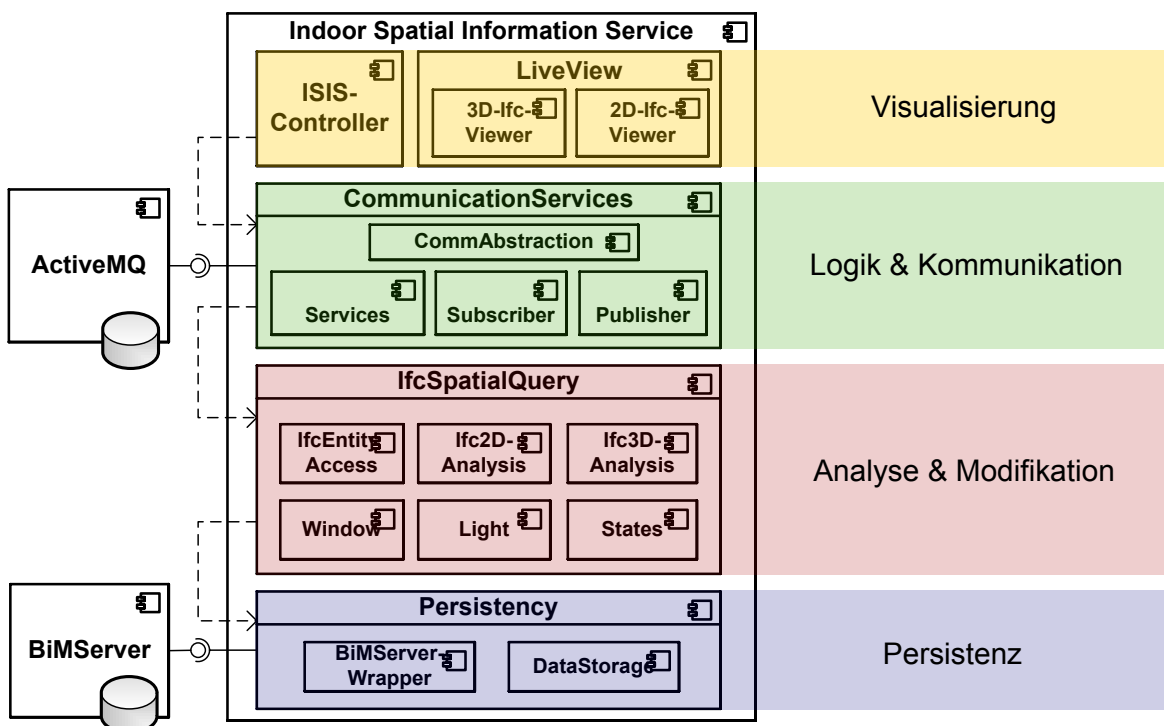


Abb. 5.5.: Architekturschaubild des ISIS

Abb. 5.5 zeigt die Schichtenarchitektur, die sich an den in der [Analyse](#) formulierten technischen Anforderungen orientiert. Die Schichtenbildung schafft eine verständliche Aufteilung des Systems. Außerdem entkoppelt sie die Komponenten der einzelnen Schichten in der Art, dass sie auch losgelöst vom Gesamtsystem verwendet werden können.

Die oberste Schicht (Visualisierung) kann auch entfallen, sodass der räumliche Service als reine Konsolanwendung auf einem Serversystem ohne graphische Oberfläche lauffähig ist.

5.4.1. Betrachtung der Schichten

Im Folgenden wird auf die grundlegenden Aufgaben der Schichten *Logik*, *Visualisierung*, *Kommunikation*, *Analyse & Modifikation* sowie *Persistenz* eingegangen. Ziel ist es, einen Überblick zu verschaffen, indem wichtige Bibliotheken, Abläufe und Abhängigkeiten beschrieben werden.

Logik Die *Initialisierung* des Systems findet in einer Komponente der obersten Schicht statt. Hier werden durch einen *Controller* zunächst die grundlegenden Einstellungen (Logging Level, Unterbinden der Visualisierung, Blackboard Verbindungsdaten etc.) aus den Konsolenparametern und Konfigurationsdateien ausgelesen.

Daraufhin werden sequentiell folgende Schritte durchgeführt:

1. Laden des Gebäudemodells vom Produktmodellserver durch die Persistenzschicht
2. Übergabe an die *Analyseschicht*
3. Starten der 2D und 3D Viewer (beides optional)
4. Aufbau der Kommunikation (Subscriber und Server-Threads über *Repository*)

Zum Ende der *Initialisierungsphase* wird schließlich ein Prozess gestartet, der Änderungen am Gebäudemodell in regelmäßigen Abständen persistiert.

Während der *Laufzeit* findet in dieser Komponente die „Lifecycle-Verwaltung“ statt. Hier werden Anweisungen einer zentralen Instanz im Living Place umgesetzt. Hierzu gehört z.B. das Verhindern von jeglichem Nachrichtenversand oder auch der Neustart der Anwendung.

Zur *Finalisierung* werden beim Beenden des räumlichen Services die Kommunikationsverbindungen zum Blackboard und Produktmodellserver geschlossen und Änderungen des Gebäudemodells persistiert.

Visualisierung Die Visualisierung in zwei und drei Dimensionen dient während der Entwicklungsphase zur Verifikation von Analyseergebnissen und im *Live-Einsatz* als optisches Feedback über den momentanen Zustand und die aktuellen Änderungen in der Wohnung.

Zur *3D Visualisierung* (s. Abb. 5.6) wurde auf Bibliotheken der `Open IFC Tools` zurückgegriffen, welche um dynamische Aspekte, wie z.B. der Darstellung von Positionsänderungen von Mobiliar (Details siehe Kap. [Detaillierte Kommunikationsabläufe](#)) oder auch das Öffnen von Fenstern erweitert wurden.

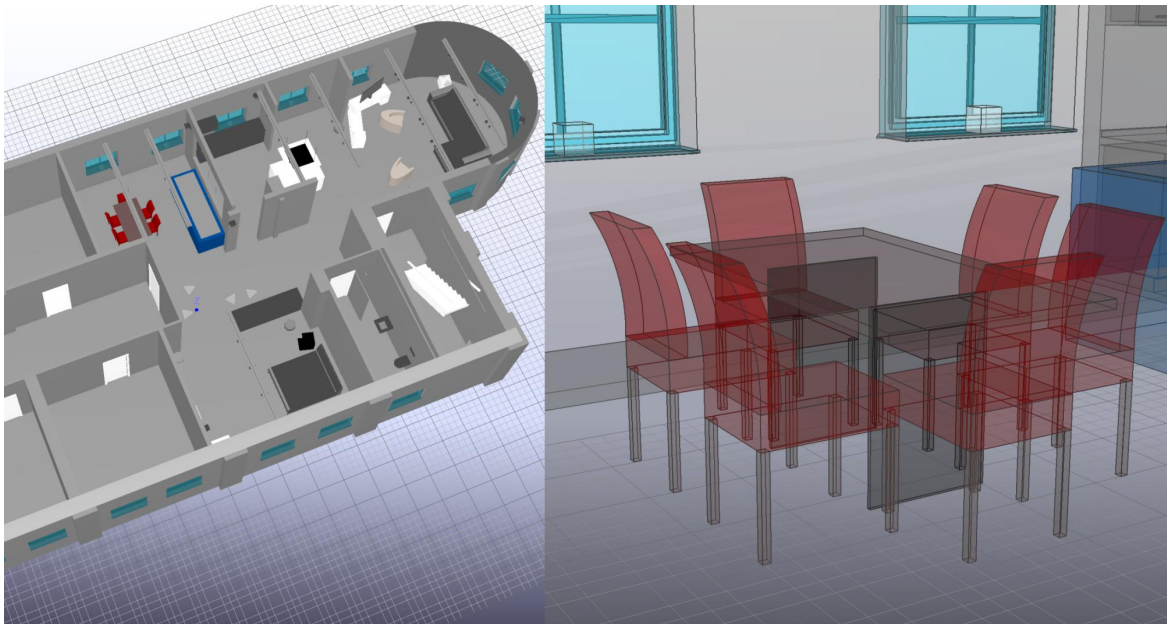


Abb. 5.6.: Visualisierung in 3D (mittels der Open IFC Tools)
links: komplettes Modell
rechts: Detailausschnitt

Die *2D Visualisierung* (siehe Abb. 5.7) wird mit Hilfe der JTS Topology Suite⁵ aus dem vorhandenen 3D Modell abgeleitet (Details s. *Analyseschnitt*). Hier wird vor allem der aktuelle Aufenthalt der Bewohner in Räumen und *Spatial Artefacts* visualisiert (vgl. *kontinuierliche Aufenthaltsanalyse*). Eine XML-basierte Konfiguration ermöglicht eine beliebige Anzahl verschiedener 2D-Viewer, die sich z.B. in der Darstellung unterschiedlicher Objektfamilien unterscheiden, was die Übersichtlichkeit deutlich erhöht.

Kommunikation Die Einbettung des räumlichen Services in die Kommunikationsinfrastruktur wurde in Kapitel 5.2 beschrieben. Im Folgenden werden die *Interna* der Kommunikationsschicht genauer betrachtet.

Die Kommunikationsschicht ist in eine *Abstraktionsschicht* und eine Schicht mit konkreten *Serviceimplementierungen* aufgeteilt, die die Schnittstellen der Abstraktionsschicht nutzen. In der Abstraktionsschicht (vgl. *CommAbstraction* in Abb. 5.8) erfolgt die grundlegende Kommunikationsverwaltung. Hierzu zählt zum einen der Auf- und Abbau der Verbindungen sowie der periodische Wiederaufbauversuch bei Verbindungsabbrüchen. Zum anderen fin-

⁵Webseite: <http://www.vividsolutions.com/jts>

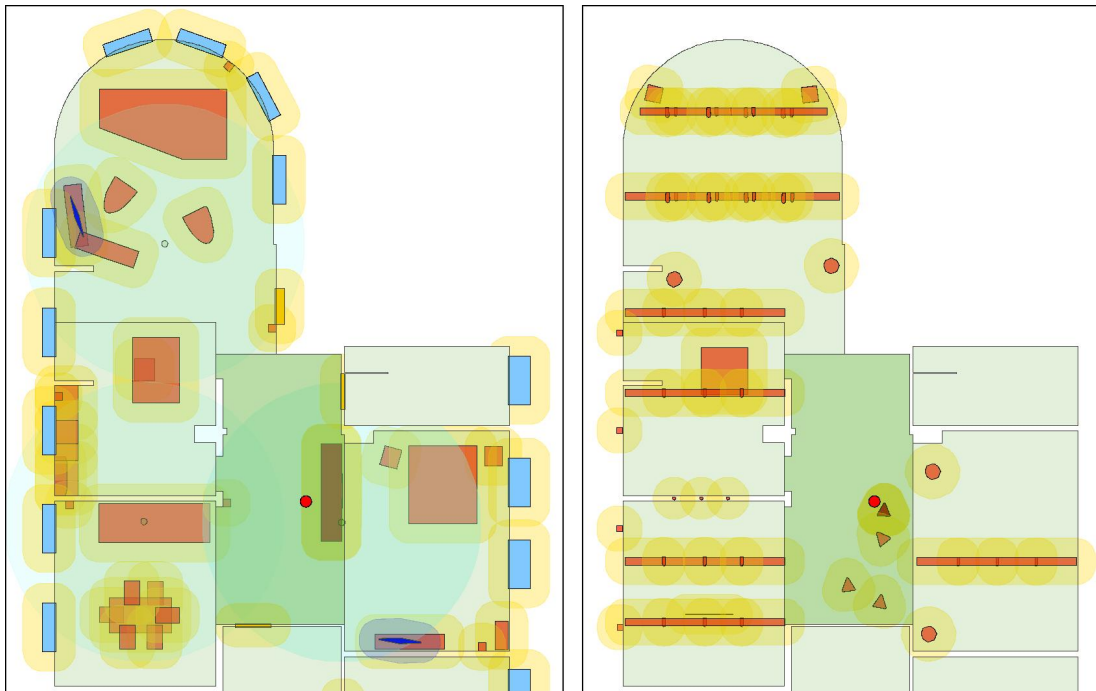


Abb. 5.7.: 2D Visualisierung (links: Mobiliar, Fenster und Türen; rechts: Beleuchtung)

det hier das *Marshalling* und Unmarshalling von JSON-Nachrichten⁶ des Blackboards statt. In den konkreten Implementierungen der Subscriber- und Serviceinstanzen (vgl. *ServiceImpl* in Abb. 5.8) findet die Verarbeitung der Nachrichten und ggf. das Formulieren einer Antwort statt. In ihnen spiegelt sich die Realisierung der in der Analyse formulierten Szenarien wider – z.B. ist die Klasse *SpatialRelationshipsService* für die Auflösung einer *räumlichen Suchanfrage* verantwortlich.

Durch die Abstrahierung der Kommunikationsaspekte von denen der konkreten Implementierung kann in Zukunft bei Verwendung einer anderen Kommunikationsform ein einfacher Austausch der Abstraktionsschicht erfolgen, ohne dass eine Anpassung der konkreten Implementierungen erforderlich ist.

Bei *Serviceinstanzen*, die eine Realisierung des Request-Response Mechanismus darstellen, läuft die Verarbeitung von Nachrichten wie folgt ab: durch jede Anfrage eines Agenten erfolgt ein (Methoden-)Aufruf der *Analyseschicht*. Das Rückgabergebnis wird anschließend in Form einer Antwort über den Publish-Mechanismus versendet. Abbildung 5.8 verdeutlicht die Übersetzung der Serviceaufrufe an die Analyseschicht durch die Kommunikationsmodule (in Kap. 5.6 werden detaillierte Kommunikationsabläufe ausgewählter Szenarien geschildert).

⁶Im Living Place Hamburg wird als Nachrichtenformat *JSON* (Javascript Objekt Notation; siehe http://de.wikipedia.org/wiki/JavaScript_Object_Notation) verwendet.

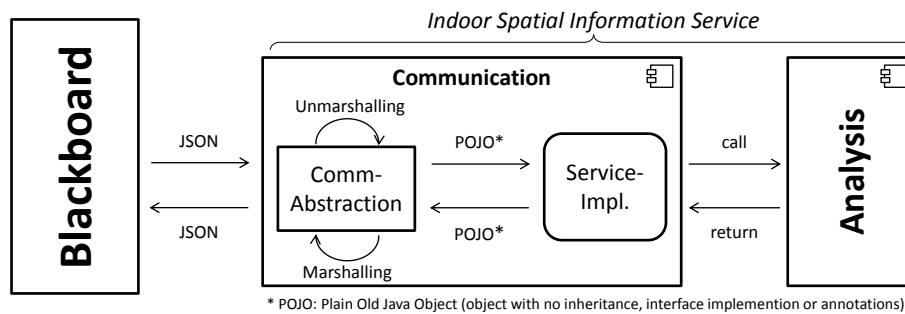


Abb. 5.8.: Ablauf eines Serviceaufrufs über das Blackboard

Subscriberinstanzen hingegen zielen nicht darauf ab eine Anfrage zu beantworten, sondern dienen der Weiterverarbeitung von Daten. Wie im Szenario der *kontinuierlichen Aufenthaltsanalyse* beschrieben, findet z.B. eine *Sensorfusion* statt mit anschließendem Versenden weiterer semantisch angereicherter Nachrichten.

Da die Analyseschicht eine eigene unabhängige Komponente („Black-Box“) darstellt, kann die hier geschilderte blackboardbasierte Kommunikationsschicht problemlos komplett durch eine andere Kommunikationsform (z.B. SOAP Webservices) ersetzt werden.

Analyse & Modifikation In dieser Schicht finden Modifikationen und Analysen auf Basis des Gebäudemodells statt. Hierzu wird das Gebäudemodell mit Hilfe der `Open IFC Tools`⁷ (Teil des *Global Testing Documentation Servers* zur IFC Zertifizierung) zunächst in ein internes Objektmodell überführt. Dadurch ist ein objektorientierter Zugriff auf alle Entitäten des Modells gewährleistet.

Das IFC Klassenmodell ist aufgrund der tiefen Hierarchisierung und der teils inversen Zugriffe auf Attribute sehr komplex (vgl. auch [Hartmann \(2010\)](#)). Daher bietet diese Schicht des ISIS eine einfache Schnittstelle (in Form einer Fassade, siehe Kap. 5.5) für häufig verwendete Abläufe für den *Zugriff und Modifikation* von IFC Entitäten⁸ – hierzu zählen bspw.:

- Auslesen, Ändern und Hinzufügen von Attributen
- Positionierung von Objekten im 3D Raum
- Verwaltung von Objekten, die mit Ortungstags versehen sind
- Ändern von Objektzuständen

Der zweite Aspekt dieser Schicht betrifft die *räumliche Analyse* in 2D und 3D. Die 3D Analyse erfolgt auf Basis der *Spatial Query Language* von Borrmann (vgl. [Borrmann u. a. \(2006\)](#),

⁷Bauhaus Universität Weimar; Webseite: <http://www.openifctools.net>

⁸Als sehr hilfreich erweist sich hier die [IFC2x3 Spezifikation](#) und der [Model Implementation Guide V2](#).

[Borrmann \(2010\)](#)). Wie bereits erwähnt, bietet sie topologische, metrische und direktionale Operatoren. Zum derzeitigen Stand ist jedoch eine Konvertierung in das VRML Format notwendig, sodass keine dynamischen Aspekte berücksichtigt werden können.

Für die 2D Analyse werden in der Initialisierungsphase die 3D Geometrien in eine 2D Form überführt. Die topologischen 2D Analysen werden darauf basierend mit der `Java Topology Suite (JTS)` vorgenommen. Diese Bibliothek hat sich in diversen GIS Projekten bewährt (u.a. Open Jump, uDig und GeoTools; vgl. [Jena und Roehrig \(2007\)](#)) und kann als Standardbibliothek angesehen werden. Sie stellt in dieser Arbeit die Verbindung zwischen BIM und GIS her.

Persistenz Die Persistenzschicht deckt zwei unterschiedliche Aspekte ab: die Verwaltung des Gebäudemodells und die Organisation der Konfigurationseinstellungen.

Für die zentrale Verwaltung des Modells wird ein Produktmodellserver eingesetzt ([Abb. 5.9](#) verdeutlicht den Nutzen). Bei Programmstart des räumlichen Services wird das Modell abgerufen und in regelmäßigen Abständen werden Änderungen zurückgeschrieben.

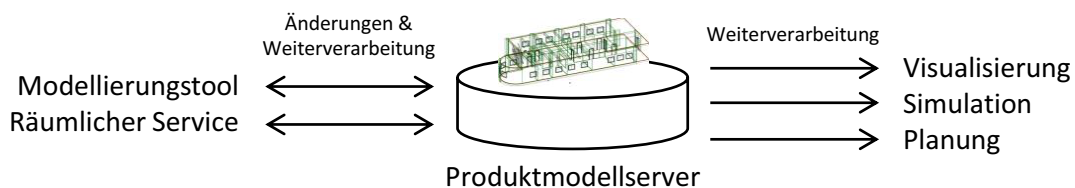


Abb. 5.9.: Skizze der Verteilung des Gebäudemodells

Die Verwaltung der Konfigurationseinstellungen umfasst u.a. die Konfiguration der Viewer, Zugangsdaten und Projektdetails des Produktmodellservers, Blackboard-Kommunikationseinstellungen und Details zum ISIS selbst. Einige Einstellungen werden zur Laufzeit geändert – z.B. wird die Versionsnummer des Gebäudemodells gesichert, sodass bei einem erneuten Start nur ein aktualisiertes Modell vom Produktserver geladen wird.

5.4.2. Techniken, Tools und Bibliotheken

Der räumliche Service verwendet eine Fülle an Bibliotheken und Schnittstellen, um die Dienste bereitzustellen, die für die Realisierung der Szenarien erforderlich sind. In [Tabelle 5.2](#) sind die Wichtigsten tabellarisch aufgeführt.

Name	Autor	Funktion	Einbindung
Visualisierung			
Open IFC Tools Viewer	Bauhaus Universität Weimar	3D Visualisierung von IFC Gebäudemodellen	lib
Java3D Bibliotheken	Oracle	Java 3D Visualisierung	lib
Kommunikation			
ActiveMQ Wrapper	S. Voskuhl, K. Otto	Kommunikationsabstraktionslayer inkl. Persistenz (Un)Marshalling (JSON \Leftrightarrow Java-Objekt)	lib
Gson	Google Inc.		lib
Analyse			
Open IFC Tools	Bauhaus Universität Weimar	Zugriff und Modifikation von IFC Entitäten	lib
Java Topology Suite (JTS)	Vivid Solutions	2D topologische Analyse	lib
Open Jump GIS Workbench	Vivid Solutions	Transformation (JTS zu Java 2D)	lib
Spatial Browser	TU München	3D Analyse von Bauwerksmodellen	Quellcode
Persistenz			
BiMServer	TNO, TU Eindhoven	Verwaltung des IFC Gebäudemodells	SOAP

Tab. 5.2.: Im ISIS eingesetzte Bibliotheken

Das Zusammenspiel dieser Bibliotheken (unbeachtet der Kommunikation) wird in Abb. 5.10 wiedergegeben. Ausgangspunkt ist das Gebäudemodell, das mit Autodesk Revit erstellt wurde. Das exportierte IFC-Modell wird zentral vom BiMServer⁹ verwaltet. Dieses wird zunächst vom BiMServer heruntergeladen und mit Hilfe der Open IFC Tools in ein Objektmodell überführt, welches die Grundlage der weiteren Verarbeitung, Analyse und Visualisierung darstellt. Das Objektmodell kann ohne weitere Vorarbeiten mit Hilfe des 3D Open IFC Tools-Viewers dargestellt werden.

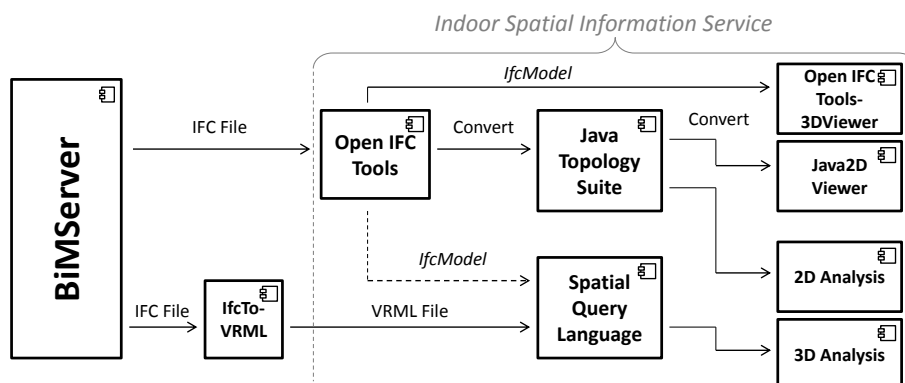


Abb. 5.10.: Zusammenspiel der Tools und Bibliotheken

Für eine Analyse in 2D wird die robuste und weit verbreitete Java Topology Suite (JTS) verwendet. Hierzu wurde ein Modul geschrieben, das die relevanten Entitäten des 3D Modells (Wände, Fenster, Mobiliar etc.) in 2D Geometrien der JTS Bibliothek überführt. In diesem Prozess wird derzeit die konvexe 2D Hülle der 3D Objekte verwendet, indem der *QuickHull* Algorithmus angewendet wird. Die 2D JTS Geometrien können nun direkt für topologische 2D Anfragen in der Analyseschicht verwendet werden.

⁹Webseite: <http://www.bimserver.org>

Für die 2D Visualisierung werden die Geometrien mit Hilfe einer Teilbibliothek der Open Jump GIS Workbench in Java2D Geometrien konvertiert und schließlich in einem oder mehreren 2D Viewern visualisiert. Eine Konfigurationsdatei gibt hierbei die Anzahl, den Bildausschnitt, die Skalierung und die Größe der 2D Viewer an, sowie die Objektklassen, die nicht angezeigt werden sollen.

Die 3D Analyse findet auf Basis der *Spatial Query Language* statt. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit ist hierzu eine *manuelle* Konvertierung des IFC Gebäudemodells in das VRML Format erforderlich¹⁰ – an einer neuen Version, in der das Objektmodell der Open IFC Tools verwendet werden kann, wird derzeit gearbeitet.

Der Zugriff auf die Funktionalitäten der *Spatial Query Language* wurde über einen Wrapper mit einfach gehaltener Schnittstelle realisiert (`setModel(String vrmlFile)`, `processQuery(String sqlQuery)`). Die *Spatial Query Language* ist ein SQL Dialekt, der beliebige Anfragen an das Gebäudemodell ermöglicht. Ein Beispiel könnte so aussehen:

```
SELECT id FROM IfcDoor f WHERE DISTANCE(f.id, '20VBaLS') <= 3
```

5.4.3. Architekturbewertung

Zur Verifikation der Architektur wurde die Analysesoftware *Sonargraph*¹¹ eingesetzt. Auf Basis des Quelltextes werden Metriken erstellt (u.a. Abhängigkeits-, Erosions- und John Lakos Metriken), auf Zyklenfreiheit getestet und die Einhaltung der Schichten überprüft. Für Letzteres müssen manuell Schichten definiert und diesen anschließend die entsprechenden Quelltext-Pakete zugewiesen werden. Abb. 5.11 zeigt die Einhaltung der Schichtenarchitektur auf Basis der definierten Abhängigkeiten.

Wie in der Abbildung zu sehen ist, finden *keine* Zugriffsverletzungen statt – diesbezüglich werden also die Anforderungen an die Schichtenarchitektur eingehalten. Jedoch werden durch *Layer-Bridging* Schichten übersprungen – der Vorteil hierbei ist die höhere Performance, der mit dem Nachteil zusätzlicher Abhängigkeiten erkaufte wird (vgl. [Starke \(2008\)](#)).

Die Metrikanalyse ergibt ebenfalls durchweg positive Ergebnisse. Die Aussagekraft von Metriken ist jedoch zweifelhaft, insbesondere wenn keine Erfahrungswerte existieren, mit denen die Auswertungsergebnisse verglichen werden können.

Das Qualitätskriterium eines modularen Aufbaus wurde durch die Wiederverwendung einiger Komponenten in anderen Projekten gezeigt. So wurde z.B. in [Voskuhl \(2012\)](#) die Visualisierungs- und Analysekomponente verwendet, um auf Basis einer 2D Visualisierung

¹⁰Zur Konvertierung eines IFC Modells in VRML wird der `IfcStoreyViewer` des Forschungszentrum Karlsruhe verwendet.

¹¹Webseite: <http://www.hello2morrow.com>

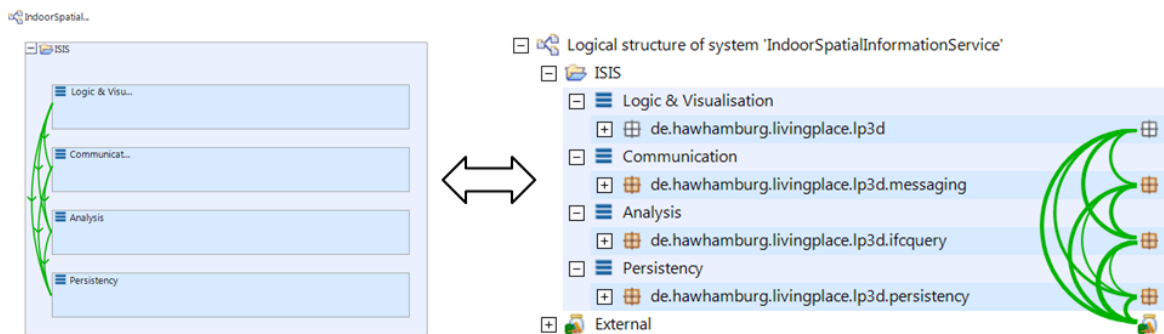


Abb. 5.11.: Architekturanalyse mit Sonargraph

der intelligenten Wohnung Trajektorien darzustellen. Weiterhin wird zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit an einer *Ortungsverbesserung* mit Hilfe des räumlichen Services gearbeitet (Meyer (2012)).

5.5. Designentscheidungen

In diesem Kapitel werden Designentscheidungen erörtert, die während der Realisierung getroffen wurden. Im Folgenden werden daher vor allem Designpattern der einzelnen Schichten vorgestellt, die zur Lösung typischer Entwurfsprobleme angewandt wurden.

Logik

In dieser Komponente wird der komplette Programmablauf gesteuert – beginnend bei der Initialisierung bis hin zur Finalisierung des Systems (vgl. Kap. 5.4.1). Die Komponente ist *während* der aktiven Phase des räumlichen Services als Dienst in der intelligenten Umgebung weitestgehend unbeteiligt, kann also nicht als Mediator oder Broker angesehen werden. Sie ist eher an den *Controllern* der *Presentation-Abstraction-Control* (PAC) und *Model-View-Controller* (MVC) Pattern angelehnt, deren Hauptaufgabe in der Vermittlung, Kommunikation und Ablaufsteuerung begründet liegt.

Visualisierung

Die Visualisierung bzw. Präsentation bildet die oberste Schicht der Gesamtarchitektur. Von daher sind nur Zugriffe auf untere Schichten gestattet – ein Zugriff auf die Präsentationsschicht von einer unteren Schicht aus ist zu vermeiden.

In der Analyse wurde die Anforderung „Feedback über den momentanen Zustand und die aktuellen Änderungen in der Wohnumgebung“ an die Visualisierung formuliert (s. Kap. 4.2.5). D.h., dass dynamische Prozesse zum Zeitpunkt ihres Auftretens dargestellt werden müssen. Im räumlichen Service existiert für jede Visualisierung – 2D und 3D – sowie zur räumlichen Analyse ein internes Modell aller Objekte des Gebäudes. Änderungen am Modell müssen daher den graphischen Oberflächen bekannt gegeben werden. Damit kein direkter Zugriff vom Modell (bzw. der Analyseschicht) auf die graphische Oberfläche erfolgen muss (was eine Verletzung der Schichten bedeutet), wird zur Umkehrung des Zugriffs das *Observer* Pattern angewandt (Gamma u. a. (1995)). Bei der 3D Visualisierung ist das Pattern durch einen *EventListener* realisiert. Die 2D Visualisierung hingegen verwendet die vom Java-Framework vorgegebene Klasse *Observable* und das Interface *Observer*.

Kommunikation

Wie in der Vorstellung der Schichten bereits erwähnt, ist die Kommunikation in zwei Schichten unterteilt. Den ersten Teil bildet eine abstrakte Schicht, die die Verwaltung der Kommunikation übernimmt. Der zweite Teil wird von konkreten Implementierungen in Form von Subscribern, Services und Publishern, in denen die erhaltenen Daten weiterverarbeitet werden, gebildet.

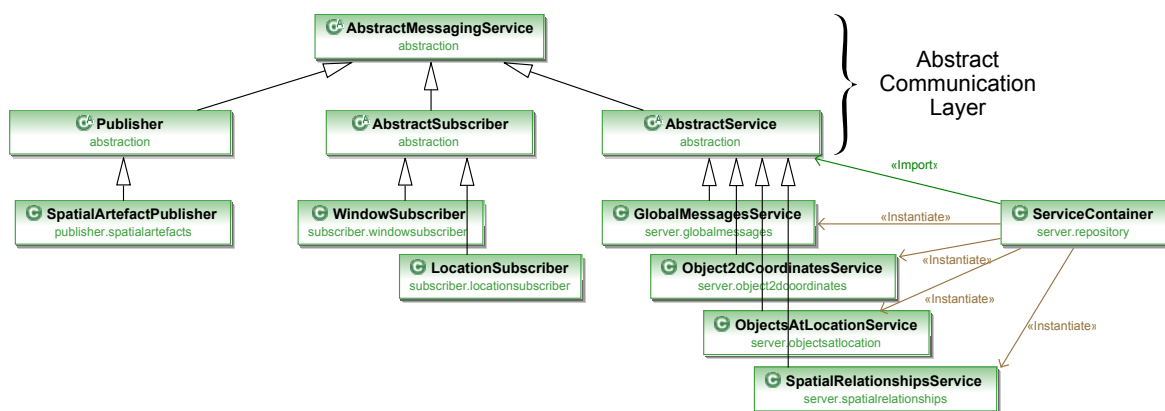


Abb. 5.12.: Klassendiagramm (Ausschnitt) wichtiger Kommunikationselemente

Als Alternative zu der recht tiefen Hierarchisierung (vgl. Abb. 5.12) kann das *Bridge* Pattern angesehen werden. Der Vorteil ist eine stärkere Entkopplung der Implementierung von der Schnittstelle (hier durch die abstrakten Oberklassen gegeben). Durch die *Bridge* können Schnittstelle und Implementierung einfacher unabhängig voneinander verändert werden, was insbesondere bei häufigen Änderungen der Schnittstelle Vorteile bringt. Da das *Bridge* Pattern jedoch mit erhöhter Komplexität einhergeht und kaum Änderungen

in der Kommunikationsabstraktion des ISIS zu erwarten sind, wurde von einer Umsetzung dieses Patterns abgesehen.

Die Initialisierung der Dienste erfolgt über *ServiceContainer*, die die Dienste in einer Liste verwalten (vgl. *Registry* Pattern). Dies vereinfacht das Hinzufügen neuer Dienste – diese müssen lediglich beim *ServiceContainer* angemeldet werden. Außerdem brauchen höhere Schichten die konkrete Implementierung aufgrund einer gemeinsamen Schnittstelle nicht zu kennen, was die Kopplung im System verringert.

Des Weiteren können einzelne Dienste mittels *Observer* Muster Nachrichten an interessierte Entitäten übermitteln. Dies wird z.B. eingesetzt, um *Lifecycle-Nachrichten*¹² über die Anwendung zu propagieren – tritt eine Nachricht mit dem Inhalt „gehe in den *silent mode*“ ein, wird dies an andere Interessenten weitergeleitet, sodass diese darauf reagieren können.

Die Abarbeitung einer Anfrage an den räumlichen Service ist unterschiedlich komplex. Oftmals reicht *ein* Methodenaufruf an die Analyseschicht, um das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Im Falle der *kontinuierlichen Aufenthaltsanalyse* bspw. ist dies wesentlich umfangreicher – hier wird, ähnlich dem *Command Processor* Muster, der Aufruf von seiner Abarbeitung getrennt. Ein *Manager* (bzw. *Command Processor*) verwaltet Anfragen als separate Objekte, plant die Abarbeitung („Scheduler“) und bietet zusätzliche Dienste an (z.B. die *SpatialArtefact* Analyse und Positionsupdates von Mobilien über die Analyseschicht).

Analyse & Modifikation

Die Analyseschicht bietet ihre Dienste über eine *Fassade* an, die als *Singleton* realisiert ist (vgl. Abb. 5.13). Dadurch offeriert sie eine einheitliche Schnittstelle für höhere Schichten und entspricht somit dem Entwurfsprinzip der *Verschwiegenheit*. Alle Aufrufe von höheren Schichten werden über die Fassade an die konkreten Implementierungen weitergeleitet – dadurch werden die Aufrufer u.a. leichter wartbar. Das *Singleton* verhindert weiterhin, dass mehrere Instanzen der Fassade existieren.

„Hinter“ der Fassade verbergen sich diverse Klassen, die jeweils Teilaufgaben des gesamten Moduls übernehmen und hierzu ggf. kooperieren. Zum einen finden sich hier Helferklassen z.B. für das Auslesen und Setzen von Attributen des Gebäudemodells. Zum anderen ist hier die 2D und 3D Analyse realisiert. Wie bereits erwähnt, wird die 3D Analyse durch externe Bibliotheken realisiert – ein *Adapter* bzw. *Wrapper* passt deren Schnittstellen derart an, dass sie in der Analyseschicht verwendet werden können. Die 2D Analyse wird im Folgenden näher betrachtet, da diese nicht vollständig von externen Bibliotheken realisiert ist.

¹²Mittels „Lifecycle-Nachrichten“ kann der Zustand der Softwareagenten zentral gesteuert werden.

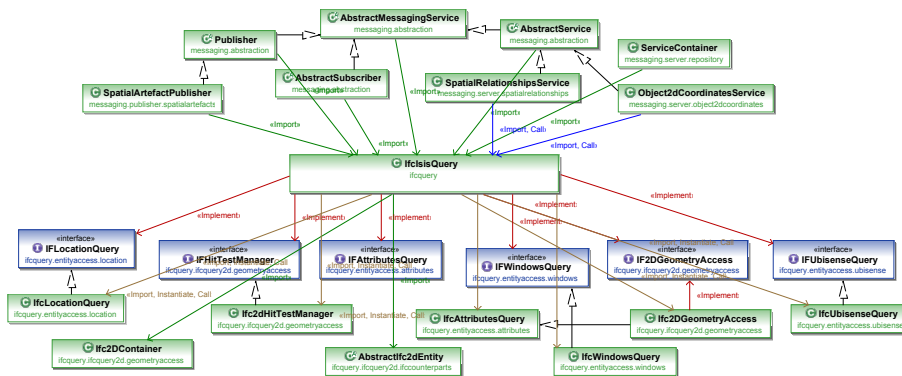


Abb. 5.13.: Klassenausschnitt der Fassade – der Zugriff auf die Analyseschicht erfolgt *einzig* über *IfcIisisQuery* (zur Veranschaulichung mittig platziert)

Um die 2D Analyse zu veranschaulichen, wird zunächst der Aufbau des 2D Modells beschrieben. Die Klasse *Ifc2DGeometryAccess* (vgl. Abb. 5.14, ebenfalls *Singleton*) überführt die 3D Geometrien der IFC-Entitäten in 2D Geometrien (der Konvertierungsprozess wurde bereits in Kap. 5.4.2 beschrieben). Über eine *Factory*-Methode werden anschließend die IFC äquivalenten 2D Klassen instanziiert (z.B. *Ifc2dDoor*). Diese aggregieren im Wesentlichen fünf Typen: je zwei JTS-Geometrien zur Analyse (das 2D Äquivalent einer IFC-Entität sowie das dazugehörige Spatial Artefact), dazu die entsprechenden Java2D Klassen zur Visualisierung und die ursprüngliche IFC-Entität (hier wäre es sinnvoll diese per *Decorator* hinzuzufügen, was aber mangels Schnittstelle der IFC-Objekte nicht möglich ist). Die IFC-2D-Äquivalente definieren damit also ihre geometrische Ausprägung sowie weitere Visualisierungsaspekte. Außerdem werden sie wiederum in einem *Container* verwaltet, der Änderungen an den Entitäten den *Observern* bekannt gibt.

Der *Ifc2dHitTestManager*, der über die Fassade anderen Schichten zur Verfügung steht, verwendet den *Container* um topologische Analysen durchzuführen. Bspw. wird das Szenario der *kontinuierlichen Aufenthaltsanalyse* im Wesentlichen durch diese Klasse geregelt, indem die Geometrien auf eine Überschneidung mit dem Aufenthaltsort der Person hin getestet werden (z.B. mittels `getHitEntities(point2d, radius, locationTagId)`).

Persistenz

Die Persistenz dient der Verwaltung des Gebäudemodells und der Organisation der Konfigurationseinstellungen. Die Verwaltung des Modells erfolgt über die SOAP Schnittstelle des Produktmodellserver. Der eingesetzte BiMServer bietet eine rudimentäre Client-Implementation an, über die die Methoden des Servers gekapselt sind. Über einen

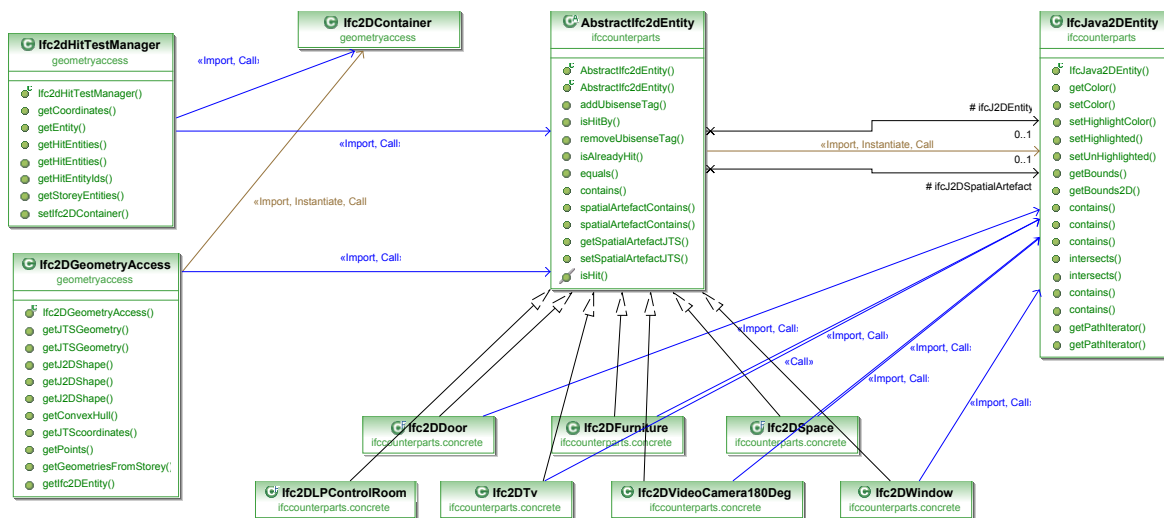


Abb. 5.14.: Klassenausschnitt zur 2D Analyse

Adapter bzw. Wrapper wird der Auf- und Abbau der Verbindung zum Server durchgeführt und eine auf das Wesentliche reduzierte Schnittstelle anderen Schichten bereitgestellt.

5.6. Evaluation

Dieses Kapitel beschreibt die Funktionalität und Leistungsfähigkeit des räumlichen Services. Hierfür werden zunächst typische Abläufe der räumlichen Kontextinterpretation von Positionsdaten betrachtet und anschließend der Ablauf einer räumlichen Serviceanfrage konkretisiert. Daraufhin wird gezeigt, wie ISIS als Testumgebung für andere Agenten dienen kann und letztlich der Betrieb des Services in realer Umgebung beschrieben.

Detaillierte Kommunikationsabläufe

Räumliche Serviceanfrage

Die *Auflösung räumlicher Relationen* in Verbindung mit einer räumlichen Serviceanfrage (vgl. Szenario *räumliche Suche* zum Auffinden von Gegenständen) durch einen externen Agenten wird durch das Sequenzdiagramm in Abb. 5.15 wiedergegeben.

Der Agent *SpatialSearch* stellt mittels Blackboard eine Anfrage¹³ über die räumlichen Relationen zu einem berechneten Raumpunkt an den ISIS. Intern wird diese Anfrage vom *Spa-*

¹³Details zur Request-Response-Kommunikation über das Blackboard siehe Kap. 5.2.1.

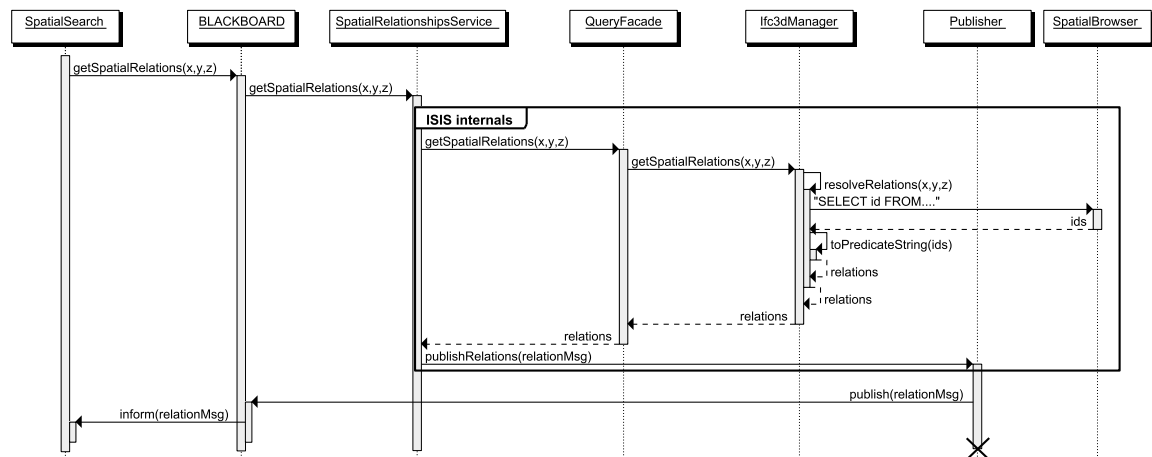


Abb. 5.15.: Sequenzdiagramm einer räumlichen Serviceanfrage

tialRelationshipsService (SRS) entgegengenommen. Durch den SRS erfolgt nun ein Methodenaufruf an die zentrale Schnittstelle der Analyseschicht (*QueryFacade*). Diese leitet den Aufruf an den *Ifc3dManager* weiter, der intern eine Reihe von SQL-Anfragen an den Wrapper des *SpatialBrowsers* schickt, um die räumlichen Relationen um den gegebenen Raumpunkt herum aufzulösen. Hier werden u.a. folgende Fragestellungen beantwortet: In welchem Zimmer befindet sich der Raumpunkt? Welche Einrichtungsgegenstände befinden sich darüber, darunter, daneben etc.? Die Relationen werden schließlich in eine maschinenlesbare Form überführt (Prädikate nach [John und Freeman \(1975\)](#), vgl. Kap. 3.3.1) und über die Fassade dem SRS zurückgeliefert. Dieser initiiert schließlich das Versenden einer Antwortnachricht mittels Publisher über das Blackboard, die der Agent *SpatialSearch* erhält. Letztlich wird dem suchenden Bewohner eine natürlichsprachliche Antwort geliefert.

Kontinuierliche Analyse von Lokationsdaten

Die kontinuierliche Analyse von Lokationsdaten dient einerseits der Realisierung der *Ortskonsistenz* und andererseits der *räumlichen Kontextanreicherung*, die wiederum die Grundlage diverser Szenarien bildet (z.B. *Activity Pattern Recognition*, *Location based Services*, *Multimodale Interaktionen*).

Hierbei werden Lokationsdaten (im *Living Place* vom UWB Indoorlokationssystem *Ubisense*¹⁴) über das Blackboard bereitgestellt. Wie der räumliche Service als Abonnent diese Daten weiterverarbeitet, ist in Abb. 5.16 dargestellt und wird im Folgenden beschrieben.

¹⁴Webseite: <http://www.ubisense.com>

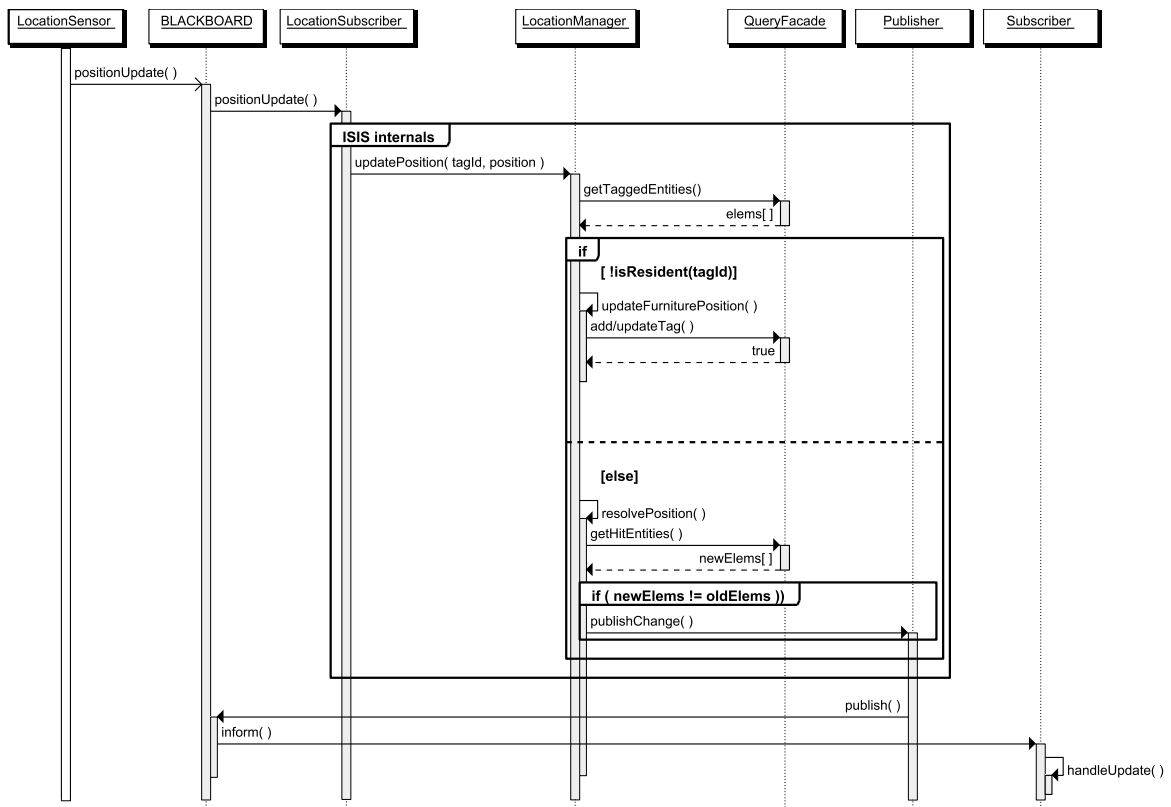


Abb. 5.16.: Sequenzdiagramm zur kontinuierlichen Aufenthaltsanalyse

Neue Positionsdaten sowie Informationen wie die ID des Lokationstags („TagId“) werden dem *LocationSubscriber* des ISIS zunächst über das Blackboard mitgeteilt. Dieser übergibt sie zur weiteren Verwaltung dem *LocationManager* (LM). Zunächst untersucht dieser auf Basis der *TagId*, ob es sich um einen *Tag* handelt, das an *Mobiliar* angebracht wurde – im anderen Fall wird angenommen, dass dieser Tag einen Bewohner oder eine Bewohnerin repräsentiert. Die unterschiedlichen Fälle werden im Folgenden betrachtet:

- 1. Fall: Tag repräsentiert Bewohner** In diesem Fall der *kontinuierlichen Aufenthaltsanalyse* wird zunächst überprüft, welche Räume, Gegenstände und Spatial Artefacts sich bei dem gegebenen Raumpunkt befinden (Methodenaufruf *getHitEntities()* der Fassade). Hierbei handelt es sich um eine surjektive Abbildung von Raumpunkt zu semantisch angereicherter Positionsinformation (SAP, vgl. Kap. 4.2.3):

$$\forall y \in Y : \exists x \in X : f(x) = y, x \in \text{absoluteOrtskoordinate}, y \in \text{SAP} \quad (5.1)$$

Ergibt sich auf Basis der gefundenen SAP und einer vorhergehenden Analyse ein

Unterschied, d.h. ist die *symmetrische Differenz*

$$A\Delta B := \{x | ((x \in A) \wedge (x \notin B)) \vee ((x \in B) \wedge (x \notin A))\} \quad (5.2)$$

von alter Liste A und neuer Liste B nicht leer, dann wird für alle Elemente der Differenzliste eine Nachricht über den Publisher an das Blackboard versendet:

$$A\Delta B \neq \emptyset \rightarrow \forall x \in A\Delta B : \text{sendeNachricht} \quad (5.3)$$

Somit werden nur bei *Änderungen* Nachrichten versandt. Diese enthalten z.B. die Tag-Id, die Objekt-Id, den Objekt-Typ und ein Flag, das angibt, ob sich eine Bewegung *in* den Bereich *hinein* oder aus ihm *heraus* stattgefunden hat.

2. Fall: Tag repräsentiert Mobiliar In diesem Szenario der *Ortskonsistenz* werden Tags, die einem Stuhl o.ä. zugewiesen wurden, dafür verwendet, die Position desselbigen im digitalen Modell an die Realität anzupassen. Die hierzu notwendigen Berechnungen sind in Abb. 5.17 zu sehen und werden im Folgenden erklärt.

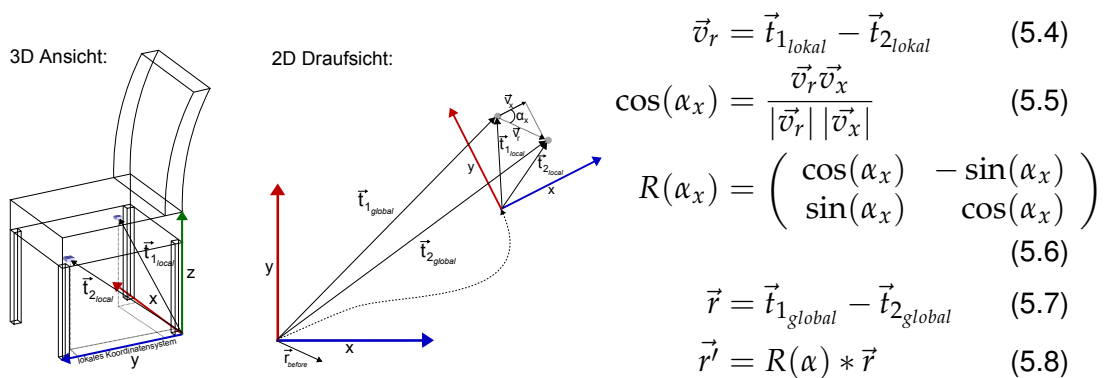


Abb. 5.17.: Neuberechnung der Position auf Basis von Lokalisierungstags

Jeder *Tag* hat je eine globale Position \vec{t}_{global} , welche durch das Lokalisierungssystem gegeben ist und außerdem eine lokale Position \vec{t}_{lokal} im lokalen Koordinatensystem der Entität (festgehalten in einem IFC-Attribut des Gebäudemodells). In IFC orientiert sich das lokale Koordinatensystem einer IFC-Entität an ihrem umgebenden Container-element (siehe „2D Draufsicht“ in Abb. 5.17). Zur Angabe der neuen Position wird zunächst der Winkel α_x zwischen \vec{v}_r und der x-Achse \vec{v}_x berechnet (Formeln 5.4 & 5.5). Anschließend wird der Richtungsvektor \vec{r}_{before} mit Hilfe der Drehmatrix $R(\alpha_x)$ um den Winkel α_x gedreht (Formeln 5.6 - 5.8). Letztlich folgt die Verschiebung des lokalen Koordinatensystems innerhalb des umgebenden Systems.

Die Verschiebung bildet den Abschluss dieses Programmpfades – es werden keine weiteren Nachrichten gesandt. Jedoch bewirkt ein *Flag*, das Änderungen am Modell

signalisiert, bei der nächsten periodischen Prüfung einen Upload des Modells auf den Produktmodellserver.

Leistungsnachweis im Live-Betrieb

Bei der offiziellen Eröffnung des *Living Place Hamburg* im November 2011 wurden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen die Funktionen der intelligenten Wohnung einem großen Publikum¹⁵ demonstriert. Die währenddessen angefallenen Daten sind in Tabelle 5.3 aufbereitet. Insgesamt wurden knapp 720.000 Nachrichten verschickt. Der Großteil stammt vom Lokalisierungssystem, das auf zwei Topics (*UbisenseTracking* und *UbisenseTracking_cm*) redundante Nachrichten versendete – in Tabelle 5.3 wurde die Redundanz bereinigt.

Auf die Lokalisierungsdaten entfallen knapp die Hälfte aller versandten Nachrichten. ISIS verschickte über das Topic *LP3D.SPATIALARTEFACTS* mit knapp 45% nicht wesentlich weniger Nachrichten. Anzumerken ist, dass jede der knapp 240.000 Ortsnachrichten des Lokalisierungssystems im ISIS analysiert wurde (vgl. [kontinuierliche Aufenthaltsanalyse](#)).

Topic	Anzahl	Anteil
UbisenseTracking	238.638	49,6%
LP3D.SPATIALARTEFACTS	214.360	44,6%
LP.LIGHTCONTROL	25.321	5,3%
Sonstige	2.806	0,6%
Summe	481.125	100%

Tab. 5.3.: Nachrichtenverteilung an zwei Tagen im *Living Place Hamburg*

Da nur bei Änderungen des Aufenthalts in den Räumen und der *Spatial Artefacts* Nachrichten versandt werden, liegt die Annahme nahe, dass ISIS anteilig *wesentlich* weniger Nachrichten verschicken müsste, als Ortsnachrichten eintreffen. Zwei Faktoren bewirken das Gegenteil:

1. Die *Überlagerung* von Räumen und Spatial Artefacts kann bei *einer* Bewegung das quasi gleichzeitige Betreten bzw. Entfernen aus diesen Bereichen hervorrufen. Bei zwei Raumpunkten P_1 und P_2 , die vom Lokalisierungssystem übermittelt werden, kann z.B. das Betreten eines Raumes, Entfernen aus einem anderen Raum sowie das Betreten des *Functional Spaces* eines Tisches erkannt und als Nachricht vom ISIS versandt werden. Der absoluten Ortskoordinate P_2 stehen damit drei Nachrichten des ISIS entgegen. Da aber nicht jeder neue Raumpunkt P_n das Versenden einer Nachricht im ISIS bewirkt, bleibt das Nachrichtenverhältnis ausgewogen.

¹⁵Am zweiten Tag seien es ca. 2000 Besucher gewesen (vgl. <http://www.livingplace.org/?p=439>), denen in Gruppen von 30-40 Personen eine Demonstration der intelligenten Wohnung geboten wurde.

2. Die *Präzision* des eingesetzten UWB Lokalisierungssystems *Ubisense* leidet unter hohen Menschenmengen. Dadurch kommt es des Öfteren zu größeren Sprüngen. Teilweise werden diese vom Lokalisierungssystem zwar herausgefiltert, dennoch ist die *Gesamtfluktuation* erhöht. Dadurch kommt es auch vermehrt durch die in 1. beschriebenen Änderungen der Bereiche und somit zu höherem Nachrichtenaufkommen durch den ISIS.

Im Rahmen der Demonstrationen konnten keine nennenswerten Engpässen in der Leistungsfähigkeit des räumlichen Services festgestellt werden. ISIS ist demnach in der Lage, derartige Anforderungen in Robustheit und Performanz zu bewältigen.

ISIS als Testumgebung

Die mit dem räumlichen Service in Kooperation stehenden Projekte verwenden den ISIS als Testumgebung für ihre eigenen Anwendungen. Zum lokalen Testen wird neben dem ISIS u.a. das Blackboard benötigt. Des Weiteren können mit einem in dieser Arbeit erstellten Lokationsmockup Bewegungspfade von Personen simuliert werden. Zusammengenommen steht ein komplettes Toolkit zum lokalen Testen von Anwendungen, die mit ISIS interagieren, bereit (eine detaillierte Anleitung findet sich im [Anhang](#)). Das aufwändige Testen in der realen Wohnumgebung kann somit minimiert werden.

Die Kooperationsprojekte lassen sich in diejenigen unterteilen, die nach dem Request-Response Muster diverse *Services* des ISIS in Anspruch nehmen und in die, die sich die *kontinuierliche Aufenthaltsanalyse* des ISIS über die *SpatialArtefacts* zu Nutze machen. Im Folgenden sind die entsprechenden Szenarien samt Autoren aufgelistet:

- *Services*
 - [Räumliche Suche](#) (Najem)
 - [Virtual Notes](#) (Rudolf)
 - [Visuelle Positionsbestimmung](#) (Möhlmann)
- *SpatialArtefacts*
 - [Activity Pattern Recognition](#) (Ellenberg u. a.)
 - [Location Based Media](#) (Voskuhl)
 - [Cubicle](#) (Gregor u. a.)
 - [Intelligente Gegensprechanlage](#) (Bornemann)

5.7. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden das Softwaredesign und ausgewählte Details der Realisierung vorgestellt, sowie ein Leistungsnachweis des räumlichen Services erbracht. Zudem wurde zu Beginn die *Gebäudemodellierung* detailliert betrachtet, da diese die Basis des räumlichen Services darstellt.

Zunächst stand die Modellierung eines hochdetaillierten, semantischen Gebäudemodells auf Basis der standardisierten IFC-Klassen im Fokus. Da der ISIS als Leistungsnachweis im *Living Place Hamburg* integriert werden sollte, wurde es auf Grundlage eines 2D CAD Flurplanes in 3D modelliert. Hierzu war weiterhin das exakte Ausmessen der Wand- und Deckenhöhen erforderlich, da diese Informationen nicht im 2D CAD Modell enthalten waren. Durch das IFC-Attributierungsmodell konnten Objekte mit zusätzlichen Informationen, wie z.B. einer projektweiten ID, Lokationstag-relevanten Informationen und mit *Spatial Artefact*-Details annotiert werden.

Einen generellen Infrastrukturüberblick verschaffte das Kapitel über die *Einbindung in die Systemumgebung* des Living Place Hamburgs. Die Kommunikation der verteilten Sensoren, Aktoren und Agenten findet hier über ein *zentrales Blackboard* statt, welches das *Publisher-Subscriber*- und *Producer-Consumer-Modell* umsetzt. Der räumliche Service ist in diesem Modell zum einen *Konsument* von Sensorinformationen, zum anderen – in der Funktion als räumlicher Context Provider durch Sensorfusion – *Produzent* semantisch angereicherter Informationen. Letztere werden kontinuierlich – d.h. ohne expliziten *Request* – über das Blackboard gesandt und schließlich von anderen Softwareagenten weiterverarbeitet. Einzelne Services des ISIS können aber auch über einen Request-Response Mechanismus gezielt abgefragt werden.

Des Weiteren wurde eine *Schichten-basierte Kommunikation* zur Aktivitätserkennung (Activity Pattern Recognition) vorgestellt, in der Sensorinformationen über mehrere Ebenen hinweg angereichert werden, bis schließlich eine regelbasierte Einheit Aktivitätsmuster des Bewohners erkennt, sodass Anpassungen der Umgebung durch Aktoren o.ä. erfolgen kann.

Anschließend wurde die *Wahl des Architekturmusters für den räumlichen Service* erörtert, indem verschiedene Muster verglichen wurden. Die Entscheidung zu einer Schichtenarchitektur ist damit begründet, dass die in der technischen Anforderung genannten Bereiche (Visualisierung, Kommunikation etc.) sich effektiv auf die Schichten abbilden lassen. Weitere Vorteile sind zudem, dass Teilsysteme durch die geringe Kopplung und die erforderliche Kapselung einfach in anderen Projekten wiederverwendbar sind.

Im Anschluss ist die *Architektur des räumlichen Services* detaillierter betrachtet worden. Hierzu wurde auf die Aufgabe und Funktionsweise der einzelnen Schichten bzw. Komponenten genauer eingegangen.

Es folgt eine knappe Zusammenfassung:

Logik Initialisierung, Lifecycle-Verwaltung und Finalisierung

Visualisierung 2D und 3D Visualisierung zur Verifikation von Analyseergebnissen und als optisches Feedback in der Wohnumgebung

Kommunikation Kommunikationsverwaltung, aufgeteilt in abstrakten Layer (Marshalling und Unmarshalling, Reconnect etc.) und konkreter Implementation der Dienste

Analyse & Modifikation Modifikationen und räumliche 2D/3D Analysen auf Basis des Gebäudemodells

Persistenz Verwaltung der Konfigurationseinstellungen und des Gebäudemodells (Kommunikation mit dem Produktmodellserver)

Daraufhin wurden die wichtigsten *Techniken, Tools und Bibliotheken*, sowie ihr Zusammenspiel im räumlichen Service vorgestellt. Hervorzuheben sind hier die *Open IFC Tools* der Bauhaus Universität Weimar für das interne Objektmodell, die *Spatial Query Language* der TU München für 3D Analysen und die *Java Topology Suite* für 2D Analysen. Zur Transformation der 3D in die 2D Repräsentation wurde ein eigenes Modul realisiert, das in diesem Kapitel in Grundzügen erläutert wurde.

In der *Architekturbewertung* konnte mit Hilfe der Analysesoftware *Sonargraph* die Einhaltung der Schichtenarchitektur im ISIS verifiziert werden. Es ist weiterhin die Zyklusfreiheit nachgewiesen worden. Durch Metrikanalysen waren außerdem keine Auffälligkeiten festzustellen.

Im Kapitel *Designentscheidungen* wurde, wiederum auf jede einzelne Schicht bezogen, die jeweilige Wahl der Softwarepattern erörtert. Hierzu zählt z.B. die Entscheidung in der Analyseschicht eine *Fassade* als zentrale Schnittstelle zu realisieren, was die Kopplung ins System verringert und die Verständlichkeit erhöht. Außerdem wurden *Observer* eingesetzt, um Änderungen am 2D und 3D Modell zu propagieren.

Als *Leistungsnachweis* des ISIS wurden zunächst *detaillierte Kommunikationsabläufe* einer räumlichen Serviceanfrage und der kontinuierlichen Analyse von Lokationsdaten dargestellt. Anschließend erfolgte der *Leistungsnachweis im Live-Betrieb*. Dieser orientierte sich am Datenaufkommen bei der Eröffnung des *Living Place Hamburg*. Bei einer ca. 45%igen Beteiligung am Nachrichtenvolumen mit mehr als 215.000 Nachrichten konnte kein Leistungseinbruch oder Fehlverhalten festgestellt werden.

Des Weiteren wird der *ISIS als Testumgebung* für kooperierende Projekte verwendet. Zusammen mit einem Lokationsmockup, das Bewegungspfade simuliert, ist somit ein komplettes Test-Toolkit vorhanden, um Anwendungen, die mit dem ISIS interagieren, lokal testen zu können.

6. Schluss

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine *Zusammenfassung* der wesentlichen Inhalte dieser Arbeit. In einer anschließenden *Bewertung* werden die Resultate mit Hinblick auf die in *Brumitt u. a. (2000)* formulierten Anforderungen beurteilt und rückblickend dargestellt, inwiefern die eingangs formulierten Zielstellungen erreicht wurden. Danach werden im *Ausblick* mögliche Erweiterungen des räumlichen Services erörtert, bevor letztlich ein *Schlusswort* diese Arbeit abrundet.

6.1. Zusammenfassung

Im wissenschaftlichen Kontext werden Anforderungen an *Smart Homes* durch weit mehr definiert, als die in kommerziellen Produkten gepriesene Gebäudeautomatisierung durch (fern-)steuerbare Komponenten suggeriert. Vielmehr wird Umgebungs- bzw. Kontextwissen („Context Awareness“) gefordert, das durch die komplexe Analyse und Kombination von Sensorwerten („Sensorfusion“) sowie regel- und modellbasierten Ansätzen entsteht. Darauf basierend können – so denn von den Bewohnern gewünscht – automatisiert Anpassungen der Wohnumgebung durch Klimasteuerung u.ä. erfolgen.

Diese Arbeit hat das Ziel ausgelobt, die Kontextinterpretation in Smart Homes durch einen *räumlichen Service (Indoor Spatial Information Service)* zu unterstützen, dessen geometrisches Wissen auf einem semantischen 3D Raummodell basiert. Eine grundlegende Ideenskizze hierzu lieferten bereits *Brumitt u. a. (2000)* im Kontext ubiquitärer Umgebungen. Aus ihrer Sicht könne ein „geometrisches Weltmodell“ exzellent zu den zwei ubiquitären Grundgedanken beitragen: es kann 1. die Erreichbarkeit von Computern für Personen erhöhen und 2. die Kenntnis von Softwareagenten über den Aufenthalt von Personen sicherstellen. Da *Brumitt u. a.* keine Lösung geboten haben, wurde schließlich nach wissenschaftlichen Arbeiten gesucht, die diese Ideen realisiert haben.

Ein Forschungsgebiet, in dem die Grundlagen zur Realisierung der von *Brumitt u. a.* formulierten Ideen gelegt wurden, ist das der *Indoor Location Awareness*. Im gleichnamigen Kapitel wurden zunächst die Begriffe *Context Awareness (CA)* und *Location Awareness (LA)* erläutert. Anschließend wurden die gängigen Lokationstechnologien vorgestellt, die für LA unabdingbar sind. Die Betrachtung der von *Leonhardt* sowie *Becker und Dürr* formulierten

Anforderungen an LA Systeme (Middleware für Sensoren und Applikationen, Datenschutz und ein *Location Model*), verdeutlichte, dass die Modellierung von Ortsinformationen in Form eines *Location Model* (LM) essentiell ist. Hier identifizierte [Leonhardt \(1998\)](#) zwei grundlegende Modellarten: symbolische und geometrische Modelle, deren Unterschiede in ihrer jeweiligen Ausdrucksstärke liegen. So werden räumliche Analysen besser von geometrischen Modellen unterstützt, wohingegen symbolische Modelle geeigneter für Navigationsaufgaben sind. Hybride Modelle sind geeignet, um möglichst viele Problemstellungen zu lösen, aber mit doppeltem Modellierungsaufwand verbunden. Hier stellte sich die Frage, ob sich semantische 3D Gebäudemodelle als hybrides *Location Model* eignen würden.

Um diese Frage zu beantworten und weiterhin zu klären, welche Einsatzmöglichkeiten 3D Modelle über die im Bereich der Indoor Location Awareness hinaus bieten, wurden daraufhin Arbeiten untersucht, die dreidimensionale Gebäudemodelle in intelligenten Umgebungen einsetzen. Hier sind diverse Projekte in den Bereichen Visualisierung, Simulationen und Mensch-Maschine-Schnittstelle zu finden. Bis auf die Arbeiten von [Hossain u. a. \(2011\)](#), die eine Synchronisation zwischen realer Welt und virtuellem Modell realisiert haben, wird jedoch von keinem Projekt der Anforderungskatalog von Brumitt erfüllt. Auch setzt keines dieser Projekte ein semantisches 3D Datenmodell ein.

Die Vorteile dieser Modelle liegt u.a. in einer Fülle semantischer, geometrieunabhängiger Informationen, einem objektorientierten Zugriff auf die Entitäten (Fenster, Türen etc.) und standardkonformer Erweiterungsmöglichkeiten. Außerdem erhöht die Verwendung semantischer Modelle die *Interoperabilität* und vereinfacht die *Portierbarkeit* in neue Umgebungen. Als Modellierungsstandards wurden hierzu CityGML (GIS) und IFC (BIM) detaillierter betrachtet. Es handelt sich hierbei um generische Modelle, die nur in Richtung einzelner Fachdomänen Spezialisierungen aufweisen. Domänenspezifische Erweiterungen können jedoch durch ein Attributierungsmodell oder Unterklassenbildung (nur CityGML) realisiert werden. Um die Ideen von [Brumitt u. a.](#) umzusetzen, sind weiterhin *räumliche Analysen* der Gebäudemodelle erforderlich. Die Recherche verwandter Arbeiten hat deutlich gemacht, dass in der 2D Analyse die Anforderungen seit einigen Jahren erfüllt werden, jedoch derzeit in der dritten Dimension Forschungsbedarf besteht. Hier kann auf Arbeiten der Forschungsgruppe um [Borrmann u. a.](#) zurückgegriffen werden, die metrische, topologische und direktionale 3D Operatoren realisiert hat.

Anschließend wurde betrachtet, welche Relationen in 2D und 3D existieren, ob und wie sie sich unterscheiden und welche Formalismen sich zur Beschreibung eignen, um diese als Repräsentationsform zwischen Subsystemen einzusetzen. Außerdem wurde ein Exkurs in die menschliche Raumwahrnehmung gemacht, die sich auf unterschiedliche Referenzsysteme, Fuzzyness und Naive GIS konzentrierte.

Letztlich sind erweiterte Modelle zur Kontextinterpretation betrachtet worden. *Spatial Artefacts* von [Bhatt u. a. \(2009\)](#) annotieren Entitäten einer Wohnumgebung mit nicht-physischen Volumina, um z.B. Sensorbereiche abzudecken. Von [Choi u. a. \(2008\)](#) wurde das auf IFC

aufbauende *Ubiquitous Space Information Model* (USIM) entwickelt, das die Anforderungen ubiquitärer Umgebungen abdecken soll.

In der darauffolgenden *Analyse* wurden zunächst einige *Szenarien* vorgestellt, die in sechs Unterkategorien untergliedert sind. Hierzu zählen z.B. Szenarien, bei denen die Bewohnerin „Sal“ (angelehnt an Weiser (1991)) mittels *multimodaler Interaktion* die Wohnumgebung steuert. Zu dieser Form der *direkten* Interaktion – ausgehend von der Bewohnerin – zählt ebenfalls die *räumliche Suche*, bei der auf eine Suchanfrage eine natürlichsprachliche Antwort des Fundortes formuliert wird. Die Szenarien der *Location Based Media* sind eine Realisierung der Idee von Brumitt u. a. (2000), wonach eine „interaktive Session“ (z.B. eine Videokonferenz) der Bewohner beim Wechseln von Räumen aufrecht erhalten wird. Weiterführender ist das Szenario der *Activity Pattern Recognition*, in dem mittels Sensorfusion über mehrere Schichten hinweg Aktivitätsmuster erkannt werden, sodass daraufhin entsprechende Adaptionen stattfinden können.

Die *Anforderungsanalyse* betrachtete die Gemeinsamkeiten der Szenarien mit Hinblick auf das Design und die Realisierung des räumlichen Services. Als Voraussetzung aller Szenarien wurde zunächst die *Konsistenzwahrung zwischen virtuellem Modell und Realität* erkannt – nur wenn das Modell die Realität möglichst exakt widerspiegelt, können Analysen sinnvolle Ergebnisse liefern. Die räumlichen Analysen sind wiederum aufgeteilt in die *kontinuierliche Aufenthaltsanalyse zur Anreicherung des räumlichen Kontextes* und die *Analyse räumlicher Relationen durch Serviceanfragen*. Schließlich wurden die expliziten technischen Anforderungen betrachtet. Diese unterteilen sich in die Aspekte *Kommunikation* innerhalb des Systemumfeldes, die *Visualisierung* zur Verifikation von Analyseergebnissen und als optisches Feedback über den momentanen Zustand, *Persistenz* zur Verwaltung des Gebäudemodells sowie *Analyse und Modifikation* für Änderungen an und Abfragen auf das Gebäudemodell.

Im darauffolgenden *Designkapitel* wurden das Softwaredesign sowie ausgewählte Details der Realisierung betrachtet und schließlich ein Leistungsnachweis des räumlichen Services erbracht. Die Realisierung ist hierbei exemplarisch im *Living Place Hamburg* vorgenommen worden.

Zunächst wurde die Einbindung des räumlichen Services, dem *Indoor Spatial Information Service* (ISIS), in die Blackboard-basierte Kommunikationsinfrastruktur der intelligenten Wohnumgebung dargestellt. Daraufhin ist die Wahl des Architekturmodells des ISIS – eine schichtenbasierte Architektur – begründet und die Funktionsweise und Aufgabe jeder Schicht erläutert worden. Die Schichtenarchitektur ist insbesondere aufgrund der erforderlichen Kapselung der Teilsysteme geeignet, da hierdurch eine einfache Wiederverwendbarkeit der Komponenten in anderen Projekten möglich ist. Eine Verifikation der Architektur wurde schließlich durch das Tool *Sonargraph* vorgenommen, wodurch gezeigt werden konnte, dass der schichtenbedingte Zugriff von „oben nach unten“ eingehalten wurde.

Anschließend wurden wichtige Designpattern der einzelnen Schichten vorgestellt. So ist u.a. der Zugriff auf das Analyse & Modifikationsmodul über eine einfache Fassadenschnittstelle

möglich und durch das *Observer*-Pattern werden Interessenten über Änderungen am Modell unterrichtet.

Der Leistungsnachweis des ISIS erfolgte in drei Schritten. Zunächst sind detaillierte Kommunikations- und Analyseabläufe anhand zweier Szenarien aufgezeigt worden. Anschließend wurde der Einsatz im Live-Betrieb bei der Eröffnung des *Living Place Hamburg* analysiert. Hier konnte gezeigt werden, dass ISIS bei einem ca. 45%igen Anteil am Gesamtnachrichtenvolumen mit mehr als 215.000 Nachrichten keine Leistungseinbrüche zu verzeichnen hatte. Außerdem wird ISIS in mehreren kooperierenden Projekten als Testumgebung eingesetzt – zusammen mit einem Mockup zum lokalen Simulieren des Aufenthalts der Bewohner ist damit ein komplettes Test-Toolkit vorhanden.

6.2. Bewertung

Der in dieser Arbeit entwickelte *räumliche Service* verbindet bestehende und noch in der Entwicklung befindliche Komponenten zu einer neuen Einheit für *Context*- und *Location-aware* Umgebungen. Hierbei wurden viele der in [Brumitt u. a. \(2000\)](#) formulierten Ideen und Anforderungen realisiert und darüber hinaus weitere Anwendungsfelder geschaffen.

[Brumitt u. a.](#) veranschaulichten anhand zweier essentieller Fähigkeiten ubiquitärer Systeme, dass „geometrische Weltmodelle“ von immensem Nutzen sind. Im Folgenden werden diese Aspekte in Bezug auf den in dieser Arbeit entwickelten räumlichen Service veranschaulicht:

- 1. Casual Access to Computing** *Dieser Aspekt beschreibt zwei fundamentale Eigenschaften ubiquitärer Systeme ([Brumitt u. a. \(2000\)](#)): Computer sollten stets durch multimodale Interaktionsmöglichkeiten erreichbar und in der Lage sein, der betreffenden Person über unterschiedliche mediale Kanäle Informationen zu übermitteln. Ein geometrisches Modell kann hierzu insofern behilflich sein, als dass es die Entscheidung, welche Geräte in der Nähe einer Person am sinnvollsten einzusetzen sind, durch die Kenntnis über den physischen Raum, inklusive der Geräte und der Bewohner, fundiert treffen kann.*

Im ISIS werden hierzu Objekte eines semantischen 3D Gebäudemodells mit *Spatial Artefacts* von [Bhatt u. a. \(2009\)](#) (vgl. Kap. 3.4.1) annotiert. Ursprünglich wurden diese räumlichen Annotationen dazu verwendet, im Bauwesen statische Gebäudemodelle bereits vor der Bauausführung automatisch zu validieren. Im ISIS werden sie auf eine neue Weise im Sinne einer *kontinuierlichen Aufenthaltsanalyse* der Bewohner eingesetzt, um Aktivitäten und Interaktion durch lokales Kontextwissen auf Basis der *Spatial Artefacts* und des Aufenthalts der Bewohner anzureichern. Der räumliche Service stellt diese semantisch angereicherten Positionsinformationen (bzw. *Symbolic Locations*) in Form eines *Spatial Context Providers* Softwareagenten zur Verfügung.

Hierdurch werden die Verantwortlichkeiten von Interaktionsentscheidungen dezentralisiert, sodass andere Agenten entscheiden können mit welchen Medien eine Interaktionsanfrage durchgeführt wird. Dadurch skaliert zum einen das Gesamtsystem sehr gut und zum anderen verringert es die Komplexität des räumlichen Services.

2. Extensible Computing *Ähnlich dem Plug and Play Konzept soll sich eine intelligente Umgebung automatisiert neu eingebrachter Hardware bedienen. Hier unterscheiden Brumitt et. al. zwischen „Resource Extensibility“ und „Physical Extensibility“. Ersterer beschreibt die automatische Erweiterung der Fähigkeiten der Umgebung durch neu eingebrachte Hardware (z.B. ein Touchscreen). Die Physical Extensibility beschreibt die räumliche Relation bzw. Lage des neuen Gegenstandes im physischen Umfeld. Durch die Kenntnis über die zu einer Person naheliegenden interaktionsfähigen Geräte kann die Komplexität an möglichen Gerätekombinationen zur Vollendung einer Interaktionsaufgabe begrenzt werden.*

Der *Plug and Play*-Mechanismus wurde innerhalb der Analyse im Kapitel [Konsistenzwahrung zwischen virtuellem Modell und Realität](#) beschrieben. Zur Umsetzung dieses Konzeptes wurden Ideen formuliert, die jedoch aufgrund des Aufwandes nicht final realisiert wurden. Als weiterführende Anforderungen wurden die Orts- und Zustandskonsistenz formuliert und umgesetzt. Bei ersterer wird der *Aufenthalt* der realen Gegenstände mit ihren digitalen Pendants gekoppelt. Bei der Zustandskonsistenz werden ausgewählte Eigenschaften (z.B. offen/geschlossen) mit den digitalen Entitäten synchronisiert.

Als einen weiteren, wichtigen Vorteil geometrischer Modelle sehen [Brumitt u. a. \(2000\)](#) ihre Eigenschaft als *Sensor Abstraction Layer*. D.h. unabhängig davon, welche Systeme zur Ortung der Bewohner eingesetzt werden (kapazitive-, Ultrabreitbandsensoren oder Kippschalter an Türen und Fenstern, Image Recognition bzw. eine Kombination aus mehreren Sensoren zur Präzisionssteigerung), können Anwendungen über das geometrische Modell auf eine einheitliche Schnittstelle zugreifen.

Diese Eigenschaft ist auch dem in dieser Arbeit entwickelten räumlichen Service immanent und für viele Anwendungen in der realen Wohnumgebung *Living Place* bereits jetzt von Nutzen. Durch räumliche Analysen basierend auf einem geometrischen Weltmodell werden *Symbolic Locations* bzw. SAPs abgeleitet. Im Gegensatz zu vielen Arbeiten, die hierzu ein symbolisches *Location Model* in Kombination mit Proximity Sensoren verwenden, ist der hier vorgestellte räumliche Service *unabhängig* von der Art der Lokationstechnologie.

Derzeit ist das Tragen von *Tags* zur Ortung und Identifikation notwendig, was den UbiComp-Gedanken Mark Weisers der *disappearing computer* widerspricht. Da jedoch der räumliche Service eine Abstraktionsschicht der Ortungssensoren darstellt, können künftige Weiterentwicklungen integriert werden, ohne dass Agenten, die die Dienste des ISIS nutzen, angepasst werden müssen.

Worauf [Brumitt u. a. \(2000\)](#) in ihrer Ideenskizze nicht eingehen, ist sowohl das *Raummodell* selbst als auch die *räumliche Analyse*, die erforderlich ist, um die Mensch-Maschine-Interaktion zu verbessern. Beide Voraussetzungen wurden in dieser Arbeit auf dem Stand der aktuellen Forschung erfüllt.

Im Gegensatz zu vielen verwandten Arbeiten, die sich auf Graphen- oder proprietäre 2D Repräsentationen beschränken, wurde in dieser Arbeit ein semantisches, hochdetailliertes 3D Modell aus dem Bauwesen als Grundlage des räumlichen Services verwendet und den Ansprüchen intelligenter Umgebungen entsprechend erweitert. Zur Verwaltung wird ein zentraler Produktmodellserver eingesetzt, der die Interoperabilität mit Modellierungstools und Softwareagenten sicherstellt.

Die Analysefähigkeiten des räumlichen Services teilen sich in 2D und 3D Analysen auf. Zur performanten 2D Analyse werden robuste Bibliotheken aus dem GIS-Bereich verwendet. Für 3D Analysen (z.B. für Suchanfragen) wird auf ein aktuelles Forschungsprojekt der TU München aus dem Bauwesen zurückgegriffen. Anzumerken ist, dass derzeit 3D Analysen im Bauwesen und GIS-Bereich zum aktuellen Forschungsgebiet gehören und noch keine kommerziellen SDBMS verfügbar sind.

Insofern bewegt sich der in dieser Arbeit entwickelte räumliche Service im aktuellen Forschungsgeschehen und verbindet die Vorzüge beider Welten – 2D GIS und 3D BIM – in Bezug auf ihr semantisches Modell und die geometrische Analyse.

Die Wahl aktueller semantischer Standards zur Verwendung als *Location Model* bringt jedoch auch Nachteile mit sich. Sie sind konzipiert, um den größten gemeinsamen Nenner aller Fachdomänen abzubilden. Insofern sind die aktuellen Standards wie IFC oder CityGML zu generisch für eine fachspezifische Domäne wie die der *Smart Homes*. Daher sind entsprechende Erweiterungen zu schaffen, die die spezifischen Anforderungen umsetzen. Die derzeitige pragmatische Lösung unter Verwendung des IFC Attributierungsmodells sollte langfristig durch ein umfassenderes Modell ersetzt werden, wie es z.B. von [Choi u. a. \(2008\)](#) im *Ubiquitous Space Information Model* realisiert wurde.

Ebenfalls nicht verschwiegen werden darf der Nachteil einer geometriegebundenen Lösung im Gegensatz zu modell-unabhängigen und symbolischen Ansätzen: ist ein hochdetailliertes Gebäudemodell nicht bereits vorhanden, muss mit einem sehr hohen Modellierungsaufwand gerechnet werden. Dies haben auch [Brumitt u. a. \(2000\)](#) erkannt, setzen aber die Vorteile dagegen:

„While geometric knowledge remains challenging to gather, represent, and provide, its inclusion will significantly improve the performance and speed the acceptance of ubiquitous computing systems.“ – [Brumitt u. a. \(2000\)](#)

[Becker und Dürr \(2005\)](#) haben den Modellierungsaufwand geometrischer und symbolischer Modelle (der sich bei hybriden Modellen gar *verdoppelt*) als ein sehr wichtiges Kriterium bei

der Wahl eines Location Models formuliert. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass semantische Gebäudemodelle die Vorteile geometrischer und symbolischer Modelle vereinen und sich daher sehr gut als Basis eines Location Model eignen. Der hohe Modellierungsaufwand wird aufgrund der zunehmenden Verbreitung semantischer Standards im Bauwesen in absehbarer Zeit minimiert. Daher können zukünftig *räumliche Services* ohne erheblichen Aufwand in *Smart Homes* integriert werden.

Weiterhin wurde gezeigt, dass aufgrund der dreidimensionalen Modellierung neuartige, räumliche Serviceanfragen möglich sind, die bislang keine Beachtung im Bereich der *Indoor Location Awareness* gefunden haben. So bietet die dritte Dimension z.B. für die *räumliche Suche* oder die *Gesten-basierte Steuerung* ein weitaus angemesseneres Abbild der Realität, als bei den üblichen zweidimensionalen Modellen.

Da *Smart Homes* konzeptionell zu den *Smart Spaces* bzw. *Smart Environments* gehören, die wiederum ein Anwendungsfeld der *Ambient Intelligence* bilden (Augusto (2007), Cook u. a. (2009)), lassen sich die hier erarbeiteten Konzepte auf diese Gebiete generalisieren. Außerdem werden Gebäudemodell-basierte Services – wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wurden – nicht nur auf die Wohnkomfortsteigerung begrenzt bleiben, sondern sich auch auf andere *Smart Home* und *Smart Building* Bereiche, wie die Sicherheit, Energieeffizienz sowie Ambient Assisted Living ausweiten.

Es konnte gezeigt und begründet werden, dass die räumliche 2D und 3D Analyse auf Basis eines standardisierten, semantischen Raummodells von Nutzen für eine Vielzahl an Forschungsschwerpunkten ist. Dafür spricht auch, dass von der Realisierung des räumlichen Services im Living Place Hamburg in Form des *Indoor Spatial Information Services* diverse Kooperationsprojekte profitieren (vgl. Kap. 5.6). Außerdem ermöglicht die modulare Architektur die Weiterverwendung der realisierten Komponenten in neuen Anwendungsbereichen (z.B. zur Ortungsverbesserung, vgl. Meyer (2012) und Möhlmann (2012)).

Es folgt ein Ausblick möglicher zukünftiger Erweiterungen des ISIS sowie ein kurzes Schlusswort zu den Ergebnissen dieser Arbeit.

6.3. Ausblick

In diesem Kapitel werden Erweiterungen des räumlichen Services sowie potentielle Einsatzmöglichkeiten in anderen Forschungsgebieten besprochen. Im Fokus dieses Ausblicks steht eine Erweiterung der räumlichen Analyse durch verschiedene Aspekte menschlicher Raumwahrnehmung (Raumkognition).

Zunächst werden mögliche Weiterentwicklungen des räumlichen Services kurz diskutiert. Einige sind in dieser Arbeit bereits erwähnt worden, sollen hier aber noch einmal explizit aufgeführt werden:

Plug 'n' Play von Objekten Der bei [Brumitt u. a. \(2000\)](#) unter der Bezeichnung *Extensible Computing* beschriebene Mechanismus zum automatischen Hinzufügen und Entfernen von Objekten des digitalen Gebäudemodells ist eine wichtige Voraussetzung die *Konsistenzwahrung* zu garantieren und eine nahtlose Interaktion der Gegenstände zu gewährleisten.

Erweiterung des semantischen Modells Da die derzeitigen semantischen Standards sehr generisch gehalten sind, ist eine Erweiterung des Modells durch ubiquitäre Eigenschaften (vgl. USIM Modell von [Choi u. a. \(2008\)](#)) vorzunehmen mit dem Ziel, die Vielfalt ubiquitärer Umgebungen besser abzubilden. Hierzu zählt z.B. die Modellierung von Sensoren, Aktoren, mobilen Objekten und Diensten.

Datenschutz Dieser Aspekt wird von [Leonhardt \(1998\)](#) als eine von drei Anforderungen an *Location-aware* Applikationen gestellt und im räumlichen Service bislang nur geringfügig umgesetzt (z.B. werden derzeit keine Ortsinformationen bei Räumen, die als „privat“ gekennzeichnet sind, übermittelt).

3D Analysefähigkeiten Die *kontinuierliche Aufenthaltsanalyse* findet derzeit aus Performanzgründen in 2D statt. Hier wäre eine Realisierung der räumlichen Analyse inklusive der *Spatial Artefacts* in drei Dimensionen ratsam.

Navigation In Kap. 2.2 wurde von [Becker und Dürr \(2005\)](#) gefordert, dass ein Location Model zur Routenplanung befähigt sein müsse. Hierzu bedürfe es einer geometrischen (z.B. Straßenführung) und topologischen Repräsentation („connectedTo“ Richtungsassoziation zw. Straßen). Da im semantischen IFC Modell diese Informationen bereits enthalten sind, wäre diese Anforderung ohne aufwändige Erweiterungen realisierbar.

Der Einsatz eines räumlichen Services, wie er in dieser Arbeit mit dem ISIS vorgestellt wurde, bietet sich auch in anderen Forschungsbereich an, die im Folgenden vorgestellt werden:

Verbesserung von Lokalisationsverfahren Eine genaue Indoorlokalisierung spielt in der *Location Awareness* eine entscheidende Rolle. Es ist ratsam das räumliche Wissen eines digitalen Modells zu nutzen, um die Präzision dieser Systeme zu erhöhen. Ein räumlicher Service kann bspw. mögliche und auch *unmögliche* Bewegungspfade erkennen und den Einfluss der Beschaffenheit von Wänden auf die Positionsdetektion verdeutlichen. Zwei Arbeiten auf Basis des ISIS mit ähnlichen Methoden sind z.B. [Meyer \(2012\)](#) und [Möhlmann \(2012\)](#).

Selbstlokalisierung mobiler Roboter Mobile, autonom agierende Agenten stehen oftmals aufgrund von Bodenunebenheiten, Radschlupf etc. vor dem Problem ihren Aufenthaltsort nicht genau zu kennen (vgl. [Weber \(2002\)](#)). Die Kenntnisse über die räumliche Struktur eines Gebäudes, z.B. in Verbindung mit *Image Recognition*, könnten zur Rekalibrierung der Position dieser Agenten dienen.

Einbezug der menschlichen Raumwahrnehmung im räumlichen Service

Ein mutmaßlich erstrebenswerter Aspekt eines räumlichen Services ist der Einbezug menschlicher Raumwahrnehmung in die räumliche Analyse. Dieser Aspekt wurde zwar bereits in der [Analyse](#) angesprochen, konnte aber aufgrund der Komplexität nicht final realisiert werden. Im Folgenden werden daher einige der wesentlichen Eigenschaften menschlicher Raumwahrnehmung in Bezug auf den räumlichen Service anhand einer kurzen Anforderungsanalyse vorgestellt.

Qualitative anstatt quantitativer Maße

[Egenhofer und Marks](#) Forderung an GIS, sich durch Verwendung *qualitativer* Modelle (Abstraktion von quantitativen Details) der menschlichen Wahrnehmung zu nähern (vgl. Kap. [3.3.3](#)), kann auch auf den räumlichen Service ausgeweitet werden.

Beispielsweise ist es gängiger den Aufenthalt eines Gegenstands als „in der Nähe von“ einem anderen zu betrachten, als dass eine genaue Distanz wie „in 3,5m Entfernung“ angegeben wird. [Hudelot u. a. \(2008\)](#) und [Yao und Thill \(2006\)](#) stellen hier weiterhin fest, dass die Semantik von „in der Nähe“ und ähnlichen Abstandsmaßen vom Kontext der Bezugsobjekte, ihrer Größe und Umgebung abhängt – wie die Raumkognition dieser Begebenheiten in eine maschinenverständliche Form überführt werden kann, ist noch zu erörtern. Es ist zu erwarten, dass ein Verständnis dieser Aspekte der Raumwahrnehmung angemessenere Ergebnisse der Szenarien „*räumliche Suche*“ oder „*Activity Pattern Recognition*“ erbringen kann.

Feingranulare Operatoren

Die nicht allzu feingranulare Betrachtung direktionaler Operatoren (darüber, östlich, westlich etc.) bei der Abfragesprache von [Borrmann u. a.](#) ist ein Aspekt, der einer menschlichsprachlichen Beschreibung räumlicher Relationen entgegensteht. Ein Objekt befindet sich hier z.B. in Beziehung zu einem Referenzobjekt aufgrund der Koordinatenachsen-getrennten Betrachtung bspw. nicht *nordnordöstlich*, sondern *nördlich und östlich* (vgl. [Borrmann u. a. \(2006\)](#) S. 108).

Um eine dem menschlichen Denken angenäherte, direktionale Ortsangabe liefern zu können, ist jedoch eine feingranuläre Differenzierung notwendig. Im Kapitel der vergleichbaren Arbeiten über *Fuzzyness* stellt [Hudelot u. a. \(2008\)](#) so denn einen Mechanismus vor, um die präzisen direktionalen Angaben durch eine Fuzzylogik „aufzuweichen“, um sie dem menschlichen Verständnis näher zu bringen – z.B. ist hier „rechts von“ kein klar definierter



Abb. 6.1.: Welcher Bereich ist *rechts* von dem Quadrat? (Quelle: [Hudelot u. a. \(2008\)](#))

Bereich auf der Y-Achse, sondern wird mit einem fließenden Maß beginnend bei „sehr unsicher rechts“ bis „genau rechts von“ angegeben (s. Abb. 6.1).

Auch bei der Wahl des nächstgelegenen Lautsprechers für eine akustische Ausgabe ist diese Betrachtungsweise sinnvoll, da die Lautstärke mit Abstand zur Quelle abnimmt und durch Wände zusätzlich vermindert wird.

Selektierbarer Referenzrahmen

Bei der menschlichsprachlichen Beschreibung räumlicher Relationen wird oftmals von einem *deiktischen* Referenzrahmen ausgegangen (vgl. [Wunderlich \(1985\)](#)). Als Beispiel soll folgender Satz dienen: „Das Radiergummi liegt rechts neben dem Tisch vor dir.“ Der suchenden Person wird hier eine *lokaldeiktische* Angabe über den Aufenthaltsort des verlorenen Gegenstandes geliefert. Das Referenzsystem basiert dabei auf der Ausrichtung der suchenden Person – dementsprechend wurden die direktionalen Begriffe „rechts neben“ und „vor dir“ entsprechend des Bezugsrahmens verwendet. [John und Freeman \(1975\)](#) formulieren hierzu:

„People refer to the locations of objects positively, where upward and forward from the observer are positive directions.“ – [John und Freeman \(1975\)](#)

Bei Verwendung der räumlichen Operatoren sollte also eine *Wahl des Referenzrahmens* ermöglicht werden. Da sich dieser nicht auf die topologischen und metrischen Operatoren auswirkt (vgl. [Deixis und Referenzsysteme](#)), müssen lediglich die direktionalen Operatoren entsprechend angepasst werden. Die Angabe zur aktuellen Ausrichtung des Referenzrahmens (z.B. Blickrichtung einer Person) ist jedoch nicht vom räumlichen Service zu leisten, sondern muss durch ein externes System geschehen.

Filterung prominenter Objekte

Insbesondere beim Szenario der *räumlichen Suche* ist die vom räumlichen Service zurückgegebene Menge an Relationen zur Beschreibung des Fundortes auf ein angemessenes

Maß zu begrenzen. Ein Beispiel einer *wenig sinnvollen* Beschreibung könnte lauten: „Der Schlüssel befindet sich im Schlafzimmer auf dem Nachttischschrank in der Nähe der Nachttischlampe, die sich auf dem Nachttisch befindet, welcher sich neben dem Bett befindet, das auf dem Teppich steht...“. [John und Freeman \(1975\)](#) stellen hierzu einschränkend klar:

„If one object in a picture is perceptually prominent, it will be the reference point in any relations involving it.“
– [John und Freeman \(1975\)](#)

Es stellt sich demzufolge die Frage: Durch welche Merkmale zeichnet sich ein *prominentes* Objekt aus? Welche räumlichen Relationen sind relevant für die natürlichsprachliche Beschreibung eines Fundortes?

Mit der Problemstellung der *automatisierten* Detektion prominenter Objekte in den Bereichen Medizin, Fotografie, Machine Vision usw. befassen sich Forschungsprojekte seit mehreren Jahrzehnten. Die hierzu betrachteten Aspekte beziehen sich, wie von [Kutics und Nakagawa \(2005\)](#) dargestellt, meistens auf die Farb- und Textureigenschaften eines Bildes. Da dem räumlichen Service jedoch keine Farb- und Textur-, sondern ausschließlich (attributierte) Geometrieinformationen vorliegen, müsste hier ein anderer Weg gegangen werden. Eine mögliche Herangehensweise ist die vorab Definition prominenter Objekte in Form von *Landmarken* bzw. *Objects of Interest* – eine automatische Extraktion könnte somit umgangen werden.

Umgang mit Ungenauigkeiten der Aufenthaltsinformationen – Fuzzy Spatial Artefacts

Dem hochpräzisen Gebäudemodell stehen Raumkoordinaten des eingesetzten Lokalisierungssystems gegenüber, dessen Genauigkeit derzeit bestenfalls im Dezimeterbereich liegt und je nach eingesetzter Technologie (UWB, kapazitive Sensoren, optische Systeme etc.) nicht homogen über den Raum verteilt ist (z.B. können Wände und wasserhaltige Körper das Resultat von UWB Sensoren in bestimmten Arealen negativ beeinflussen).

Außerdem sind die räumlichen Ausmaße der *Spatial Artefacts* i.A. nicht präzise zu bestimmen. Im Falle der *Functional Spaces* sind z.B. die Interaktionsräume von Person zu Person (z.B. aufgrund unterschiedlicher Armlängen) verschieden. Ebenso ist der *Range Space* eines Lautsprechers oder eines Bildschirms nicht klar umrissen und je nach Aufenthaltsort von unterschiedlicher Qualität.

Von daher sind die Ungenauigkeiten im Lokalisationssystem und die fehlende Präzision der *Spatial Artefacts* im räumlichen Service adäquat zu behandeln. Im Papier von [Behr und Gutting \(2005\)](#) vorgestellt in Kap. 3.3.3 (*Fuzzyness*) wurde ein Ansatz vorgestellt, topologische Ungenauigkeiten mit Hilfe von „Fuzzy Spatial Objects“ zu realisieren. Hier sollte untersucht

werden, inwieweit dieser Ansatz auf die Spatial Artefacts angewandt werden kann. Ziel dieser Untersuchung ist die Bewältigung der Ungenauigkeiten im Lokalisationssystem durch **Fuzzy Spatial Artefacts**. Hierzu ist nach Zadeh (1965) eine Zugehörigkeitsfunktion zu formulieren, die im Bereich von 0 („nicht zugehörig“) bis 1 („zugehörig“) die Zugehörigkeit einer absoluten Ortskoordinate zu einem *Spatial Artefact* angibt.

Schlusswort

Mit dieser Arbeit wurde das wissenschaftliche Feld der *Indoor Location Awareness* um neue Ideen auf dem aktuellen Stand der Forschung erweitert. Hierzu zählt insbesondere der Einsatz dreidimensionaler, semantischer Gebäudemodelle als Basis des hier realisierten hybriden *Location Models* sowie die Realisierung neuartiger räumlicher Services basierend auf geometrischen, dreidimensionalen Analysen.

Der räumliche Service wurde in Form des *Indoor Spatial Information Services* als offenes und für künftige Entwicklungen erweiterbares System in den *Living Place Hamburg* integriert. Schon jetzt profitieren zahlreiche projektinterner Entwicklungen von den Fähigkeiten des Indoor Spatial Information Services – einige weitere sind in Planung.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass der hier vorgestellte Service einen wichtigen Beitrag leisten kann, einer anspruchsvollen Vision ubiquitärer Systeme näher zu kommen:

„(...) *the environment itself becomes the user interface.*“

– *Addlesee u. a. (2001)*

Literaturverzeichnis

- [Abdat u. a. 2010] ABDAT, M. ; WAN, Tat-Chee ; SUPRAMANIAM, S.: Survey on indoor wireless positioning techniques: Towards adaptive systems. In: *Distributed Framework and Applications (DFmA), 2010 International Conference on*, aug. 2010, S. 1–5
- [Abowd u. a. 1999] ABOWD, Gregory ; DEY, Anind ; BROWN, Peter ; DAVIES, Nigel ; SMITH, Mark ; STEGGLES, Pete: Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness. In: GELLERSEN, Hans-W. (Hrsg.): *Handheld and Ubiquitous Computing* Bd. 1707. Springer Berlin / Heidelberg, 1999, S. 304–307. – ISBN 978-3-540-66550-2
- [Addlesee u. a. 2001] ADDLESEE, M. ; CURWEN, R. ; HODGES, S. ; NEWMAN, J. ; STEGGLES, P. ; WARD, A. ; HOPPER, A.: Implementing a sentient computing system. In: *Computer* 34 (2001), aug, Nr. 8, S. 50–56. – ISSN 0018-9162
- [Allen 1983] ALLEN, James F.: Maintaining knowledge about temporal intervals. In: *Commun. ACM* 26 (1983), November, S. 832–843. – ISSN 0001-0782
- [Andre u. a. 1986] ANDRE, E. ; BOSCH, G. ; HERZOG, G. ; RIST, T.: Coping with the intrinsic and deictic uses of spatial prepositions. In: *Artificial Intelligence II: Methodology, Systems, Applications* (1986), S. 375–382
- [Augusto 2007] AUGUSTO, J.C.: Ambient intelligence: the confluence of ubiquitous/pervasive computing and artificial intelligence. In: *Intelligent Computing Everywhere* (2007), S. 213–234
- [Bardram und Hansen 2004] BARDRAM, Jakob E. ; HANSEN, Thomas R.: The AWARE architecture: supporting context-mediated social awareness in mobile cooperation. In: *Proceedings of the 2004 ACM conference on Computer supported cooperative work*. New York, NY, USA : ACM, 2004 (CSCW '04), S. 192–201. – ISBN 1-58113-810-5
- [Bartelme 2005] BARTELME, Norbert: *Geoinformatik: Modelle, Strukturen, Funktionen*. 4. Springer Verlag, 2005
- [Barton und Vijayaraghavan 2002] BARTON, J. ; VIJAYARAGHAVAN, V.: Ubiwise, a ubiquitous wireless infrastructure simulation environment. In: *HP Labs* (2002)

- [Becker und Dürr 2005] BECKER, Christian ; DÜRR, Frank: On location models for ubiquitous computing. In: *Personal and Ubiquitous Computing* 9 (2005), S. 20–31. – 10.1007/s00779-004-0270-2. – ISSN 1617-4909
- [Becker u. a. 2009] BECKER, Thomas ; NAGEL, Claus ; KOLBE, Thomas H.: A Multilayered Space-Event Model for Navigation in Indoor Spaces. In: LEE, Jiyeong (Hrsg.) ; ZLATANOVA, Sisi (Hrsg.) ; CARTWRIGHT, William (Hrsg.) ; GARTNER, Georg (Hrsg.) ; MENG, Liqiu (Hrsg.) ; PETERSON, Michael P. (Hrsg.): *3D Geo-Information Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 2009 (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography), S. 61–77. – ISBN 978-3-540-87395-2
- [Behr und Guting 2005] BEHR, T. ; GUTING, R.H.: Fuzzy spatial objects: An algebra implementation in SECONDO. In: *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA ENGINEERING* Bd. 21 IEEE Computer Society Press; 1998 (Veranst.), 2005, S. 1137
- [Bhatt u. a. 2009] BHATT, M. ; DYLLA, F. ; HOIS, J.: Spatio-terminological inference for the design of ambient environments. In: *Conference on Spatial Information Theory (COSIT 09)* Springer-Verlag (2009), S. 371–391
- [Blumendorf u. a. 2008] BLUMENDORF, M. ; FEUERSTACK, S. ; ALBAYRAK, S.: Multimodal smart home user interfaces. In: *Proc. of IUI4AAL Workshop on IUI, 2008*
- [Bornemann 2011] BORNEMANN, Sven B.: *Android-basierte Smart Home Interaktion am Beispiel einer Gegensprechanlage*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorarbeit, 2011
- [Borodulkin u. a. 2002a] BORODULKIN, L. ; RUSER, H. ; TRANKLER, H.-R.: 3D virtual smart home user interface. In: *Virtual and Intelligent Measurement Systems, 2002. VIMS '02. 2002 IEEE International Symposium on*, 2002, S. 111 – 115
- [Borodulkin u. a. 2002b] BORODULKIN, L. ; RUSER, H. ; TRANKLER, H.-R.: Smart Home 3D User Interface. Man-Machine Interaction with Object Oriented Approach. In: *Virtual and Intelligent Measurement Systems, 2002. VIMS '02. 2002 IEEE International Symposium on*, 2002, S. 111 – 115
- [Borrmann 2010] BORRMANN, A.: From GIS to BIM and back again - A spatial query language for 3D building models and 3D city models. In: *Proc. of the International ISPRS Conference on 3D Geoinformation*, 2010
- [Borrmann und Beetz 2010] BORRMANN, A. ; BEETZ, J.: Towards spatial reasoning on building information models. In: *Proc. of the 8th European Conference on Product and Process Modeling (ECPPM)*, 2010

- [Borrmann 2007] BORRMANN, André: *Computerunterstützung verteilt-kooperativer Bauplanung durch Integration interaktiver Simulationen und räumlicher Datenbanken*, Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauinformatik, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Dissertation, 2007
- [Borrmann und Rank 2009] BORRMANN, André ; RANK, Ernst: Topological analysis of 3D building models using a spatial query language. In: *Advanced Engineering Informatics, Elsevier Ltd.* 23 (2009), Nr. 4, S. 370–385. – ISSN 1474-0346
- [Borrmann u. a. 2006] BORRMANN, André ; TREECK, Christoph V. ; RANK, Ernst: Towards a 3D Spatial Query Language for Building Information Models. In: *Proc. Joint Int. Conf. of Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering (ICCCBE-XI)*, 2006
- [Bouchard u. a. 2010] BOUCHARD, Kevin ; AJROUD, Amir ; BOUCHARD, Bruno ; BOUZOUANE, Abdenour: SIMACT: a 3D open source smart home simulator for activity recognition. In: *Proceedings of the 2010 international conference on Advances in computer science and information technology*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2010 (AST/UCMA/ISA/ACN'10), S. 524–533. – ISBN 3-642-13576-5, 978-3-642-13576-7
- [Brumitt u. a. 2000] BRUMITT, B. ; KRUMM, J. ; MEYERS, B. ; SHAFER, S.: Ubiquitous computing and the role of geometry. In: *Personal Communications, IEEE* 7 (2000), oct, Nr. 5, S. 41–43. – ISSN 1070-9916
- [Buschmann u. a. 1998] BUSCHMANN, Frank ; MEUNIER, Regine ; ROHNERT, Hans ; SOMMERLAD, Peter ; STAL, Michael: *Pattern-orientierte Software-Architektur: Ein Pattern-System*. Bonn : Addison-Wesley, 1998. – ISBN 978-3-8273-1282-2
- [Butz u. a. 2005] BUTZ, Andreas ; SCHMITZ, Michael ; KRÜGER, Antonio ; HULLMANN, Harald: Tangible UIs for media control: probes into the design space. In: *CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems*. New York, NY, USA : ACM, 2005 (CHI EA '05), S. 957–971. – ISBN 1-59593-002-7
- [Carner 2009] CARNER, Paolo: *Project Domus: Designing Effective Smart Home Systems* / Dublin Institute of Technology. 2009. – Forschungsbericht
- [Chen und Kotz 2000] CHEN, Guanling ; KOTZ, David: *A Survey of Context-Aware Mobile Computing Research*. Hanover, NH, USA : Dartmouth College, 2000. – Forschungsbericht
- [Choi u. a. 2008] CHOI, Jin W. ; KIM, Sung A. ; LERTLAKKHANAKUL, J. ; YEOM, Jung H.: Developing Ubiquitous Space Information Model for Indoor GIS Service in Ubicomp Environment. In: *Networked Computing and Advanced Information Management, 2008. NCM '08. Fourth International Conference on* Bd. 2, sept. 2008, S. 381–388

- [Cook u. a. 2009] COOK, Diane J. ; AUGUSTO, Juan C. ; JAKKULA, Vikramaditya R.: Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities. In: *Pervasive and Mobile Computing* 5 (2009), Nr. 4, S. 277 – 298. – ISSN 1574-1192
- [Coppock und Rhind 1991] COPPOCK, J.T. ; RHIND, D.W.: The history of GIS. In: *Geographical information systems: Principles and applications* 1 (1991), S. 21–43
- [Courtin 2011] COURTIN, Olivier: PostGIS meets the Third Dimension / Oslandia. TU Delft, May 2011. – Presentation – Geomatics Open Guest Lectures at TU Delft
- [De Carolis und Cozzolongo 2004] DE CAROLIS, B. ; COZZOLONGO, G.: C@ sa: intelligent home control and simulation'. In: *Internat. J. Comput. Intelligence* 1 (2004), Nr. 1, S. 1–12
- [Dobson 2005] DOBSON, Simon: Leveraging the subtleties of location. In: *Proceedings of the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence: innovative context-aware services: usages and technologies*. New York, NY, USA : ACM, 2005 (sOc-EUSAI '05), S. 189–193. – ISBN 1-59593-304-2
- [Domnitcheva 2001] DOMNITCHEVA, Svetlana: Location Modeling: State of the Art and Challenges. In: *In Proceedings of the Workshop on Location Modeling for Ubiquitous Computing*, 2001, S. 13–19
- [Eastman u. a. 2008] EASTMAN, Chuck ; TEICHOLZ, Paul ; SACKS, Rafael ; LISTON, Kathleen: *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. Wiley Publishing, 2008. – ISBN 0470185287, 9780470185285
- [Eastman 1975] EASTMAN, C.M.: The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design. In: *AIA Journal* 63 (1975), Nr. 3, S. 46–50
- [Egenhofer und Mark 1995] EGENHOFER, Max ; MARK, David: Naive Geography. In: FRANK, Andrew (Hrsg.) ; KUHN, Werner (Hrsg.): *Spatial Information Theory A Theoretical Basis for GIS* Bd. 988. Springer Berlin / Heidelberg, 1995, S. 1–15. – 10.1007/3-540-60392-1_1. – ISBN 978-3-540-60392-4
- [Egenhofer 2003] EGENHOFER, Max J.: *Topological Relations in 3D*. 2003
- [Egenhofer und Franzosa 1991] EGENHOFER, M.J. ; FRANZOSA, R.D.: Point-set topological spatial relations. In: *International Journal of Geographical Information Science* 5 (1991), Nr. 2, S. 161–174
- [Egenhofer und Herring 1990] EGENHOFER, M.J. ; HERRING, J.: Categorizing binary topological relations between regions, lines, and points in geographic databases / University of Maine, Department of Surveying Engineering. Citeseer, 1990. – Forschungsbericht

- [Egenhofer und Sharma 1993] EGENHOFER, M.J. ; SHARMA, J.: A critical comparison of the 4-intersection and 9-intersection models for spatial relations: formal analysis. In: *Autocarto* Bd. 11 ASPRS American Society For Photogrammetry (Veranst.), 1993
- [Ellenberg 2012] ELLENBERG, Jens: *Ontologiebasierte Aktivitätserkennung im Smart Home Kontext*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Masterarbeit, 2012
- [Ellenberg u. a. 2011a] ELLENBERG, Jens ; KARSTAEDT, Bastian ; ; LUCK, Kai von ; WENDHOLT, Birgit: Model based activity recognition in smart home environments. In: *2011 Computing for Spatial Design, Architecture, and Construction Informatics, Langwedel, Germany*, 2011
- [Ellenberg u. a. 2011b] ELLENBERG, Jens ; KARSTAEDT, Bastian ; VOSKUHL, Sören ; LUCK, Kai von ; WENDHOLT, Birgit: An Environment for Context-Aware Applications in Smart Homes. In: *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Guimaraes, Portugal*, 2011
- [Erman u. a. 1980] ERMAN, Lee D. ; HAYES-ROTH, Frederick ; LESSER, Victor R. ; REDDY, D. R.: The Hearsay-II Speech-Understanding System: Integrating Knowledge to Resolve Uncertainty. In: *ACM Comput. Surv.* 12 (1980), June, S. 213–253. – ISSN 0360-0300
- [Espinoza u. a. 2001] ESPINOZA, F. ; PERSSON, P. ; SANDIN, A. ; NYSTRÖM, H. ; CACCIATORE, E. ; BYLUND, M.: Geonotes: Social and navigational aspects of location-based information systems. In: *Ubicomp 2001: Ubiquitous Computing* Springer (Veranst.), 2001, S. 2–17
- [Fleuret u. a. 2008] FLEURET, F. ; BERCLAZ, J. ; LENGAGNE, R. ; FUA, P.: Multicamera People Tracking with a Probabilistic Occupancy Map. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 30 (2008), feb., Nr. 2, S. 267 –282. – ISSN 0162-8828
- [Frederick 1923] FREDERICK, b.: *Household engineering; scientific management in the home*. Chicago, American school of home economics, 1923
- [Gamma u. a. 1995] GAMMA, Erich ; HELM, Richard ; JOHNSON, Ralph ; VLISSIDES, John: *Design Patterns*. Boston, MA : Addison-Wesley, January 1995. – ISBN 0201633612
- [Gregor u. a. 2009] GREGOR, S. ; RAHIMI, M. ; VOGT, M. ; SCHULZ, T. ; K.V.LUCK: Tangible Computing revisited: Anfassbare Computer in Intelligenten Umgebungen / Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. 2009. – Forschungsbericht
- [Grimm u. a. 2004] GRIMM, Robert ; DAVIS, Janet ; LEMAR, Eric ; MACBETH, Adam ; SWANSON, Steven ; ANDERSON, Thomas ; BERSHAD, Brian ; BORRIELLO, Gaetano ; GRIBBLE, Steven ; WETHERALL, David: System support for pervasive applications. In: *ACM Trans. Comput. Syst.* 22 (2004), November, S. 421–486. – ISSN 0734-2071

- [Gu u. a. 2005] GU, Tao ; PUNG, Hung K. ; ZHANG, Da Q.: A service-oriented middleware for building context-aware services. In: *Journal of Network and Computer Applications* 28 (2005), Nr. 1, S. 1 – 18. – ISSN 1084-8045
- [Harper 2003] HARPER, Richard: *Inside the smart home*. Springer verlag, 2003
- [Harter und Hopper 1994] HARTER, A. ; HOPPER, A.: A distributed location system for the active office. In: *Network, IEEE* 8 (1994), jan.-feb., Nr. 1, S. 62 –70. – ISSN 0890-8044
- [Harter u. a. 1999] HARTER, Andy ; HOPPER, Andy ; STEGGLES, Pete ; WARD, Andy ; WEBSTER, Paul: The anatomy of a context-aware application. In: *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. New York, NY, USA : ACM, 1999 (MobiCom '99), S. 59–68. – ISBN 1-58113-142-9
- [Hartmann 2010] HARTMANN, Ulrich: Metriken zur Komplexitätsanalyse von Produktmodellen. In: *Forum Bauinformatik 2010* 1 (2010), August, S. 67–69
- [Hayes-Roth 1985] HAYES-ROTH, Barbara: A blackboard architecture for control. In: *Artif. Intell.* 26 (1985), August, S. 251–321. – ISSN 0004-3702
- [Henze u. a. 2008] HENZE, Niels ; RUKZIO, Enrico ; LORENZ, Andreas ; RIGHETTI, Xavier ; BOLL, Susanne: Physical-virtual linkage with contextual bookmarks. In: *Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*. New York, NY, USA : ACM, 2008 (MobileHCI '08), S. 523–526. – ISBN 978-1-59593-952-4
- [Herzog u. a. 1990] HERZOG, G. ; RIST, T. ; ANDRÉ, E.: *Sprache und Raum: natürlicher sprachlicher Zugang zu visuellen Daten*. Springer-Verlag, 1990
- [Hightower und Borriello 2001] HIGHTOWER, J. ; BORRIELLO, G.: Location systems for ubiquitous computing. In: *Computer* 34 (2001), aug, Nr. 8, S. 57 – 66. – ISSN 0018-9162
- [Hijazi u. a. 2009] HIJAZI, I. ; EHLERS, M. ; ZLATANOVA, S. ; ISIKDAG, U.: IFC to CityGML transformation framework for geo-analysis: a water utility network case. In: *3D GeoInfo, Proceedings of the 4th International Workshop on 3D Geo-Information, Ghent: Ghent University, 2009*, S. 123–127
- [Hijazi u. a. 2010] HIJAZI, Ihab ; EHLERS, Manfred ; ZLATANOVA, Sisi: Bim for Geo-Analysis (BIM4GEOA): Set up of 3D Information System with Open Source Software and Open Specification (OS). In: THOMAS H. KOLBE, Claus N. (Hrsg.): *5th International Conference on 3D GeoInformation* Bd. XXXVIII-4/W15, 2010, November 2010, S. 45–49
- [Hirakawa u. a. 2003] HIRAKAWA, M. ; KOJIMA, Y. ; YOSHITAKA, A.: Transparent interface: a seamless media space integrating the real and virtual worlds. In: *Human Centric Computing Languages and Environments, 2003. Proceedings. 2003 IEEE Symposium on*, oct. 2003, S. 120 – 122

- [Hossain u. a. 2011] HOSSAIN, S K A. ; RAHMAN, Abu Saleh Md M. ; SADDIK, Abdulmo-
taleb E.: Bridging the gap between virtual and real with second life client in a virtual
home automation system. In: *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2011 24th
Canadian Conference on*, may 2011, S. 001212 –001217. – ISSN 0840-7789
- [Howell und Batcheler 2005] HOWELL, I. ; BATCHELER, B.: Building information modeling
two years later—huge potential, some success and several limitations. In: *The Laiserin
Letter* 22 (2005)
- [Hudelot u. a. 2008] HUDELLOT, C. ; ATIF, J. ; BLOCH, I.: Fuzzy spatial relation ontology for
image interpretation. In: *Fuzzy Sets and Systems* 159 (2008), Nr. 15, S. 1929–1951
- [IAI 2010] IAI, Industrie-Allianz für Interoperabilität: *Industry Foundation Classes*. 2010
- [Isermeyer 2003] ISERMEYER, Ulrich: *Datenaustausch auf neuem Niveau*. Oktober 2003
- [Jena und Roehrig 2007] JENA, Sanjay D. ; ROEHRIG, Jackson: A Java Implementation of
the OpenGIS™ Feature Geometry Abstract Specification (ISO 19107 Spatial Schema) /
University of Applied Sciences Cologne, Institute for Technology in the Tropics. 2007. –
Forschungsbericht
- [Johannsen und Pautz 2011] JOHANNSEN, Benedikt ; PAUTZ, Alexander: Fenster & Hei-
zungssteuerung / Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. 2011. – Wiki-
eintrag
- [John und Freeman 1975] JOHN ; FREEMAN: The modelling of spatial relations. In: *Com-
puter Graphics and Image Processing* 4 (1975), Nr. 2, S. 156 – 171. – ISSN 0146-664X
- [Karstaedt 2009] KARSTAEDT, Bastian: *WPF Toolkit für interaktive, raumbezogene Anwen-
dungen*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Bachelorarbeit, 2009
- [Karstaedt 2011] KARSTAEDT, Bastian: Entwicklung und Integration des Indoor Spatial
Information Services in den Living Place Hamburg / HAW-Hamburg. 2011. – Report
- [Katz und Akpom 1976] KATZ, S. ; AKPOM, C.A.: A measure of primary sociobiological
functions. In: *International Journal of Health Services* 6 (1976), Nr. 3, S. 493–508
- [Klein 1982] KLEIN, Wolfgang: *Local deixis in route directions*. S. 161–182. In: JARVELLA,
R J. (Hrsg.) ; KLEIN, W (Hrsg.): *Speech Place and Action Studies in Deixis and Related
Topics*, Wiley, 1982
- [Knauff u. a. 2002] KNAUFF, M. ; SCHLIEDER, C. ; FREKSA, C.: Spatial cognition: From
rat-research to multifunctional spatial assistance systems. In: *KI* 16 (2002), Nr. 4, S. 5–9
- [Kolbe 2008a] KOLBE, Prof. Dr. Thomas H.: 3D Stadtmodellierung mit CityGML / Techni-
sche Universität Berlin. 2008. – Skript

- [Kolbe 2008b] KOLBE, Prof. Dr. Thomas H.: CityGML, KML und das Open Geospatial Consortium / Institut für Geodäsie und Geoinformationstechnik. 2008. – Tagungsband zum 13. Münchener Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme an der Technischen Universität München
- [Koller u. a. 1995] KOLLER, David ; LINDSTROM, Peter ; RIBARSKY, William ; HODGES, Larry F. ; FAUST, Nick ; TURNER, Gregory: Virtual GIS: A Real-Time 3D Geographic Information System. In: *Proceedings of the 6th conference on Visualization '95*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 1995 (VIS '95), S. 95–100. – ISBN 0-8186-7187-4
- [Kutics und Nakagawa 2005] KUTICS, A. ; NAKAGAWA, A.: Detecting prominent objects for image retrieval. In: *Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on* Bd. 3, sept. 2005, S. III – 445–8
- [Laat und Berlo 2011] LAAT, R. ; BERLO, L.: Integration of BIM and GIS: The Development of the CityGML GeoBIM Extension. In: *Advances in 3D Geo-Information Sciences (2011)*, S. 211–225
- [Lazovik u. a. 2009] LAZOVIK, A. ; KALDELI, E. ; LAZOVIK, E. ; AIELLO, M.: Planning in a Smart Home: Visualization and Simulation. In: *Application Showcase Proceedings of the 19th Int Conf on Automated Planning and Scheduling ICAPS09, 2009*
- [Lei u. a. 2010] LEI, Zhang ; YUE, Suo ; YU, Chen ; YUANCHUN, Shi: SHSim: An OSGI-based smart home simulator. In: *Ubi-media Computing (U-Media), 2010 3rd IEEE International Conference on*, july 2010, S. 87 –90
- [Leonhardt 1998] LEONHARDT, Ulf: *Supporting location-awareness in open distributed systems*, University of London, Dissertation, 1998
- [Lertlakkhanakul u. a. 2008] LERTLAKKHANAKUL, Jumphon ; CHOI, Jin W. ; KIM, Mi Y.: Building data model and simulation platform for spatial interaction management in smart home. In: *Automation in Construction* 17 (2008), Nr. 8, S. 948 – 957. – ISSN 0926-5805
- [Li 2008] LI, Ki-Joune: Indoor Space: A New Notion of Space. In: *W2GIS '08: Proceedings of the 8th International Symposium on Web and Wireless Geographical Information Systems*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008, S. 1–3. – ISBN 978-3-540-89902-0
- [Lömker 2006] LÖMKER, Thorsten M.: *Plausibilität im Planungsprozess, Umbau und Umnutzung als Optimierungsaufgabe*, Bauhaus Universität Weimar, Dissertation, 2006
- [von Luck u. a. 2010] LUCK, Prof. Dr. K. von ; KLEMKE, Prof. Dr. G. ; GREGOR, Sebastian ; RAHIMI, Mohammad A. ; VOGT, Matthias: Living Place Hamburg – A place for concepts of IT based modern living / Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Mai 2010. – Forschungsbericht

- [Manchón u. a. 2007] MANCHÓN, Pilar ; SOLAR, Carmen del ; AMORES, Gabriel ; PÉREZ, Guillermo: Multimodal interaction analysis in a smart house. In: *Proceedings of the 9th international conference on Multimodal interfaces*. New York, NY, USA : ACM, 2007 (ICMI '07), S. 327–334. – ISBN 978-1-59593-817-6
- [Mautz und Tilch 2011] MAUTZ, R. ; TILCH, S.: Survey of optical indoor positioning systems. In: *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2011 International Conference on*, sept. 2011, S. 1 –7
- [Melzer 2010] MELZER, Ingo (Hrsg.): *Service-orientierte Architekturen mit Web Services: Konzepte – Standards – Praxis*. 4. Heidelberg : Spektrum, 2010. – ISBN 978-3-8274-2549-2
- [Meyer 2012] MEYER, Johannes: Ortungsverbesserung durch hybride Verfahren / Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. 2012. – Forschungsbericht
- [Möhlmann 2012] MÖHLMANN, Sascha: *Visuelle Positionsbestimmung auf mobilen Endgeräten*. 2012
- [Morse 2009] MORSE, E.J.: An Online Case Study Resource for Building Information Modeling in College Education / Worcester Polytechnic Institute. 2009. – Forschungsbericht
- [Nagel und Häfele 2007] NAGEL, Claus ; HÄFELE, K.-H.: Generierung von 3D-Stadtmodellen auf Basis des IFC Gebäudemodells. In: *Entwicklerforum Geoinformatik, Shaker Verlag* 1 (2007), S. 15
- [Najem 2011] NAJEM, Hosnia: Projekt 2 – „Modellbasiertes Suchen von Objekten“ in einer Smart-Home-Umgebung / Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. 2011. – Forschungsbericht
- [Neumann 1984] NEUMANN, B.: *Natural language description of time-varying scenes*. Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, 1984
- [Otto und Voskuhl 2010] OTTO, Kjell ; VOSKUHL, Sören: Projektbericht Wintersemester 10/11 – Weiterentwicklung der Architektur des Living Place Hamburg / HAW-Hamburg. 2010. – Forschungsbericht
- [Pascoe 1998] PASCOE, Mr. J.: Adding Generic Contextual Capabilities to Wearable Computers. In: *Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Wearable Computers*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 1998 (ISWC '98), S. 92. – ISBN 0-8186-9074-7
- [Paul und Borrmann 2010] PAUL, N. ; BORRMANN, A.: *3D Spatial Query Language for Building Information Models*. Webseite. August 2010. – Zuletzt betrachtet: 05.08.2010

- [Randell u. a. 1992] RANDELL, D.A. ; CUI, Z. ; COHN, A.G.: A spatial logic based on regions and connection. In: *KR* 92 (1992), S. 165–176
- [Raper 1992] RAPER, JF: Key 3D modelling concepts for geoscientific analysis. In: *Three2D im ensional M odeling w ith Geoscientific Information Systems* 354 (1992), S. 215–232
- [Raper und Maguire 1992] RAPER, Jonathan F. ; MAGUIRE, David J.: Design models and functionality in GIS. In: *Computers & Geosciences* 18 (1992), Nr. 4, S. 387 – 394. – GIS Design Models. – ISSN 0098-3004
- [Rech 2008] RECH, Monika: CityGML, ein Standard made in Germany. In: *gis-Business* 5 (2008), Nr. 5, S. 12–14
- [Retz-Schmidt 1988] RETZ-SCHMIDT, G.: Various views on spatial prepositions. In: *AI magazine* 9 (1988), Nr. 2, S. 95. – ISSN 0738-4602
- [Riedel u. a. 2005] RIEDEL, D.E. ; VENKATESH, S. ; LIU, Wanquan: Spatial Activity Recognition in a Smart Home Environment using a Chemotactic Model. In: *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference, 2005. Proceedings of the 2005 International Conference on, dec. 2005*, S. 301 – 306
- [Rongxing 1994] RONGXING, Li: Data structures and application issues in 3-D geographic information systems. In: *Geomatica* 48 (1994), Nr. 3, S. 209–224
- [Rudolf 2011] RUDOLF, Sebastian: Shared Notes – virtuelle Notizen im Smart Home / Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. 2011. – Forschungsbericht
- [Satoh 2007] SATOH, Ichiro: A location model for smart environments. In: *Pervasive Mob. Comput.* 3 (2007), March, S. 158–179. – ISSN 1574-1192
- [Satoh 2009] SATOH, Ichiro: Location-aware communications in smart environments. In: *Information Systems Frontiers* 11 (2009), S. 501–512. – 10.1007/s10796-008-9120-5. – ISSN 1387-3326
- [Schilit u. a. 1994] SCHILIT, B. ; ADAMS, N. ; WANT, R.: Context-Aware Computing Applications. In: *Mobile Computing Systems and Applications, 1994. WMCSA 1994. First Workshop on, dec. 1994*, S. 85–90
- [Schultz und Bhatt 2010] SCHULTZ, Carl ; BHATT, Mehul: A multi-modal data access framework for spatial assistance systems: use-cases with the building information model (BIM/IFC). In: *Proceedings of the 2nd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (ISA '10), S. 39–46. – ISBN 978-1-4503-0433-7

- [Starke 2008] STARKE, Gernot: *Effektive Software-Architekturen: Ein praktischer Leitfa-*
den. 3. München : Hanser, 2008. – ISBN 978-3-446-42008-3
- [Stevenson u. a. 2010] STEVENSON, G. ; YE, Juan ; DOBSON, S. ; NIXON, P.: LOC8: A
Location Model and Extensible Framework for Programming with Location. In: *Pervasive*
Computing, IEEE 9 (2010), jan.-march, Nr. 1, S. 28 –37. – ISSN 1536-1268
- [Strese u. a. 2011] STRESE, Hartmut ; SEIDEL, Uwe ; KNAPE, Thorsten ; BOTTHOF, Al-
fons: Smart Home in Deutschland – Untersuchung im Rahmen der wissenschaftlichen
Begleitung zum Programm Next Generation Media (NGM) des Bundesministeriums für
Wirtschaft und Technologie. In: *Ambient Assisted Living–AAL* (2011), S. 46
- [Sutherland 1964] SUTHERLAND, Ivan E.: Sketch pad a man-machine graphical commu-
nication system. In: *Proceedings of the SHARE design automation workshop*. New York,
NY, USA : ACM, 1964 (DAC '64), S. 6.329–6.346
- [Turner 1992] TURNER, A.K.: *Three-dimensional modeling with geoscientific information*
systems. Bd. 354. Springer, 1992
- [Van Nguyen u. a. 2009] VAN NGUYEN, T. ; KIM, Jin G. ; CHOI, Deokjai: ISS: The Interactive
Smart home Simulator. In: *Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009.*
11th International Conference on Bd. 03, feb. 2009, S. 1828 –1833. – ISSN 1738-9445
- [Vogel u. a. 2008] VOGEL, O. ; ARNOLD, I. ; CHUGHTAI, A. ; IHLER, E. ; KEHRER, T. ;
MEHLIG, U. ; ZDUN, U.: *Software-Architektur: Grundlagen-Konzepte-Praxis*. Springer,
2008
- [Voskuhl 2012] VOSKUHL, Sören: *Modellunabhängige Kontextinterpretation in einer Smart*
Home Umgebung, HAW Hamburg, Masterarbeit, Jan 2012
- [Want u. a. 1992] WANT, Roy ; HOPPER, Andy ; FALCÃO, Veronica ; GIBBONS, Jonathan:
The active badge location system. In: *ACM Trans. Inf. Syst.* 10 (1992), Januar, S. 91–102.
– ISSN 1046-8188
- [Weber 2002] WEBER, Joachim: *Globale Selbstlokalisierung für mobile Service Roboter*,
Universität Kaiserslautern, Dissertation, April 2002
- [Weingarten u. a. 2010] WEINGARTEN, Florian ; BLUMENDORF, Marco ; ALBAYRAK, Sahin:
Towards multimodal interaction in smart home environments: the home operating system.
In: *Proceedings of the 8th ACM Conference on Designing Interactive Systems*. New York,
NY, USA : ACM, 2010 (DIS '10), S. 430–433. – ISBN 978-1-4503-0103-9
- [Weiser 1991] WEISER, M.: The computer for the 21st century. In: *Scientific American* 265
(1991), Nr. 3, S. 94–104

- [Witt 2011] WITT, Kristoffer: *Kontextabhängige multimodale Interaktion mit Schwerpunkt Spracherkennung im Smart-Home Umfeld*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, 2011
- [Woodman und Harle 2008] WOODMAN, Oliver ; HARLE, Robert: Pedestrian localisation for indoor environments. In: *Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing*. New York, NY, USA : ACM, 2008 (UbiComp '08), S. 114–123. – ISBN 978-1-60558-136-1
- [Wu u. a. 2010] WU, Chen ; KHALILI, Amir H. ; AGHAJAN, Hamid: Multiview activity recognition in smart homes with spatio-temporal features. In: *Proceedings of the Fourth ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras*. New York, NY, USA : ACM, 2010 (ICDSC '10), S. 142–149. – ISBN 978-1-4503-0317-0
- [Wunderlich 1985] WUNDERLICH, D.: Raumkonzepte. Zur Semantik der lokalen Präpositionen. In: *Nach-Chomskysche Linguistik* (1985), S. 340–351
- [Yan und Damian 2008] YAN, H. ; DAMIAN, P.: Benefits and Barriers of Building Information Modelling. In: *12th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering 2008*, 2008
- [Yao und Thill 2006] YAO, X. ; THILL, J.C.: Spatial queries with qualitative locations in spatial information systems. In: *Computers, Environment and Urban Systems* 30 (2006), Nr. 4, S. 485–502
- [Yoneki 2005] YONEKI, Eiko: Event Broker Grids with Filtering, Aggregation, and Correlation for Wireless Sensor Data. In: MEERSMAN, Robert (Hrsg.) ; TARI, Zahir (Hrsg.) ; HERRERO, Pilar (Hrsg.): *On the Move to Meaningful Internet Systems 2005: OTM 2005 Workshops* Bd. 3762. Springer Berlin / Heidelberg, 2005, S. 304–313. – 10.1007/11575863_50. – ISBN 978-3-540-29739-0
- [Zadeh 1965] ZADEH, L.A.: Fuzzy sets*. In: *Information and control* 8 (1965), Nr. 3, S. 338–353
- [Zhang u. a. 2011] ZHANG, Yeting ; ZHU, Qing ; LIU, Gang ; ZHENG, Wenting ; LI, Zhonghua ; DU, Zhiqiang: GeoScope: Full 3D geospatial information system case study. In: *Geo-Spatial Information Science* 14 (2011), Juni, Nr. 2, S. 150–156. – ISSN 1009-5020
- [Zlatanova 2000] ZLATANOVA, S.: On 3D Topological Relationships. In: *Proceedings of the 11th International Workshop on Database and Expert Systems Applications*. Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2000 (DEXA '00), S. 913–. – ISBN 0-7695-0680-1
- [Zlatanova u. a. 2002] ZLATANOVA, S. ; RAHMAN, A. ; PILOUK, M.: 3D GIS: current status and perspectives. In: *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (2002), Nr. 4, S. 66–71

A. Anhang

Im Folgenden werden projektinterne Links zur Dokumentation, zum Quelltext sowie zu relevanten Informationen und Dateien rund um das Gebäudemodell des Living Places bereitgestellt.

Dokumentation

- ISIS [\[doc\]](#) [\[code\]](#)
 - Schnittstellenbeschreibung [\[doc\]](#)
 - Builds und Build-Prozess (32/64bit) [\[files\]](#)
- Ubisense Mockup [\[doc\]](#) [\[code\]](#)
 - .NET AMQ Wrapper [\[doc\]](#) [\[code\]](#)

Gebäudemodell und Produktmodellserver

- Autodesk Revit Gebäudemodell-Datei [\[file\]](#)
- BiMServer [\[doc\]](#) [\[www\]](#)
- Renderings [\[files\]](#)

Startsystem zum lokalen Testen

Für ein System zum lokalen Testen mit dem ISIS werden folgende Programme benötigt:

- ActiveMQ ([Apache Software Foundation](#)) [\[www\]](#) & MongoDB ([10gen](#)) [\[www\]](#)
- ISIS [\[files\]](#) (optional: Ubisense Mockup [\[zip\]](#), BBTestMessageSender ([Ellenberg](#)) [\[doc\]](#))

Zunächst sind der *ActiveMQ* und die *MongoDB* zu starten. Sind diese bereit, kann der *ISIS* initialisiert werden. Zum Testen bietet sich der *Verbose-Modus* an, durch den eine Vielzahl an Statusausgaben erfolgen (näheres zu Konsolenparametern und Konfigurationsdateien findet sich in der [Dokumentation](#)). Nun können mit dem *Ubisense Mockup* Lokationsdaten und dem *BBTestMessageSender* Serviceanfragen simuliert werden.

Versicherung über Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, 11. April 2012

Ort, Datum

Unterschrift