

ThinkHome

Gesteigerte Energieeffizienz durch den Einsatz
von künstlicher Intelligenz im Haus der Zukunft

W. Kastner

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

4/2013

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

ThinkHome

Gesteigerte Energieeffizienz durch den Einsatz
von künstlicher Intelligenz im Haus der Zukunft

Wolfgang Kastner
Technische Universität Wien
Institut für Rechnergestützte Automation
Arbeitsbereich Automatisierungssysteme

Wien, September 2012

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm *Haus der Zukunft* des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.

Die Intention des Programms ist, die technologischen Voraussetzungen für zukünftige Gebäude zu schaffen. Zukünftige Gebäude sollen höchste Energieeffizienz aufweisen und kostengünstig zu einem Mehr an Lebensqualität beitragen. Manche werden es schaffen, in Summe mehr Energie zu erzeugen als sie verbrauchen („Haus der Zukunft Plus“). Innovationen im Bereich der zukunftsorientierten Bauweise werden eingeleitet und ihre Markteinführung und -verbreitung forciert. Die Ergebnisse werden in Form von Pilot- oder Demonstrationsprojekten umgesetzt, um die Sichtbarkeit von neuen Technologien und Konzepten zu gewährleisten.

Das Programm *Haus der Zukunft Plus* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie in der Schriftenreihe publiziert und elektronisch über das Internet unter der Webadresse <http://www.HAUSderZukunft.at> Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	8
Abstract	11
1 Einleitung.....	13
2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt	15
2.1 Beschreibung des Standes der Technik.....	15
2.2 Verwendete Methoden	17
3 Ergebnisse des Projektes.....	18
3.1 Requirementsanalyse und Systemspezifikation.....	18
3.2 Wissensbasis	20
3.3 Multi-Agentensystem.....	28
3.4 Kontrollstrategien	35
3.5 Profilbasierte Kontrollstrategien	43
3.5.1 Prototyp: Systemübersicht und -struktur.....	43
3.5.2 Feldstudie	47
3.5.3 Evaluierung.....	49
4 Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms	53
4.1 Einpassung in das Programm	53
4.2 Beitrag zum Gesamtziel des Programms.....	55
4.3 Einbeziehung der Zielgruppen (Gruppen, die für die Umsetzung der Ergebnisse relevant sind) und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt	56
4.4 Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotenzial) für die Projektergebnisse	57
5 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	58
6 Ausblick und Empfehlungen.....	60
7 Literatur-/ Abbildungs- / Tabellenverzeichnis	61
8 Anhang.....	66

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Gegenwärtig automatisierte Gebäude verfügen über eine Vielzahl von Sensoren, Aktuatoren und Controllern, deren Zusammenspiel dem Benutzer ein komfortables Wohngefühl verschaffen soll. Obwohl Automationssysteme die grundsätzliche Ansteuerung der Geräte übernehmen, ist der Benutzer in der Praxis damit konfrontiert, die Systeme manuell an geänderte Komfort- und Nutzungsgewohnheiten anpassen zu müssen, um so einen optimierten Betrieb sicherzustellen. Diese Eingriffe sind jedoch, nicht zuletzt aufgrund unterschiedlicher Systeme und eines Übermaßes an verschiedenen Konfigurations- und Parametrierungsmöglichkeiten, selbst für technik-affine Benutzer nur schwer durchzuführen. Aus diesem Grund werden vielfach Standardkonfigurationen eingesetzt und vorhandenes Wissen nicht zur Optimierung herangezogen. Zusätzlich erreichen aktuelle Automatisierungssysteme selten einen energieverbrauchsoptimalen Betrieb des Gebäudes, da viele der Einflussfaktoren, wie Gebäudehülle und -struktur, oder externe Gegebenheiten, wie Wetterlage, derzeit noch unberücksichtigt bleiben. Aus diesen Gründen gelingt es in den meisten Fällen nicht das vorhandene Energiesparpotential des Gebäudes vollständig ausschöpfen und den Betrieb des Gebäudes ganzheitlich zu optimieren.

Inhalte und Zielsetzungen

Ziel des Projekts „ThinkHome“ ist es, ein System für den Heimbereich zu entwerfen, das die Bewohner dabei unterstützt den Betrieb ihres Gebäudes bei größtmöglichem Komfort und höchster Energieeffizienz durchzuführen. Dazu soll ThinkHome Wissen über seine Benutzer, ihre Anwesenheit, das Gebäude und eine Vielzahl weiterer Parameter zur Optimierung verschiedener Automatisierungsaufgaben – vorrangig in den energieintensiven Bereichen Heizung-/Lüftung-/ Klimatechnik sowie Beleuchtung und Verschattung – nutzen. Diese Informationen sollen mit Hilfe neuartiger Kontrollansätze und Applikationen in den täglichen Betrieb des Gebäudes einfließen und darüber hinaus auch die Integrationsmöglichkeiten von erneuerbaren Energien forcieren. Ebenso soll ThinkHome wiederkehrende Abläufe und Routineaufgaben erkennen und erlernen, um diese in weiterer Folge selbsttätig auszuführen und so die Bewohner zu entlasten.

Das autonome Kontrollsystem soll als Softwaresystem konzipiert sein, das einerseits Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) anwendet und andererseits auf sämtliche Informationen des Gebäudes und der Benutzer zugreifen kann. Dazu soll dieses Wissen in einer Wissensbasis repräsentiert werden, die für die intelligenten Kontrollalgorithmen eine umfassende Informationsquelle über die Gesamtheit des Eigenheims und seiner Umwelt darstellt. Bezogen auf die Darstellung des Gebäudes ist es dabei insbesondere wichtig, abgesehen von den Gerätschaften der Haustechnik auch eine bestmögliche Abbildung des Gebäudes selbst (Gebäudestruktur, Gebäudehülle, aktuelle Personenanzahl im Wohnraum, Tätigkeiten, ...) zur Verfügung zu stellen. Mit diesem Wissen soll das ThinkHome-System selbständig energieeffizient agieren können und auch Lernfähigkeit besitzen. Des Weiteren sollen auch aktuelle sowie prognostizierte Außenbedingungen, Anwesenheits- und

Energieprofile, Energieanbieter und -tarife gespeichert und zur Verfügung gestellt werden. Neben einer automatisierten Kontrolle der Gebädefunktionen soll dem Benutzer in ausgewählten Szenarien Feedback über die internen Vorgänge wie zum Beispiel den Energieverbrauch und damit verbundene Einsparungspotentiale gegeben werden.

Methodische Vorgehensweise

Nach einer umfassenden Analyse der Anforderungen und der Erstellung eines möglichst vollständigen Gesamtkonzepts sollen Teile des umfassenden Systems prototypisch realisiert werden. Hierfür ist es zu Beginn wichtig, (auch zukünftige) Anwendungsfälle festzuhalten und darauf aufbauend die einzelnen Systemkomponenten zu spezifizieren. Ebenso werden verwandte Projekte und vorangehende Arbeiten analysiert und nach Möglichkeit integriert. Besonderes Augenmerk wird auf eine vollständige Betrachtung aller Anwendungsfelder gelegt, um zu einem ganzheitlichen Systementwurf zu gelangen. In einem nächsten Schritt werden alle Parameter festgehalten, die für die automatische und intelligente Steuerung eines Gebäudes notwendig sind sowie dessen Optimierung versprechen. Diese Parameter werden in Folge in Form einer Wissensbasis dargestellt, die eine Verarbeitung durch intelligente Software-Agenten ermöglicht.

Die intelligente und energieeffiziente Steuerung/Regelung des Gebäudes wird durch ein Multi-Agentensystem realisiert. Dieses wird auf Basis der Anwendungsfälle und Parameter mit Unterstützung maßgeschneiderter Design-Methodologien entworfen und für eine Umsetzung mit etablierten Softwaretechniken und -standards ausgelegt. Weiters werden intelligente Kontrollstrategien entwickelt, die die Energieeffizienz der Haustechniksysteme erhöhen. Besonderer Fokus wird auf die Berücksichtigung regelmäßig wiederkehrender Muster und Benutzerpräferenzen gelegt, die im System dazu verwendet werden, um zukünftige Zustände vorherzusagen. Durch Auswahl und Anwendung geeigneter Methoden der KI wird so eine adaptive Steuerung und prädiktive Regelung der Gebädefunktionen erreicht.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Im Rahmen des ThinkHome-Projekts wurde ein vollständiges Systemkonzept inklusive Anwendungsfällen, Szenarien und einer Beschreibung der Systemarchitektur erstellt. Für die Einbindung von Gebäudedaten wurde ein Integrationsprozess für Daten von einem Building Information Model (gbXML) in die ThinkHome Wissensbasis definiert. Ein Softwaretool erlaubt die automatisierte Einbindung von Wissen über das Gebäude aus Architekturprogrammen in das ThinkHome-System, wo diese Informationen weiterfolgend für eine optimierte Regelung oder Steuerung eingesetzt werden können.

Exemplarisch wurde ein Gebäudemodell in Autodesk erstellt und in Ecotect um energietechnisch relevante bauphysikalische Daten erweitert. Dieses Modell wurde nachfolgend in einer Simulation als MATLAB/Simulink Modell umgesetzt, um die Evaluierung des Systems zu unterstützen. Zeitgleich wurde die Wissensbasis für das ThinkHome-System konzipiert und die wichtigsten Teile davon detailliert umgesetzt. Spezielles Augenmerk wurde hierbei auf die Umsetzung von Energieinformationen der Energieerzeuger sowie

Energieverbraucher im Gebäude und der externen Energielieferanten als Energiebereitsteller gelegt. Ebenso wurde das Kontrollsystem im Detail als Multi-Agentensystem spezifiziert und anschließend prototypisch umgesetzt. In diesem Rahmen wurden auch die Schnittstellen zu externen sowie internen Systemen definiert sowie Agententypen und -framework analysiert und festgelegt. Ausgehend von den Anwendungsfällen wurden auch neue Kontrollstrategien entworfen und prototypisch umgesetzt, die auf Kontextprofilen basieren. Deren prototypische Umsetzung zeigt, dass mit dem Einsatz von prädiktiven Strategien in einem Wohngebäude Energie ohne Komfortverlust eingespart werden kann.

Abstract

Starting point/Motivation

Current automated buildings are equipped with a great amount of sensing, actuating and controlling equipment that should guarantee comfort for the users. Although automation technology aids in controlling building functions, the user is in practice still confronted with manually having to adapt the system to changes in usage and comfort desires so that an optimized operation is still achieved. However, the user is often over challenged with exploiting all the different possibilities not last because of an excess of different possible configurations. For that reason even technically versed users resort to standard profiles, and thus are not able to exploit all energy savings potentials in the building. Additionally, current automation systems often do not reach an energy-optimized operation of the building, as many influence factors like the current state of the building hull or external influences like weather remain unconsidered. Therefore, it is in many cases not possible to exploit all energy saving potentials of the building in a comprehensive way.

Contents and Objectives

Main goal of the ThinkHome approach is to develop a system for residential homes which supports residents in keeping a comfortable environment while operating the building in an energy-efficient way. ThinkHome shall be able to use information on its inhabitants, occupancy, the building structure and hull and many more parameters to optimize different building services, mainly the energy-intensive subsystems of the heating/ventilation/air-conditioning domain and lighting/shading. The available information shall be considered in novel control approaches and applications for the daily operation of a building. Furthermore, the integration of renewable energy sources shall be promoted. ThinkHome shall also be able to detect and learn user and usage patterns, and use this information to autonomously execute routine tasks on behalf of the users.

This autonomous control system shall be designed as software system that exploits mechanisms from the artificial intelligence domain and that integrates all available information on the building and its users in the control strategies. For this purpose the information shall be represented in a comprehensive knowledge base. The knowledge base shall incorporate a preferably complete model of the building and its users so that this information (building structure, occupancy, user activities, ...) can be used by the control system for autonomous and energy-efficient building control. Above this autonomous control, the user shall also be provided with feedback on energy consumption and further reduction possibilities.

Methods

After a thorough analysis and specification of a complete system concept, selected parts of this comprehensive system shall be prototypically realized. For this purpose, it is first important to specify (novel) use cases and to characterize the necessary system components. In parallel, related work and previous approaches shall be analyzed for

possible starting points. Herein focus is put on a complete description of parameters that are necessary for an optimized operation of a building. In a next step, all parameters are specified that influence the control of building services. These parameters are subsequently represented as knowledge base which makes knowledge accessible by intelligent software agents.

The intelligent and energy-efficient control of the building is realized by a multi-agent system. It is designed based on the use cases and developed following a tailored agent design methodology that ensures a later implementation with established software frameworks.

Furthermore, intelligent control strategies shall be developed that are capable of exploiting unused savings potentials. Hereby, focus is put on the detection of recurrent patterns that can be used by the system's control strategies to predict future situations and to act in a predictive way according to them. To describe these patterns in the system and enable logical inference, methods from the artificial intelligence domain will be evaluated and adapted for the use in ThinkHome.

Results

In the course of the ThinkHome project, a complete system concept including use cases, scenarios and a detailed system architecture was developed. For an integration of building information into the intelligent control strategies of the system, an integration process was specified which allows the transformation of information from a building information model (gbXML) into the ThinkHome knowledge base. A software tool allows the automatic inclusion of knowledge about the building from architectural software such as AutoCAD or Autodesk into the ThinkHome system where the information can be used for an optimized control.

Therefore, a building model was created in Autodesk, which has been extended with energy-relevant data from building physics in Ecotect. Subsequently, the model was realized as MATLAB/Simulink simulation, in order to support the evaluation of the system. At the same time, the knowledge base for the ThinkHome system was designed and the most important parts were implemented in detail. Special focus was put on realizing a comprehensive representation of energy information, like energy producers and consumers in the building as well as exterior energy providers.

Likewise, the control system was specified as multi-agent system and parts were prototypically implemented. In course of this task also the interfaces to external and internal systems were specified as well as the agent architecture and the agent framework were defined after a thorough analysis.

Starting from the use cases also novel control strategies based on habit profiles were realized and prototypically implemented. Their prototypical implementation showed that with the application of predictive methods in a residential home, energy can be saved without loss of user comfort.

1 Einleitung

Gebäudeautomation umfasst das Messen, Steuern, Regeln und Überwachen im Bereich von Anlagen und Einrichtungen der technischen Gebäudeausrüstung. Darunter fallen vorrangig Systeme der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik (HLK) sowie Beleuchtungs- und Verschattungsanlagen. Der Einsatz optimierter Strategien zur Steuerung/Regelung dieser energieintensiven Bereiche verspricht erhebliche Einsparungen bei den Betriebskosten im Zweckbau. Der Einsatz von Automatisierungstechnik ist aber ebenso im Wohnbereich äußerst attraktiv. Die zugrundeliegende Motivation war hier bislang zumeist im gesteigerten Komfort zu finden. Zunehmend werden in diesem Sektor auch Geräte der Unterhaltungstechnik sowie Haushaltsgeräte in zentrale Automationssysteme integriert, um dem Benutzer eine komfortable Steuerung verschiedenster Gerätschaften zu ermöglichen. Ebenso soll älteren Menschen oder Menschen mit Beeinträchtigungen zu einem (längeren) selbstbestimmten Verbleiben im eigenen Heim verholfen werden („*Assisted Living*“, „*Smart Home Care*“).

ThinkHome ist ein vernetztes, autonom gesteuertes Haus der Zukunft, das der Optimierung der Energieeffizienz und der Verbesserung des Nutzerkomforts dient (Kastner et al., 2010; Reinisch et al., 2010; Kastner et al., 2011). Um diese primären Ziele in allen Situationen umsetzen zu können, ist das "smarte" Zusammenspiel aller Haustechnikkomponenten von höchster Bedeutung. Während die Datenerfassung der Sensorik und Steuerung der Aktuatorik über Dienste der Haustechnik geschieht, beruht die „Intelligenz“ in ThinkHome auf lernender Software. Dazu muss das Verhalten der jeweiligen Nutzer erkannt und verarbeitet werden. Darauf basierend können unterschiedlichste Ressourcen zu den jeweils ermittelten und damit energieeffizientesten Zeitpunkten automatisch bereitgestellt sowie Kontrollstrategien an aktuelle Gegebenheiten angepasst und so optimiert werden. Das System kann ohne manuelle Nutzereingriffe operieren, berücksichtigt diese aber jederzeit. Um höchstmöglichen Komfort bei gleichzeitiger Energieeffizienz zu erreichen, lernt das ThinkHome-System selbständig vom Gebäude und seinen Benutzern. So werden zum Beispiel thermische Trägheiten des Wohnraums erkannt und berücksichtigt. Durch den Einsatz adaptiver Kontrollstrategien kann eine Vielzahl bislang vernachlässigter Parameter in die Berechnungen einfließen (Gebäudestruktur und -hülle, Jahreszeit, Sonnenstand, ...), um Komfortaspekte mit den immer wichtiger werdenden Energieeffizienzüberlegungen in Einklang zu bringen. Integraler Systembestandteil ist eine umfassende Wissensrepräsentation (Ontologie), in der aller Daten hinterlegt werden können, die zur Optimierung der Energieeffizienz beitragen. Die Modellierung der Daten sowie deren Zusammenhänge nimmt einen wichtigen Stellwert im Gesamtsystem ein. Darüber hinaus benötigt ThinkHome Strategien zur Bewertung von und Auswahl zwischen potentiellen Maßnahmen. Aktuelle Werte und Prognosen hinsichtlich Umwelteinflüssen und Energiekosten werden dabei einbezogen, um so die Nutzung möglichst kostengünstiger und umweltfreundlicher Energie zu erreichen. Auch in diesem Bereich wird ein überwiegender Teil der Information eigenständig vom System eingeholt, ausgewertet und letztlich erlernt.

Einen Teilbereich der Intelligenz stellt die Tätigkeitserkennung dar. Ihr Ziel ist es festzustellen, ob sich Bewohner im Haus befinden, wo genau sie sich befinden (Anwesenheitserkennung) sowie anwesende Bewohner und ihre Tätigkeiten zu identifizieren (Kontext-Inferenz). Sofern letztere nicht starr festgelegt sind, muss das System auch hinsichtlich der Definition von Tätigkeiten lernfähig sein. Die zur Verfügung stehende Kontextinformation, wie eine (wahrscheinliche) zukünftige Anwesenheit, wird unter anderem dazu genutzt, um Vorlaufzeiten im System zu optimieren und damit weder Komforteinbußen zuzulassen noch Energie zu verschwenden.

Um die zu einer bestimmten Zeit in einem bestimmten Bereich im Eigenheim gewünschten Umgebungsbedingungen kosteneffizient herstellen zu können, sind Informationen über aktuelle Umgebungsbedingungen (z.B. Temperaturen, Sonnenstand, Eintragswinkel), die Gebäudestruktur (z.B. Wärmespeichervermögen) sowie deren aktuellen Zustand (z.B. ausgekühlte Mauern), die technische Gebäudeausrüstung/Haustechnik und somit mögliche Maßnahmen zur aktiven Beeinflussung der Umgebungsbedingungen, Kosten (Primärenergiebedarf) und Auswirkung dieser Maßnahmen notwendig.

Die Kontrollaufgaben können dabei komplex und von anderen Zuständen abhängig sein (z.B. beeinflusst die Jalousiestellung sowohl Helligkeit als auch Raumtemperatur abhängig von der Sonneneinstrahlung). Darüber hinaus können zur Lösung gegebener Kontrollaufgaben verschiedene Maßnahmen zielführend sein. ThinkHome bewertet diese zum Teil komplementären Strategien, wobei Erwartungswerte hinsichtlich Umwelteinflüssen und Energiekosten einbezogen werden, um (eventuell auch auf Vorrat gespeicherte) kostengünstige Energie zu nutzen.

Die Umsetzung all dieser Anforderungen in ein ganzheitliches System erfolgt schrittweise und geleitet von einer agentenbasierten Sichtweise. Aufbauend auf einem umfassenden Systemkonzept werden einzelne Teilaufgaben durch einen oder mehrere Agenten realisiert. Diese Vorgehensweise ist aus zwei Gründen besonders zielführend. Zum einen ermöglicht die Partitionierung des Systems in Agenten (Modularisierung) eine schrittweise Umsetzung und ebenso Verbesserung von Systemfunktionalitäten (z.B. Akquise von Wetterprognosen). Zum anderen ergänzen sich Agenten und Paradigmen der künstlichen Intelligenz hervorragend, besonders wenn Agenten gemäß dem BDI (*Belief/Desire/Intention*) Modell konzipiert und implementiert werden. *Beliefs* spiegeln dabei das Wissen des Systems über seine Umwelt und den aktuellen Zustand der Welt wider. *Desires* können als Repräsentation der Gesamtheit aller Ziele des Agenten bzw. des Gesamtsystems gesehen werden, *Intentions* hingegen als jene Ziele, die momentan erreicht werden sollen. Im Fall des ThinkHome-Projekts soll das oberste Ziel die Bereitstellung angenehmer Umgebungsbedingungen unter besonderer Berücksichtigung der Optimierung der Energieeffizienz sein. Agenten lösen diese Probleme durch Kooperation, Reaktion und Aktion und initiieren oder führen demnach auch Aktionen im Heim aus, wodurch ein intelligentes Zusammenspiel einzelner Haustechnikkomponenten realisiert wird. Ein Beispiel hierfür ist die Veränderung einer Ventilstellung ausgelöst durch einen Agenten, der die zukünftige Raumbelastung, die Wetterprognose sowie die unterschiedlichen Gewerke der Haustechnik kennt, um das globale Ziel Energiesparen zu realisieren.

Kapitel 2 des folgenden Endberichts erläutert die Hintergründe des Projekts. Abschnitt 2.1 beschreibt hierbei den Stand der Technik und der Forschung auf dem Gebiet künstliche Intelligenz und Smart Homes. Es werden Vorarbeiten zum Thema behandelt und die Neuerungen des Projekts gegenüber dem Ist-Stand erläutert. Im Abschnitt 2.2 dieses Kapitels wird auf die verwendete Methodik eingegangen. Das Kapitel 3 erläutert sodann die Ergebnisse des Projekts. Hierbei wird nach Behandlung der Requirementsanalyse und Systemspezifikation in Abschnitt 3.1 insbesondere auf die drei Schwerpunkte Wissensbasis (Abschnitt 3.2), Agentensystem (Abschnitt 3.3) und Kontrollstrategien (Abschnitt 3.4) eingegangen. Weiters wird in Abschnitt 3.5 ein Prototyp des ThinkHome-Systems vorgestellt. Die Abschnitte 3.5.1, 3.5.2 und 3.5.3 geben so einen Überblick über den prototypischen Einsatz des Systems und evaluieren den Testbetrieb. Darauf folgt in Kapitel 4 eine kritische Analyse des Bezugs zum Haus der Zukunft Plus Programm. Den Abschluss des Berichts bilden die Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen (Kapitel 5), gefolgt von einem Ausblick und potentiellen weiteren Verwertungsmöglichkeiten (Kapitel 6).

2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt

2.1 Beschreibung des Standes der Technik

Zum Thema künstliche Intelligenz in der Heimautomation existieren bereits einige Vorarbeiten. Der Fokus liegt hierbei zumeist auf ausgewählten Systemen der technischen Gebäudeausrüstung (Kalogirou, 2000; Yang et al., 2003). Die erste umfassende Anwendung, die die Steuerung von Haustechnik mit Mitteln der künstlichen Intelligenz in Angriff genommen hat, wurde von Mozer im Rahmen des Projekts „Adaptive Control of Home Environments“ (ACHE) vorgestellt (Mozer, 1998). ACHE verfolgte das Ziel Einstellungen, die von Bewohnern durchgeführt wurden, aufzuzeichnen und Muster daraus abzuleiten. Diese Muster dienten als Trainingsdaten für ein neuronales Netz (ANN). Ein Ziel von ACHE war es, die aufzubringende Energie niedrig zu halten. Eine Kostenfunktion erlaubte, das gewünschte Raumverhalten mit möglichst wenig Energieverbrauch zu ermitteln. Details über den Aufbau des ANN wurden jedoch nicht publiziert. Im Gegensatz dazu wurde im Rahmen des iDorm Projekts (Hagras et al., 2004) der Ansatz gewählt, Benutzerinteraktion über ein Fuzzy-Logik basierendes Expertensystem auszuwerten.

Jorge und Gonçalves konzentrierten sich auf automatisierte Gesundheitsüberwachung von älteren Personen (Jorge & Gonçalves, 2001). Zur Aufnahme von Daten schlagen sie den Einsatz von „intelligenten“ Gegenständen (Ubiquitous Computing Devices) vor. Im Vordergrund der Betrachtungen standen Strategien, die ermöglichten herauszufinden, ob Bewohner aktuell spezielle Wünsche haben. Für die Entscheidungsfindung (Klassifizierung) wurden wiederum ANNs eingesetzt.

Im Rahmen des Projekts MavHome wurde ein multi-agentenbasiertes System erarbeitet (Cook et al., 2003). Um das Benutzerverhalten zu lernen, werden Datentripel gesammelt, die das verwendete Gerät, die Zustandsänderung im Gerät und Zeit, die die Benutzerinteraktion

in Anspruch nahm, beinhalten. Auf den gesammelten Datenbestand werden Mechanismen des Data Minings angewendet und Episoden (Sequenzen) ermittelt. Entscheidungen werden basierend auf den Ausgaben eines hierarchischen Markov-Modells getroffen. Für die Aufnahme von Geräte-Statusinformation und Steuervorgängen kommen Agenten zum Einsatz, ebenso wie für das Sammeln und Erkennen von Mustern in den Datenbeständen. Agenten verwenden die Common Object Request Broker Architektur (CORBA) zur Kommunikation. Eine vergleichbare Aufgabenverteilung der Agenten wurde im Projekt MASBO gewählt (Qiao et al., 2006). Auch Davidsson und Boman präsentierten ein Multi-Agentensystem (Davidsson & Boman, 2003). Personal Comfort Agents repräsentieren die Bewohner; Room Agents verfolgen das Ziel, Energie einzusparen; Environmental Parameter Agents bilden das Interface zur Haustechnik; Bagde System Agents sind für das Personen-Tracking zuständig. Die Evaluierung des Ansatzes wurde allerdings nur durch ein stark vereinfachtes Raummodell durchgeführt, wobei in einem pro-aktiven Ansatz elektronische Terminkalender der Bewohner das Ein- und Ausschalten der HLK-Anlagen bestimmen.

Weitere Möglichkeiten für den Einsatz von künstlicher Intelligenz werden von Augusto und Nugent beschrieben (Augusto & Nugent, 2006). Angelehnt an das MavHome Projekt steht die Erkennung von diskreten Ereignissen im Vordergrund der Betrachtungen. Die Ereignisfolgen können mit Hilfe von maschinellen Lernverfahren (Entscheidungsbäume, fallbasiertes Schließen) ausgewertet werden.

Liang et al. stellen ein agentenbasiertes Framework für Smart Homes vor (Liang et al., 2002). Fünf Arten von Agenten werden unterschieden: Space Agents sind für das Interfacing mit Geräten zuständig; Function Agents sollen das Erreichen von globalen Zielen garantieren; Personal Preference Agents greifen bei der Ausführung von Kontrollstrategien auf Benutzervorgaben zurück; ein Resource Access Right Control Agent dient als Lookup-Service; der Environment Variable Server Agent unterstützt die Datenakquisition aus dem Internet. Die Autoren berichten von einer rudimentären Prototypentwicklung.

Zhang et al. verwendeten die Open Services Gateway Plattform zur Implementierung eines agentenbasierten Frameworks. Service Agents, die für das Erfassen von Daten, fallbasiertes Schließen und Schaltfunktionen zuständig sind, wurden in einer Gateway Architektur implementiert (Zhang et al., 2005). Für das Auffinden und Verwenden von Service Agents wurde das Universal Plug and Play (UPnP) Protokoll verwendet.

Während die beschriebenen Forschungsprojekte ähnliche oder gleiche Bausteine wie das ThinkHome-System nützen, haben sie einen entscheidenden Nachteil. ThinkHome propagiert ein ganzheitliches Systemkonzept, das unter Zuhilfenahme von breitem Domänen- und Expertenwissen erstellt wurde. Dabei zeigte sich, dass der von ThinkHome gewählte Ansatz (insbesondere die Kombination von Wissensbasis und Multi-Agentensystem) in dieser Form in einem Smart Home noch nie zum Einsatz gekommen ist und bislang in der Forschung auch wenig dokumentiert wurde. Durch die ganzheitliche Betrachtung wird sichergestellt, dass alle Anforderungen an ein Smart Home berücksichtigt werden können und vor allem auch dass diese im gemeinsamen Zusammenspiel innerhalb eines Gebäudes realisiert werden können. Vorhergehende Projekte liefern dazu wertvolle Vorarbeiten, wie Mechanismen zur Ereigniserkennung oder Agentenspezifikationen, aber

betrachten meist nur einzelne Aspekte eines Smart Homes. Darüber hinaus ist wenig vollständig spezifiziert oder dokumentiert, nur ein Bruchteil umgesetzt und viele Arbeiten auch nicht öffentlich verfügbar. Im Gegensatz dazu verfolgte ThinkHome stets die volle Verfügbarkeit aller Resultate. Diese Offenheit ist auch im Systemkonzept zu erkennen, das im Vergleich zu den Ansätzen in anderen Projekten offen für Erweiterungen in verschiedenste Richtungen und Technologien ist. Nicht zuletzt charakterisiert die Zusammenstellung und Kopplung verschiedener Technologien (prädiktive Regelung, Wissensbasis, Multi-Agentensystem) das ThinkHome-System als innovatives Projekt.

2.2 Verwendete Methoden

Die Entwicklung des ThinkHome-Gesamtsystems wurde zur Parallelisierung der Aufgaben in mehrere Abschnitte unterteilt:

Erster Punkt war hierbei das Durchführen einer Requirementsanalyse und Spezifikation des Gesamtsystems sowie Festlegung, wie das Gesamtsystem mit Hilfe von agentenbasiertem Engineering bestmöglich umgesetzt werden kann. Zu klärende Fragestellungen beinhalteten: Welche Energiesparpotentiale gibt es im Gebäude? Welche Ziele sind mit Hilfe von künstlicher Intelligenz besser zu erreichen? Wie sind Energiesparpotentiale mit Komfortparametern vereinbar? Aus welchen Komponenten besteht das agentenbasierte System? Welche Teilaspekte sollen prototypisch realisiert werden? An welchen Stellen kann eine sinnvolle Arbeitsaufteilung bei der Umsetzung stattfinden?

Im nächsten Schritt wurden alle Daten über Gebäude, Gebäudeparameter und Umgebungsbedingungen identifiziert, die für den erfolgreichen Einsatz von KI im Haus der Zukunft benötigt werden. Verschiedener Konzepte wurden evaluiert, wie dieses Wissen gespeichert, organisiert, verarbeitet und repräsentiert werden kann. Im Projektverlauf wurde eine Wissensrepräsentation umgesetzt, die die Kriterien des Forschungsprojekts am besten erfüllt. Abschließend wurden Agenten prototypisch implementiert, die die Schnittstelle zur Wissensbasis realisieren.

Parallel dazu wurden verschiedene Methodologien der KI hinsichtlich ihrer Eignung für ThinkHome evaluiert und jenes Paradigma umgesetzt, das die identifizierten Projektziele am besten erfüllen kann. Ein agentenbasiertes Framework wurde ausgewählt und aufgesetzt, das die Rahmenbedingungen für die Kommunikation innerhalb des Systems bereitstellt. Agenten wurden entworfen, die die Schnittstelle zwischen Benutzern und Systemen der Haustechnik zur Verfügung stellen, und als Avatare der Benutzer fungieren.

Unabhängig davon wurden Profil-basierte Steuerungs/Regelungsalgorithmen entworfen, die mit Mechanismen der künstlichen Intelligenz innovative Kontrollstrategien realisieren. Die Ansätze wurden exemplarisch in Agenten umgesetzt und getestet.

Die Evaluierung der Kontrollstrategien erfolgte auf zwei Arten: einerseits durch Simulation andererseits durch eine Feldstudie. Begleitend wurden wichtige Schritte im Projektverlauf dokumentiert und zur Qualitätskontrolle einem Reviewing-Verfahren im Rahmen der Dissemination unterzogen.

3 Ergebnisse des Projektes

3.1 Requirementsanalyse und Systemspezifikation

Während der Anforderungsanalyse wurden wissenschaftliche Vorarbeiten sowie verwandte, praktische und kommerzielle Projekte eingehend analysiert. Zum einen sollte dadurch ein Überblick über aktuelle technische Möglichkeiten gewonnen werden, um wichtige Aspekte für ThinkHome zu identifizieren. Zeitgleich wurde dafür der derzeitige Stand der Forschung im Bereich Energieeffizienz und Energiesparen und aktuelle Ausprägungen von Smart Homes erhoben. Zum anderen galt es, die Wiederverwendbarkeit von systemischen Ansätzen zu prüfen, um Doppelentwicklungen auszuschließen. Dabei zeigte sich, dass der von ThinkHome gewählte Ansatz (insbesondere die Kombination von Wissensbasis und Multi-Agentensystem) in dieser Form in einem Smart Home noch nie zum Einsatz gekommen ist und bislang in der Forschung auch wenig dokumentiert wurde.

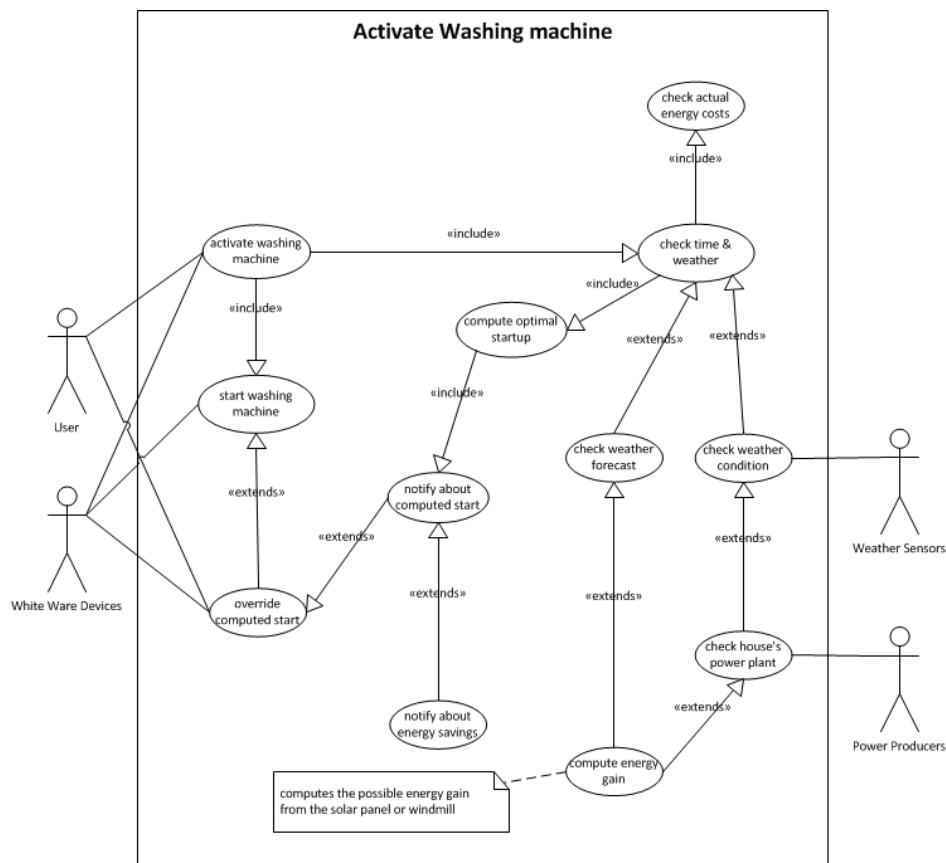


Abbildung 1: Use Case Diagramm für den Anwendungsfall „Waschmaschine aktivieren“

Im nächsten Schritt wurden Anwendungsfälle („Use Cases“) definiert, um das gewünschte zukünftige Systemverhalten zu spezifizieren. Ein exemplarischer Anwendungsfall ist in Abbildung 1 festgehalten. Um einen signifikanten Fortschritt zu gewährleisten, konzentrierten sich die Anwendungsfälle ausdrücklich nicht ausschließlich auf aktuell umsetzbare Konzepte sondern hielten vielmehr auch Szenarien fest, die sich erst in der nächsten Generation von Smart Homes wiederfinden werden (z.B. die automatische und systemautonome Nutzung

von Strom aus Photovoltaik für den Betrieb von Haustechniksystemen). Die Anwendungsfälle des ThinkHome-Projekts beschränken sich hierbei auf Anwendungsmöglichkeiten von Haus- und Automatisierungstechnik in privaten Haushalten. Durch den stetig steigenden Strombedarf von privaten Haushalten wird dieser Bereich, der bis jetzt eher in Bürogebäuden Anwendung fand, auch für den privaten Gebrauch interessant. Eine sorgfältige Evaluierung der Anwendungsmöglichkeiten und ihrer Zweckdienlichkeit wurde durchgeführt und erweiterte Möglichkeiten einer eingehenden Prüfung unterzogen, die der Einsatz von optimierten Kontrollsystemen basierend auf künstlicher Intelligenz in diesem Sektor bietet.

Im Zuge dieser Phase wurde, ausgehend von den identifizierten Anwendungsfällen, eine erste technische Beschreibung des Gesamtsystems erstellt, die die einzelnen Teile des ThinkHome-Systems erfasst und deren Zusammenspiel eingehend erläutert. Die verschiedenen Teilbereiche sind in Abbildung 2 veranschaulicht. Hierbei wird klar zwischen Agentensystem und Wissensbasis unterschieden. Weiters geht aus der Abbildung hervor, dass die Kontrollstrategien und intelligenten Mechanismen als Teil des Multi-Agentensystems gesehen werden können, während die Wissensrepräsentation als eigenständige Komponente über ein definiertes Interface angebunden wird.

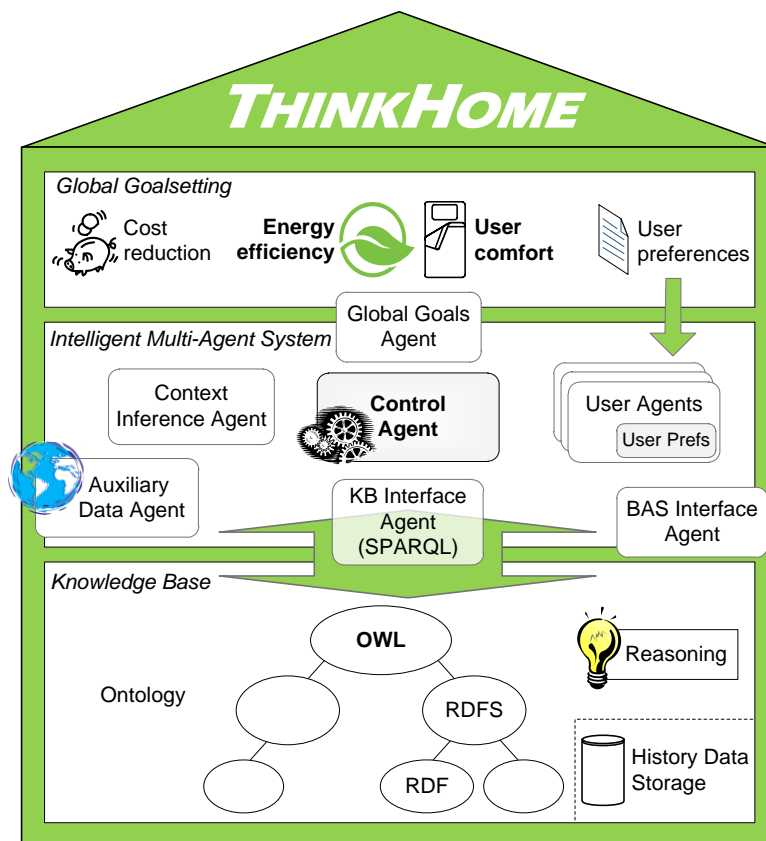


Abbildung 2: ThinkHome – Technische Systemübersicht

Als letzte Teilaufgabe wurde hierbei ein Grobentwurf des agentenbasierten Systems erstellt. Zusätzlich zur Partitionierung des Systems in die unabhängigen Teilsysteme Multi-Agentensystem und Wissensbasis wurden die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten definiert, um in der Folge die Entwicklung von Multi-Agentensystem und

Wissensbasis parallel durchführen zu können. In dieser Projektphase stellte sich heraus, dass das Agentenparadigma wesentlich mehr Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems hat als zu Projektbeginn angenommen. Im Besonderen ist das Multi-Agentensystem demnach nicht mehr nur ein reines auf die Implementierung beschränktes Softwarekonzept, sondern beherbergt vielmehr einen integralen Teil der Systemintelligenz in sich. Im Besonderen gilt dies, wenn wie im Rahmen dieses Projekts spezielle Agententypen eingesetzt werden (BDI-Agenten). Der Artikel (Reinisch et al., 2011a) behandelt unter anderem verschiedene Use Cases, für die ein derartiges System sinnvoll erscheinen. Weiters werden das Gesamtkonzept ausführlich beschrieben sowie anhand von konkreten Beispielen ausgewählte Funktionalitäten erläutert.

3.2 Wissensbasis

Bereits in der Analysephase wurde das Design der Wissensbasis grob skizziert. Es stellte sich somit bereits zu Beginn des Projektes heraus, dass der Prozess der Wissensmodellierung ein begleitender Aspekt des Projekts sein wird, der zwar, wie geplant, nach der Systemspezifikation beginnen, jedoch nicht bereits vor dem Agentendesign enden durfte. Die Konzeption sowie Umsetzung der Wissensmodellierung erwies sich im Ausmaß um einiges größer als erwartet und erstreckte sich somit bis zur Systemintegration. Die Wissensbasis änderte sich auch im Projektverlauf mehrmals, da erst während des Feindesigns des Agentenframeworks endgültig fixiert wurde, welche Konzepte in der Wissensbasis und welche im Agentensystem selbst realisiert werden. Im Rahmen der ursprünglichen Beschreibung der Wissensrepräsentation wurde festgelegt, dass alle für eine optimierte Steuerung und Regelung nötigen Daten in einer für Maschinen les- und verarbeitbaren Form aufbereitet werden müssen. Hierzu war geplant, verschiedene Modelle, die sich zur Datenspeicherung eignen, hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit für diese Forschungsaufgabe zu evaluieren. Bereits kurz nach Projektstart kristallisierte sich heraus, dass aufgrund der zu erwartenden Komplexität des zu entwickelnden Systems zahlreiche Optionen nicht in Frage kommen: Klassische relationale Datenbanksysteme konnten – aufgrund der Unzulänglichkeit ein derart komplexes System abzubilden – nicht länger in Betracht gezogen werden. Auch gilt es im Fall des ThinkHome-Projekts ein System zu entwickeln, das selbstlernende Eigenschaften aufweist. Die Möglichkeit der logischen Inferenz fehlt jedoch in einer relationalen Datenbank. Demgegenüber kann die zweite im Projektantrag erwähnte Darstellungsart, die Ontologie, als eine Art semantisches Netz gesehen werden. Ein solches Netz erweitert klassische semantische Modelle um die Möglichkeit der Definition von Regeln und Axiomen. Dadurch eignet sich eine Ontologie im Vergleich zu klassischen semantischen Netzen besser zur Wissensrepräsentation. Diese Gründe führten früher als geplant zur Entscheidung die Semantic Web Technologie der Web Ontology Language (OWL) als Wissensrepräsentation für das ThinkHome-System einzusetzen. Nicht zuletzt aufgrund dieser frühen Entscheidung konnte die Realisierung als Ontologie auch bereits in der Systemspezifikationsphase berücksichtigt werden. Ungeachtet dessen ist im ThinkHome-Projekt für einen Verlaufsspeicher (History Storage), für den keine

hohe Komplexität und kein logisches Schlussfolgern nötig ist, eine relationale Datenbank vorgesehen.

OWL ist im Forschungsgebiet der künstlichen Intelligenz eine immer beliebter werdende Art Wissen zu repräsentieren. Dies folgt nicht nur aus der Tatsache, dass OWL als die bedeutendste Sprache der Semantic Web Initiative gesehen werden kann: Weiters wird durch die Restriktion von OWL auf Beschreibungslogik (Description Logic), das logische Schlussfolgern entscheidbar. Diese Sprachausprägung, OWL-DL, erlaubt es somit mit einem logischen Reasoner DL-Reasoning zu betreiben und implizit vorhandenes Wissen sichtbar zu machen. Diese Art der Schlussfolgerung kann im Allgemeinen für zwei Haupt-Einsatzgebiete verwendet werden, einerseits um unvollständiges Wissen zu vervollständigen und andererseits um in der Wissensbasis spezielle Klassen zu definieren, welchen automatisch durch den Prozess des Reasonings Mitglieder zugewiesen werden können. In Bezug auf ein Smart Home ergeben sich hierbei eine Vielzahl von Anwendungen: Beispielsweise kann durch Inferenz eine Bestimmung der Stand-by-Geräte erfolgen, indem eine Klassifizierung in eine exakt definierte OWL-Klasse erfolgt. Somit können Abfragen bereits direkt in der Wissensbasis beantwortet werden, was zu einem vollständigeren Abbild der modellierten Domäne führt als es mit klassischen relationalen Datenbanken möglich wäre.

Als Wissensrepräsentation erlaubt OWL die Entwicklung eines Schemas und der Instanzierung dieses Schemas, wie auch von relationalen Datenbanken bekannt. Hierbei unterscheidet OWL prinzipiell zwischen drei verschiedenen Hauptkonstrukten. Konzepte (*Concepts*) sind Klassen oder Gruppen von Einträgen. Diese können in einer OWL-Ontologie hierarchisch angeordnet und mittels Axiomen beschrieben werden. Mitglieder dieser Gruppen werden *Individuals* genannt. Dies sind konkrete Instanzierungen einer allgemeinen Gruppenbeschreibung. Ein Beispiel dafür wäre das südliche Wohnzimmerfenster „SouthWindowLivingRoom“ als Mitglied der Gruppe Fenster („Window“). Um Beziehungen zwischen Klassen sowie zwischen Klassen und Datentypen herzustellen, sieht OWL sogenannte *Properties* vor. Hierbei gibt es wiederum zwei verschiedene Ausprägungen: Einerseits existieren *Object Properties* für Beziehungen zwischen Klassen. Ein Beispiel hierfür wäre ein Property „containsWindow“, das die beiden Konzepte „Wall“ und „Window“ verbindet und somit die Lage eines Fensters im Gebäude und in einer bestimmten Wand dieses Gebäudes beschreiben kann. Die zweite Art sind sogenannte *Datatype Properties*, die eine Klasse mit einem bestimmten Datenwert verbinden kann. OWL-Datentypen orientieren sich hierbei an XML-Schema Datentypen, wobei auch selbstdefinierte Restriktionen möglich sind. Hierbei wäre beispielsweise die Zuordnung einer ID zu einem Fenster über das Datatype Property „hasIdValue“ möglich, wobei der Wert der ID selbst als einfacher XSD:Integer Datentyp repräsentiert wird.

```
BuildingPart
and (containsAdjacentSpaceId some AdjacentSpaceId)
and (hasExposedToSunValue value true)
```

Listing 1: Axiom zur Definition des Konzepts „ExternalWall“

In OWL werden weiters Axiome genutzt, um Eigenschaften von Klassen näher zu beschreiben. Listing 1 zeigt ein Axiom in Manchester Syntax, das in ThinkHome benutzt wird, um das Konzept „ExternalWall“ zu beschreiben. In ganzen Sätzen beschreibt diese Definition hierbei alle Einträge in der Datenbank, die ein Teil der Gebäudestruktur sind („BuildingPart“) und einen angrenzenden Raum besitzen sowie dem Sonnenlicht ausgesetzt sind. Die Form dieser Axiome folgt im OWL-DL der Beschreibungslogik. Da diese eine entscheidbare Untermenge der Prädikatenlogik ist, wird das automatische Schließen auf gespeicherten Fakten möglich.

Um das Schlussfolgern in einer OWL-DL Ontologie durchzuführen, wird eine zusätzliche Softwarekomponente, ein sogenannter DL-Reasoner benötigt. Es gibt hierfür eine große Auswahl an Implementierungen. Für das ThinkHome-Projekt wurde der bekannte Pellet OWL-DL Reasoner verwendet. Das Reasoning in OWL-DL erlaubt die Beantwortung der folgenden globalen Inferenzprobleme: **Subsumption** behandelt die Frage, ob eine Klasse oder ein Konzept genereller oder spezieller ist als eine andere. **Äquivalenz** umfasst die Kontrolle, ob zwei Konzepte die gleichen Sachverhalte beschreiben, d.h., sie immer dieselben Mitglieder enthalten. **Konsistenz** bedeutet, ob ein Konzept jemals Mitglieder enthalten kann, mit anderen Worten, ob die Sinnhaftigkeit eines Konzepts gegeben ist. Das vierte Problem ist die **Zugehörigkeit**, wobei hierbei geprüft wird, ob einzelne konkrete Einträge als Mitglieder einem Konzept zugeordnet werden können. Allgemein betrachtet erlaubt *Subsumptions-Reasoning* Subklassenbeziehungen automatisch zu erkennen und somit Hierarchien zwischen gespeicherten Informationen automatisch herzustellen. *Membership-Reasoning* andererseits ordnet konkrete Einträge (*Individuals*) einzelnen Klassen (*Concepts*) in der Ontologie zu.

Während der Designanalyse der ThinkHome-Wissensbasis wurden verschiedene Domänen identifiziert, die für die Umsetzung einer Smart Home-Wissensrepräsentation von besonderer Bedeutung sind. Diese Domänen führten zu einer Aufteilung der Wissensbasis in mehrere weitgehend unabhängige Ontologien, die über definierte Konzepte und Eigenschaften miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Die sogenannte **BuildingInformation** Ontologie, bildet architektonisches sowie bauphysikalisches Wissen über das System ab. Beispielsweise werden in diesem Teil der Wissensbasis die Orientierung des Gebäudes und der Räume, die Wandstärken, die Fläche oder Anzahl der Fenster sowie bauphysikalische Kennwerte (U-Wert einer Wand, Transmissionswert eines Fensters) dem autonomen Smart Home-System zur Verfügung gestellt. Ein weiterer Teil der Wissensbasis, **EnergyAndResourceInformation** beschränkt sich auf die Abbildung von Energieinformationen und dazugehörigen Gerätschaften im Gebäude. Hierbei werden neben aktuellem Status und Energieverbrauch oder -produktion von gebäudeinternen Anlagen sowie Einrichtungen auch externe Energiedienstleister sowie deren Tarifinformationen abgebildet. Die Teilontologie **ComfortAndActorInformation** widmet sich der Beschreibung von Benutzerpräferenzen sowie -informationen. Hierunter fallen Informationen, wie das Alter und Geschlecht der Benutzer, bevorzugte Raumtemperaturen oder An- bzw. Abwesenheitszeiten. Die Ontologie über **ProcessInformation** enthält neben Prozessen, die vom System zur Erreichung eines Wunschzustandes gestartet werden können (z.B. Öffnen

eines Fensters zur Verbesserung der Luftqualität oder Start der Klimaanlage zur Verringerung der Raumtemperatur) auch die Repräsentation von erkannten Verhaltensprofilen sowie -mustern. Die letzte wichtige Einflussgröße in einem Wohngebäude sind äußere Faktoren, wie Wetter oder Klima. Diese werden in einer dedizierten Wetter-Ontologie (**ExteriorInfluences**) abgebildet. Diese Ontologie modelliert unterschiedliche äußere Gegebenheiten und Prognosen für das System und ermöglicht diesem somit die Berücksichtigung der repräsentierten Situationen in Kontrollstrategien und Prozessablaufplänen. Hiermit wird zusätzlich zu den Einflüssen im Inneren des Gebäudes auch die äußerliche Dimension berücksichtigt und Werte, wie prognostizierte Sonneneinstrahlung, Regenwahrscheinlichkeit oder Windstärke und -richtung, abgebildet. Gemeinsam ergeben diese fünf Teilgebiete die ThinkHome-Wissensbasis, die im Weiteren vom Multi-Agentensystem genutzt werden kann, um auf Gegebenheiten richtig zu reagieren und bestehende Möglichkeiten auf die beste Art und Weise auszunutzen. Im Folgenden werden die einzelnen Teilontologien, die im ThinkHome-Projekt umgesetzt wurden, genauer beschrieben und Beispiele des darin repräsentierten Wissens gegeben.

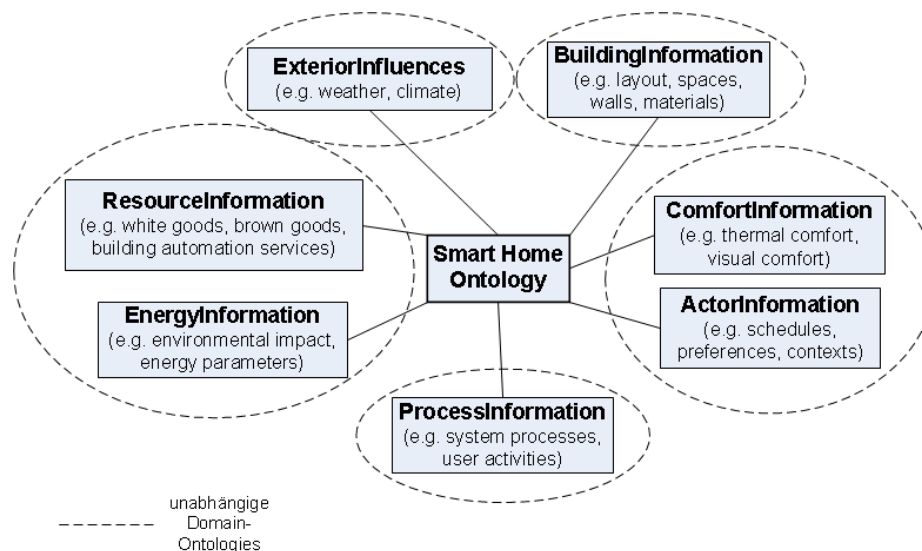


Abbildung 3: High-Level Überblick der dargestellten Domänen in der ThinkHome-Wissensbasis. Die Wissensbasis teilt sich in 5 unabhängige Domänen-Ontologien, die die wichtigsten Parameter für ein autonomes Smart Home-System enthalten: Wetter und externe Einflüsse, Gebäudeinformationen, Komfort und Benutzervorlieben, Prozesse und Verhaltensprofile sowie Energieinformation und Gerätschaften

Der erste Teil, *Building Information*, umfasst Gebäudeinformationen, um Daten über die Gebäudestruktur sowie Gebäudehülle für eine effiziente Steuerung/Regelung zu berücksichtigen. Da bereits vorhandene Daten über die Gebäudestruktur sowie Gebäudehülle (u.a. aus der Planung) nicht nochmals gesondert manuell erfasst werden sollten, wurde nach einem offenen Austauschformat (Building Information Model, BIM) gesucht, das diese Daten bereits enthält und von dem die Daten möglichst automatisiert übernommen werden können. Hierfür bot sich die Autodesk Gruppe als einer der vorherrschenden Architektursoftwarehersteller und das Building Information Model gbXML als offenes Austauschformat zwischen Architektur- und Energiesimulationsprogrammen an. Als erster Schritt wurde sodann im Autodesk Revit ein Modell eines Hauses erstellt, das über

das gbXML Format exportiert und in das Energiesimulationsprogramm Ecotect importiert wurde. Dort konnte das Modell um wichtige energietechnisch relevante bauphysikalische Parameter erweitert werden. Dieses Gebäudemodell wurde darauffolgend wiederum im globalen Austauschformat gbXML gespeichert.

Im Rahmen des ThinkHome-Projekts wurde folgend eine Transformation erstellt, die die Informationen über das Gebäude vom gbXML Format in das gewünschte OWL-Format überführt und sie somit dem ThinkHome-System verfügbar macht. Dieser Transformationsprozess wird in (Kofler & Kastner, 2010) genauer beschrieben. Aus der Transformation folgend wird es möglich, Informationen von einem beliebigen Gebäude, das im globalen Austauschformat gbXML spezifiziert ist, in das ThinkHome-System zu integrieren. Die Gebäuderepräsentation wurde erweitert, um möglichst logische Gruppierungen und Klassifizierungen von Parametern zu erhalten. Dies ist notwendig, da in der Web Ontology Language weit mehr Möglichkeiten bestehen als beispielsweise im gbXML Schema. Bei diesem manuellen Modellierungsschritt wurde darauf geachtet, dass eine „Neueinspielung“ eines Gebäudes möglich sein muss, ohne die ThinkHome-Wissensbasis neu zu modellieren. Das bedeutet, dass jederzeit ein beliebiges gbXML Hausmodell in die ThinkHome-Wissensrepräsentation überführt werden kann, ohne die manuell ergänzten Erweiterungen des OWL-Modells zu verlieren.

Ein weiterer Schwerpunkt der Wissensbasis ist die Darstellung von Informationen über Haustechniksysteme in der *Energy and Resource Information* Ontologie. Hierbei sollen insbesondere zugrundeliegende Geräte und Kommunikationsprotokolle analysiert und technologieunabhängig zugänglich gemacht werden. Ein integrativer Ansatz, der alle unterschiedlichen Gewerke mit einbezieht, steht hier im Vordergrund. In diesem Fall ist eine Ontologie die richtige Wahl, da eine technologieunabhängige Sichtweise auf die unterliegenden Gewerke und Technologien gewährt werden kann. Eine Erweiterung einer bestehenden Ontologie für Gebäudeautomation um die im ThinkHome-Anwendungsfall zentralen Energieaspekte wurde durchgeführt (Kofler et al., 2011a) und somit Mess- und Stellwerte aus Haustechniksystemen bestmöglich berücksichtigt. Ein Teilaspekt dieser Ontologie beschreibt Konzepte, die im Zusammenhang mit Energie stehen. Dazu zählen vor allem eine allgemeine Beschreibung von Energieverbrauch und -bedarf sowie konkrete Objekte, wie Energiearten inklusive erneuerbarer Energieträger, Energieversorgungsunternehmen, und die Modellierung von Energieverbrauchern, deren Operationsmodi (z.B. Stand-by) und konkreter Energieverbrauch. Durch die Ontologie wird es dem Smart Home-System unter anderem ermöglicht, günstige und ökologisch produzierte Energie für den Betrieb von Geräten auszuwählen. Ebenso unterstützt die Ontologie die Integration von *Smart Grid* und *Demand Side Management* Anwendungen sowie energetische Auswertungen (Gesamtverbrauch, Verbrauch nach Gerätesparten, ...) und eine Energiebedarfsvorhersage im ThinkHome-System (Kofler et al., 2012a; Kastner et al., 2012).

Zur Verdeutlichung der Darstellung von Informationen in einer Ontologie zeigt Abbildung 4 hierfür ein Beispiel eines speziellen elektrischen Energieverbrauchers, nämlich eines elektrischen Zusatzheizgeräts.

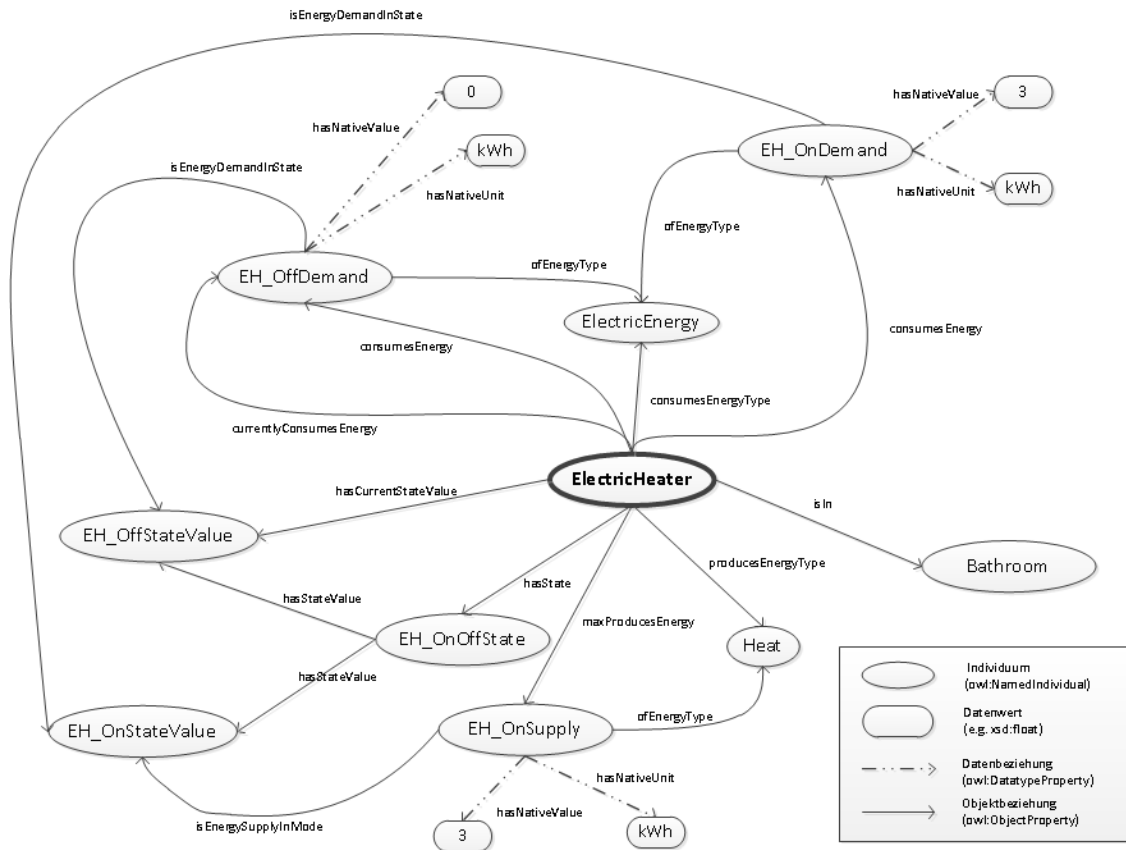


Abbildung 4: Konkrete Abbildung einer energiewirksamen Gerätschaft in der Wissensbasis. Gezeigt werden unter anderem die möglichen Zustände des Geräts sowie dessen Energieverbrauch und -produktion in den einzelnen Zuständen. Ebenso sind die Art der benötigten und zur Verfügung gestellten Energie sowie der Standort der Gerätschaft abgebildet.

Im vorliegenden Fall gibt es zwei Stati, die der Heizer annehmen kann: „On“ und „Off“. Dieses Faktum wird in der Wissensbasis über die Kombination der Beziehungen „hasState“ und „hasStateValue“ abgebildet. Die Beziehung „hasState“ legt fest, welche Art der Kontrolle möglich ist. In diesem Fall handelt es sich demnach um ein Gerät, das zwei diskrete Zustände erlaubt (*EH_OnOffState*). An diesem Gerätestatus sind die möglichen Werte, die dieser annehmen kann, über ein weiteres Object Property „hasStateValue“ verknüpft: Diese Zustandswerte (*EH_OnStateValue*, *EH_OffStateValue*) beinhalten unter anderem die Kommandos, die das Gerät veranlassen, einen bestimmten Status einzunehmen. Weiters wird über diese Zustandswerte eine Beziehung zum zugehörigen Energieverbrauch des Geräts hergestellt. Hierfür wird für den Energieverbraucher selbst über das Object Property „consumesEnergy“ der Energieverbrauch des Gerätes im jeweiligen Status abgebildet. Im Beispielfall gibt es den Verbrauch im „Off“-Modus (*EH_OffDemand*) an, der mit 0kWh angegeben ist, und den Verbrauch des Heizers im „On“-Modus (*EH_OnDemand*) mit einem charakteristischen Wert von 3kWh an. Diese Einträge sind wiederum über eine Beziehung „isEnergyDemandInState“ mit dem jeweiligen Zustand des Geräts verbunden, um eine direkte Abfrage des Energieverbrauchs über den Statuswert zu ermöglichen. Als weitere Information ist aus der Abbildung ersichtlich, dass es sich beim gezeigten Energieverbrauch um Verbrauch elektrischer Energie handelt, was in der Wissensbasis über die Beziehung

„ofEnergyType“ abgebildet wird. Die konkreten Verbrauchswerte könnten der technischen Spezifikation des jeweiligen Gerätes entnommen und manuell über eine Benutzerschnittstelle in die Wissensbasis eingepflegt werden. Es ist jedoch auch möglich, dass zukünftig Geräte diese Werte über einen Informationsmechanismus bereits automatisiert bereitstellen, sobald sie an ein Gebäudenetzwerk angeschlossen werden. Dadurch könnten gerätespezifische Werte automatisch vom Gebäudeautomationssystem ausgelesen und in die Wissensbasis übernommen werden. Abgesehen von Verbrauchsenergie produziert dieses Gerät auch Energie. Dies wird wiederum über ein eigenes Property „maxProducesEnergy“ abgebildet. Hierbei wird dasselbe Modellierungsschema verwendet wie beim bereits besprochenen Energieverbrauch.

Um den aktuellen Status eines Gerätes abzubilden, wurden zwei weitere Beziehungen definiert. Die Beziehung „hasCurrentStateValue“ spezifiziert für eine Anlage, in welchem Zustand sie sich momentan befindet. Im konkreten Beispielfall (vgl. Abbildung 4) befindet sich daher der elektrische Heizer im Zustand mit dem Wert *EH_OffStateValue*. Der Reasoning-Mechanismus der OWL-Ontologie kann folgend aus den semantischen Zusammenhängen selbständig den aktuellen Energieverbrauch des Geräts ermitteln und diesen über die Beziehung „currentlyConsumesEnergy“ in der Wissensbasis darstellen, d.h., es ist ersichtlich, dass der Heizer im Moment keine elektrische Energie verbraucht (*EH_OffDemand/0kWh*). Das beschriebene Beispiel zeigt, wie mit Reasoning die vorhandene Information über ein Gerät erweitert bzw. vervollständigt werden kann. Ebenso können weitere Beziehungen, wie „consumesEnergyType“ und „producesEnergyType“ automatisch vom Reasoning-Mechanismus der Ontologie hergestellt werden. Weitere Beziehungen stellen Schnittstellen zu anderen Domänen dar. Als Schnittstelle zur Building Information Ontology kann exemplarisch die Beziehung „isIn“ gesehen werden. Der damit verbundene Eintrag beschreibt den Raum, in dem das abgebildete Gerät zu finden ist. In der Energy and Resource Information Ontology selbst ist dies jedoch nur ein Verweis auf einen bestimmten Raum, der wiederum in der Building Information Ontology exakt beschrieben und mit bauphysikalischen Details dargestellt wird.

Der eben beschriebene Ontologieteil bildet somit im Speziellen den aktuellen Status aller im Gebäude verbauten Geräte ab. Länger andauernde Prozesse, wie Benutzerprozesse (Kontextbewusstsein) oder Systemprozesse (automatische Kontrolle von z.B. Belüftung), sind in diesem Bereich jedoch noch nicht beschrieben und werden in einem weiteren eigenständigen Ontologiebereich umgesetzt. Dieser bereits im Überblick erwähnte Teil stellt eine Brücke zu den profilbasierten Kontrollstrategien dar, da verschiedene Profile und Muster in der Ontologie repräsentiert werden und dahingehend bereits in der Ontologie eine Kategorisierung realisiert wird. Die Teilontologie *Process Information* beschreibt hierfür einerseits verschiedene Prozessklassen, die für ein Smart Home von Bedeutung sind. Hierunter fallen zum Beispiel Prozesse, mit denen die Luftgüte verbessert werden kann oder auch Prozesse für das Heizen oder Kühlen des Gebäudes. Ebenso wird in diesem Teil eine gerätezentrische Sichtweise auf Prozesse modelliert, die Geräte beschreibt, die mit einem bestimmten Prozess in Verbindung stehen. Beispielsweise ist es hierbei möglich, das Öffnen oder Schließen eines Fensters als „Lüftungsprozess“ (*AiringProcess*) bereits in der Ontologie

zu beschreiben. Axiome definieren weiters den Einfluss des Prozesses auf verschiedene Gebäudeparameter. Diese Beschreibung befähigt das Multi-Agentensystem im Folgenden mögliche Prozesse anhand der gewünschten Parameteränderung zu wählen.

In Bezug auf profilbasierte Regelungsstrategien wurden in dieser Ontologie mehrere Hierarchien definiert. Laut Definition in verschiedenen Publikationen über profilbasierte Kontrollstrategien im Rahmen des ThinkHome-Projekts wurden Profile in mehrere Unterklassen unterteilt. Hierbei wurde zwischen verschiedenen Nutzungsprofilen (z.B. Anwesenheit, Lichtstatus, Fensterstatus), wie auch Sollwertprofilen (z.B. Luftfeuchtigkeit, Temperatur oder Lichtstärke) unterschieden. Auch speziellere Gruppierungen, wie Profile der manuellen Benutzeranpassungen von Lichtstärke oder Temperatur, sind in einer eigenen Hierarchie repräsentiert. Abgesehen von Einzelprofilen, die Sensordaten über einen bestimmten Zeitraum zu Abbildungen der Realität zusammenfassen, werden in dieser Ontologie auch Verhaltensmuster repräsentiert, die von einem Clustering-Mechanismus im Rahmen der implementierten Kontrollstrategien generiert werden (vgl. Abschnitt 3.4). Hierbei wurden wiederum Klassifizierungen definiert, die neben generellen Verhaltensmustern, wie Raumtemperatur oder Luftfeuchtigkeit, auch eine zeitliche Unterscheidung von Mustern in Tagesmuster (*SingleDayPattern*), Muster der kürzlichen Vergangenheit (*LastDaysPattern*) oder jahreszeitlich bedingte Muster (*SeasonalPattern*) modellieren. Ein weiterer Fokus dieser Teilontologie sind Agentenziele (*Applications*). Diese Ziele können in weiterer Folge von Verhaltensprofilen beeinflusst und durch verschiedene Prozesse realisiert werden. Die dargestellten Ziele wurden dafür in Komfort-, Effizienz- und Diagnoseziele unterteilt.

Die Teilontologie für Benutzerinformationen und Komfortpräferenzen ist ein relativ kleines Teilgebiet der Smart Home-Wissensbasis und enthält größtenteils die vom Benutzer manuell eingestellten Komfortparameter. Im Teil *Comfort and Actor Information* werden die Benutzerpräferenzen sowie weitere Informationen über die Aktoren im System abgelegt. Aktoren können hierbei menschlich sein, jedoch werden in der Ontologie auch Systemaktoren, wie Software-Agenten, abgebildet. Für menschliche Aktoren werden demographische Daten, wie Geschlecht und Alter, abgespeichert, für Systemaktoren eigene Daten, wie die maximale Lebenszeit und das Anwendungsgebiet. Komfortinformationen über gewünschte Temperatur, Beleuchtung sowie maximaler Lärmpegel werden über Benutzerpräferenzen abgebildet. Diese können vom Benutzer raumweise oder gebäudeweit spezifiziert werden, um beim Hochfahren des Systems zur initialen Parametrierung von Kontrollagenten sowie -strategien verwendet zu werden. Die Eingabe von Komfortpräferenzen erfolgt im ThinkHome-System derzeit manuell in die Wissensbasis, da eine Umsetzung mittels graphischer Benutzerschnittstelle im Rahmen des Projekts nicht vorgesehen war. Weiters wurden in diesem Teil Konzepte umgesetzt, die die Einteilung in zufriedene und unzufriedene Systembenutzer erlaubt.

Der letzte fehlende Teilaspekt der ThinkHome-Wissensbasis sind externe meteorologische Einflüsse, die in der *Exterior Influences* Ontologie modelliert wurden. Hierbei wurde im Rahmen des Projekts ein Importmechanismus für Wetterdaten von einem Wetterservice-Provider erstellt, über den das System regelmäßig neue Daten vom Service-Provider abholen und diese lokal in der ThinkHome-Wetter-Ontologie ablegen kann. Der gewählte

Wetterdienst liefert eine Vielzahl von signifikanten Wetterparametern. Nach Transformation der Daten in eine OWL-Repräsentation ist es einerseits möglich, durch automatisches Schlussfolgern ungünstige Wettersituationen zu erkennen, die die Ausführung bestimmter Prozesse verhindern. Andererseits können günstige Wettervorhersagen vom System dazu verwendet werden, energieintensive Prozesse zu verschieben und dadurch frei verfügbare Energie aus der Wettersituation zu nutzen. Aufgrund spezieller, in der Ontologie konkret definierter Wettersituationen ist es möglich, die Rohdaten in unterschiedliche Wetterkategorien einzuteilen. Diese können nun für durchzuführende Prozesse entweder förderlich sein (z.B. sonniges Wetter für die Erzeugung von Energie aus Photovoltaik) oder eben die Ausführung gewisser Prozesse verhindern (z.B. das Öffnen der Fenster bei Unwetteralarm) und somit die energieoptimale Kontrolle des Gebäudes positiv oder negativ beeinflussen. Beispielsweise verhindert ein Regenschauer das Öffnen eines Dachfensters, um die Luftqualität im angrenzenden Wohnzimmer zu steigern. Andererseits kann ein energieintensiver Prozess, wie das Kühlen eines Raumes in Abhängigkeit von Anwesenheitsprofilen sowie effektiver Anwesenheit, auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden, für den eine kühle Schönwetterlage prognostiziert wurde. Der Artikel (Kofler et al., 2012b) beschäftigt sich detailliert mit der Darstellung von Wetterinformationen zur automatisierten Regelung eines Wohngebäudes und stellt eine Wissensbasis vor, die Wetterdaten von einem Internet-Wetterserviceanbieter übernimmt und als OWL-Ontologie repräsentiert.

3.3 Multi-Agentensystem

In einem Smart Home müssen Kontroll- und Verwaltungsaufgaben in einer dynamischen, nicht-deterministischen und komplexen Umgebung durchgeführt werden. Üblicherweise ist dabei die Kontrolle des Smart Homes über mehrere Gerätschaften verteilt, die untereinander ohne zentralen Hausservers kommunizieren. Dies beeinflusst natürlich auch die Komplexität der Software, die zur Kontrolle einer derartigen Umgebung benötigt wird. Bei Implementierung eines komplexen Systems dieser Größenordnung erscheint es naheliegend, auf traditionelle und bereits etablierte Software Engineering Techniken zurückzugreifen. Praktische Implementierungen sowie Testsysteme auf diesem Gebiet zeigen jedoch, dass der Aufwand, eine Software für ein derartig verteiltes System zu entwerfen, zu implementieren, zu testen und zu pflegen, sehr groß ist und dadurch die Vorteile eines derartigen Systems oft schnell von Nachteilen durch Wartung und Instandhaltung übertroffen werden. Weiters können mit klassischen Systemen bestimmte gewünschte Eigenschaften nur sehr schwer erreicht werden. Ein Beispiel hierfür wäre die Möglichkeit, unvollständige oder falsche Informationen über den Zustand der Umgebung möglichst gut zu kompensieren, ohne in der Funktion beeinträchtigt oder gestört zu werden. Unter diesen Gesichtspunkten können traditionelle Technologien nicht als optimale Lösung angesehen werden, da sie im Allgemeinen für Systemumgebungen entwickelt werden, die sich während der Programmausführung nur selten oder gar nicht ändern. Von einem Smart Home-System wird jedoch erwartet, dass es flexibel auf Statusänderungen reagieren kann

und Erweiterungsmöglichkeiten bietet, d.h., dass beispielsweise neue Benutzer oder Geräte mit relativ geringem Aufwand in das System integriert werden können.

Als Lösung bietet sich hierbei eine agentenzentrierte Sichtweise an, die auf niedriger Kopplung und zielgerichteten Softwareentitäten basiert. Um ein Smart Home in Bezug auf Energieeffizienz und Benutzerkomfort möglichst optimiert zu betreiben, wird entweder eine hohe Benutzerinteraktion mit dem System benötigt oder das System selbst muss eine Art inhärenter Intelligenz aufweisen. Ein derartig „smartes“ System sollte Routineaufgaben autonom für den Benutzer erledigen und nicht auf Benutzereingaben angewiesen sein (Reinisch et al., 2011b). Diese Forderung nach einem intelligenten und autonomen System ist ein weiterer Indikator für den Einsatz von agentenorientierter Softwareentwicklung.

Agentenorientiertes Design ist eine logische Weiterentwicklung des objektorientierten Softwareparadigmas. Vom Standpunkt der Informatik können Agenten als unabhängige Softwarekomponenten gesehen werden, die spezifische Funktionalitäten des Systems kapseln und untereinander interagieren, um bestimmte Aufgaben zu lösen. Agenten bieten jedoch noch zusätzliche Vorteile, die in einem verteilten System im Allgemeinen nicht vorhanden sind: Wird die Agentenspezifikation auf „intelligente Agenten“ erweitert, die auch als *rationale Agenten* bezeichnet werden, so ergeben sich dadurch erweiterte Möglichkeiten. Die wichtigsten dieser Zusatzeigenschaften sind Autonomie, Reaktivität, Proaktivität und soziales Verhalten. Ein großer Vorteil von Softwareagenten ist hierbei ihre autonome Handlungsfähigkeit, basierend auf beobachteten Ereignissen in ihrer Umgebung (z.B. durch Wissensakquisition aus der globalen Wissensbasis) oder gänzlich unabhängig von externen Einflüssen. Autonome Agenten können dafür auch mit anderen Agenten kooperieren, um komplexere Aufgaben zu lösen. Das dadurch realisierte System stellt eine Art der künstlichen Intelligenz dar, das auch *Multi-Agentensystem* (MAS) genannt wird.

Multi-Agentensysteme sind somit ein Paradigma der künstlichen Intelligenz, da sie inhärente Intelligenz aufweisen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des ThinkHome-Projekts neben dem Studium der „klassischen“ KI-Methoden (vor allem zur Nutzung in neuartigen Kontrollalgorithmen) auch die Analyse und Entwicklung eines Multi-Agentensystems durchgeführt. Während erstgenannte KI-Methoden für die Entwicklung von profil-basierten, energieoptimierten Kontrollstrategien analysiert und adaptiert wurden, steht bei der Intelligenz des MAS die „smarte“ (u.a. situationsbezogene) Auswahl von verschiedenen zur Verfügung stehenden Kontrollstrategien im Vordergrund. Diese Auswahl soll durch das MAS in enger Abstimmung mit der Wissensbasis automatisch getroffen werden.

Im Bereich des agentenbasierten Designs wurden zu Beginn verschiedene Agentenansätze (reaktive Agenten, deduktive Agenten, practical reasoning Agenten) analysiert und ihre Einsetzbarkeit in ThinkHome bewertet. Während Agentensysteme hierbei generell für die Umsetzung von Smart Home-Systemen geeignet erscheinen, können nicht alle Agentenarten tatsächlich als einsetzbar bewertet werden. Im Speziellen hat die Wahl eines bestimmten Agententypen in diesem Fall Auswirkungen auf die Implementierung der Anforderungen eines derartigen Systems und ob diese überhaupt mit der gewählten Agentenart erfüllt werden können. Im Rahmen des ThinkHome-Projekts liegt der Fokus

daher auf autonomen Agenten, die ohne Benutzereingriff handeln und auf interne sowie externe Ereignisse reagieren können.

Auf den ersten Blick erscheint ein *reaktiver Agent* ausreichend, um diese Eigenschaften zu erfüllen: Dieser Agententyp erlaubt einerseits das Erfassen der Umgebungssituation sowie das Handeln aufgrund seiner Wahrnehmungen und benötigt andererseits kein explizites Umgebungsmodell. Weiters ist dieses Konstrukt nicht auf Benutzerinteraktion angewiesen und kann automatisch eine Auswahl der nächsten auszuführenden Schritte vornehmen. Der Einsatz von reaktiven Agenten würde jedoch die Frage nach der Notwendigkeit eines Agentensystems aufwerfen. Im konkreten Anwendungsfall wäre hierbei kein Mehrwert eines agentenbasierten verglichen mit einem objektorientierten Ansatz zu erkennen und somit wäre der Mehraufwand ungerechtfertigt, ein reaktives Agentensystem zu entwickeln. Weiters sind reaktive Agenten auf externe Ereignisse angewiesen, um Handlungen durchzuführen, d.h., sie können ohne externe Stimuli eigenständig keine Aktionen starten. Die Forderung eines autonomen Smart Home-Systems nach *proaktivem Verhalten* ist daher mit einem reaktiven Agentensystem nicht erfüllt. Aus diesem Grund wurden *deliberative Agenten* als geeignetste Agentenvariante für den Einsatz im ThinkHome-Projekt angesehen. Die Hauptunterschiede zu reaktiven Agenten sind ein internes Modell ihrer Umgebung, proaktives Verhalten sowie die Möglichkeit selbst zu bestimmen, welche Aktion als nächstes ausgeführt werden soll. Diesen Vorteilen steht die höhere Komplexität dieses Agententyps gegenüber. Natürlich sind Agenten, die auf ihre Umgebungsbedingungen reagieren, aber auch selbst handeln können, komplexer als rein reaktive Agenten. Im Rahmen der Spezifikation von deliberativen Agenten ist daher eines der Hauptkriterien das Verhältnis von reaktivem zu proaktivem Verhalten. Hierbei wird festgelegt, wie direkt der Agent auf Ereignisse reagiert, die nicht seinen unmittelbaren Zielen entsprechen. Diese Festlegung wurde lange als eines der wichtigsten Themen in der Agentenforschung betrachtet und hat direkte Auswirkungen auf die Implementierung eines Agenten und der Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten, d.h., auf das Agentensystem.

Für die Umsetzung des Multi-Agentensystems wurden deliberative Agenten gewählt, die dem *Belief, Desire, Intention (BDI) Ansatz* folgen, da diese Komponenten die Anforderungen an das ThinkHome-System am besten abdecken. BDI-Agenten können relativ einfach spezifiziert werden, da lediglich Ziele (*Desires*) und Aktionsmöglichkeiten eines Agenten angegeben werden und der Agent selbst aufgrund seines Wissens über den aktuellen Zustand der Welt (*Beliefs*) auszuführende Aktionen bestimmen kann (*practical reasoning*). Trotz dieser Simplizität ermöglichen BDI-Agenten die Modellierung sehr komplexer Sachverhalte sowie die Umsetzung der dazugehörigen Strategien, unter anderem durch Inter-Agenten-Kommunikation und -Kooperation. Ein weiterer Entscheidungsgrund für BDI-Agenten ist die Tatsache, dass für sie mehrere Analyse- und Design-Methodologien existieren, die den Spezifikationsprozess des Multi-Agentensystems formal begleiten. Im Zuge der Arbeiten an diesem Projekt wurden daher die verschiedenen Methodologien (MaSE, Tropos, Gaia und Prometheus) einer Evaluierung unterzogen, bei der die von Prometheus vorgegebene Vorgehensweise als besonders geeignet für die Unterstützung während der Systemanalyse- und Systemdesign-Phase erkannt wurde. Zusätzlich zur

Auswahl von systemdesign-unterstützenden Maßnahmen spielt auch die Technologie eine wichtige Rolle, die zur späteren Implementierung herangezogen wird. Aus diesem Grund wurde nach einem frei verfügbaren Framework für Agenten gesucht, mit dem die geplante Umsetzung bestmöglich erreicht werden kann.

Um nun ein BDI-Agentensystem in die Praxis umzusetzen, muss eine Implementierung der BDI-Architektur und Wissensbasis sowie des Reasonings und aller Aktionskomponenten gewählt werden. Ein Beispiel hierfür ist Jadex eine „hybride (reaktive und deliberative) Agentenarchitektur, um mentale Zustände in JADE Agenten laut BDI-Modell darzustellen“ (Pokahr et al., 2005). Obwohl im Rahmen von Jadex Erweiterungen und Änderungen bezüglich des ursprünglichen BDI-Konzepts vorgenommen wurden, kann es als vollständige und konforme BDI-Implementierung betrachtet werden. Jadex behandelt jedoch ausschließlich die Implementierung des internen Verhaltens der spezifizierten Agenten (vgl. Abbildung 5). Die Kommunikation zwischen den Agenten wird nicht berücksichtigt. Hierfür erweist sich im Weiteren die Java Agent Development (JADE) Plattform als besonders attraktiv, da sie zum einen konform zu gängigen Standards der agentenbasierten Implementierung ist (z.B. FIPA Standard) und zum anderen eine quelloffene Implementierung in der häufig verwendeten Programmiersprache Java darstellt. Zusammen mit der Erweiterung Jadex lassen sich somit die Spezifikationen für BDI-Agenten umsetzen, die als Endprodukt der Prometheus-Methodologie entstehen.

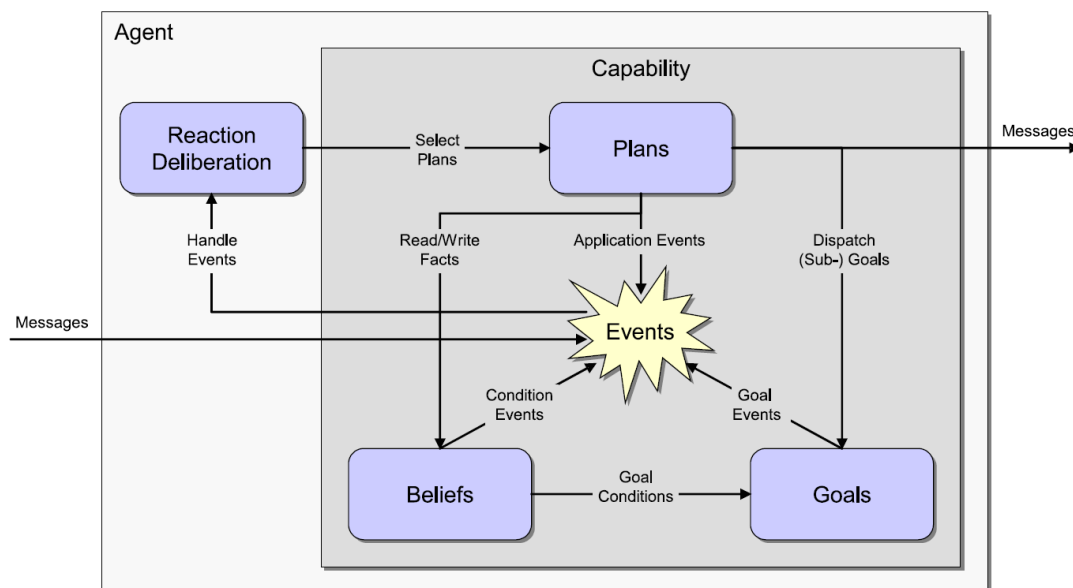


Abbildung 5: Struktur der Jadex-Architektur (Braubach et al., 2005)

Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 5 eine abstrakte Darstellung der Jadex-Architektur. Interne Abläufe von Agenten werden hierbei über zentrale BDI-Komponenten realisiert. Weiters folgt Jadex einem ereignisbasierten Paradigma, wobei jede interne oder externe Aktion als Ereignis behandelt wird. Anders als im ursprünglichen BDI-Konzept werden „Desires“ und „Intentions“ von der Jadex-Architektur nicht explizit abgebildet. Vielmehr werden „Desires“ explizit als „Goals“ realisiert, also Ziele, die von einem Agenten erreicht werden können. Diese Ziele beschreiben bestimmte Umgebungszustände, die hergestellt oder durch das Einwirken eines Agenten beibehalten werden sollen. Ein Ziel kann in diesem

Fall jedoch auch eine Anzahl von Aktionen sein, die ausgeführt werden, wenn dieses spezielle Ziel aktiv wird. Ausführbare Aktionen werden in Jadex wiederum als „Plans“ realisiert. Pläne werden also dazu verwendet, die spezifischen Goals eines Agenten zu erreichen. Die Verbindung zwischen Plänen und dem BDI-Konzept ist, dass die „Intentions“ in BDI jene Pläne darstellen, die der Agent in jedem Fall zu erreichen versucht. Für jedes Ziel können verschiedene Pläne und somit Wege definiert werden, um dieses zu erreichen. Zu einem bestimmten Zeitpunkt ist jedoch nur ein Plan aktiv. Ein Beispielziel aus dem Smart Home-Bereich wäre es, eine höhere Raumtemperatur zu erreichen. Zwei Pläne, die zu diesem Ziel führen können, sind hierbei die Heizung nach oben zu regeln oder bei entsprechender Witterung die Verschattung zu öffnen, um einen solaren Wärmeeintrag zu erreichen. Die Wahl, welcher Plan letztendlich ausgeführt wird, trifft wiederum der Jadex-Reasoning-Mechanismus, der hierfür beispielsweise eine prioritätenbasierte Auswahl treffen kann. Pläne beinhalten dabei die von einem Agenten ausführbaren Aktionen und werden als Java-Code implementiert. Agenten können mittels Aktionen somit die Umgebungssituation erfassen oder verändern, Nachrichten an andere Agenten absetzen oder auch interne Ereignisse, wie die Änderung der Wissensbasis oder die Aktivierung anderer Ziele einleiten. Der letztgenannte Punkt führt im Weiteren zu einer Ziel-Plan Hierarchie, die die Erfüllung von Hauptzielen durch Pläne vorsieht, die im Laufe ihrer Abarbeitung wiederum Sub-Goals aktivieren können. Diese Sub-Ziele werden ihrerseits wieder durch Sub-Pläne realisiert, wodurch eine Plan und Ausführungshierarchie entsteht.

Im Rahmen der Umsetzung des ThinkHome-Agentensystems wurde in einem ersten Schritt eine Aufgliederung des Anwendungsfalls in die Hauptteile eines Jadex-Agenten vorgenommen. Um die Komplexität dieses Teilungsprozesses zu vermindern, wird zuerst eine hierarchische Aufteilung der möglichen Agentenziele vorgenommen. Funktionalitäten werden in kleinere Einheiten unterteilt, die in weiterer Folge einfacher gelöst werden können. Der Prometheus Methodologie folgend wurde zuerst ein *Goal-Overview Diagram* erstellt, das die Ziele des Agentensystems identifiziert und hierarchisch anordnet. Eine Erweiterung dieses Diagramms ist die *Goal-Plan Hierachy*, die nicht nur Ziele und Sub-Ziele identifiziert, sondern auch alle Pläne umfasst, die zur Erfüllung dieser Ziele führen.

Die für den Anwendungsfall „thermische Behaglichkeit“ im Rahmen des ThinkHome-Projekts erstellte Goal-Plan Hierarchie ist in Abbildung 6 dargestellt. Ausgehend vom Gesamtziel „thermische Behaglichkeit herstellen“ wurde eine hierarchische Zerlegung dieses Ziels in mehrere Unterziele vorgenommen. Hierbei ist es von großer Wichtigkeit, die Subziele möglichst vollständig zu beschreiben sowie alle Pläne zu identifizieren, die zur Erfüllung dieser Subziele beitragen. Ziele, die im abgebildeten Diagramm auf derselben Hierarchieebene dargestellt werden, sind mit logischem *AND* verbunden, wobei Pläne auf einer Ebene eine Verbindung mit logischem *OR* aufweisen. An den Blättern des Hierarchiebaums werden atomare Aktionen repräsentiert, wobei die Atomizität sehr stark vom Kontext abhängig ist. Im dargestellten Fall bedeutet dies, dass das generelle Ziel die Herstellung der thermischen Behaglichkeit ist. Der einzige Plan, der dazu verwendet werden kann, dieses Ziel zu erreichen, ist der *thermal comfort plan*, der zur Bedingung hat, dass drei weitere Ziele erfüllt werden: *air humidity*, *temperature* und *air quality*. Um die

Raumtemperatur zu kontrollieren, stehen in einem Smart Home üblicherweise verschiedenen Möglichkeiten zur Verfügung. Diese werden im vorliegenden Fall als verschiedene „control temperature plans“ dargestellt. Die Raumtemperatur kann im gezeigten Fall über eine On/Off Strategie, einen klassischen PID, einen prädiktiven Regler oder anderen Strategien kontrolliert werden. Das Auswahlverfahren zwischen diesen Möglichkeiten wird in Jadex mit Hilfe von *means-end reasoning* vorgenommen. Weiters kann dieser Auswahlprozess vom Systemarchitekt durch Zuweisen von spezifischen Prioritäten an die einzelnen Kontrollaktivitäten beeinflusst werden. Eine Vorauswahl der Kontrollmöglichkeiten kann auch bereits in der Wissensbasis vorgenommen werden. Auf diese Art können beispielsweise energieeffiziente Strategien favorisiert werden. Im Beispieldiagramm in Abbildung 6 ist nur der Plan für eine PID-basierte Temperaturkontrolle detailliert beschrieben. Die alternativen Pläne können auf eine ähnliche Art veranschaulicht werden. Der PID-Kontrollplan kann jedoch als relativ neuartig angesehen werden, da dieser eine große Anzahl von zusätzlichen Parametern benützt, um die Performanz der Regelung zu erhöhen (z.B. Gebäudehülle, Anwesenheitsinformation, solare Einträge). Navigiert man durch den Baum bis zur untersten Ebene, findet man die detailliertesten Pläne der Hierarchie. Diese repräsentieren atomare Aktionen für den gegebenen Anwendungsfall. Es sind im Besonderen diese Pläne, die als Java-Programmcode implementiert werden und Informationen aus der Umgebung abrufen (z.B. Luftfeuchtigkeit von einem Sensor) oder die Aktionen realisieren, die direkt in der Umgebung ausgeführt werden sollen (z.B. das Ausführen der Air-Conditioning Kontrollstrategie).

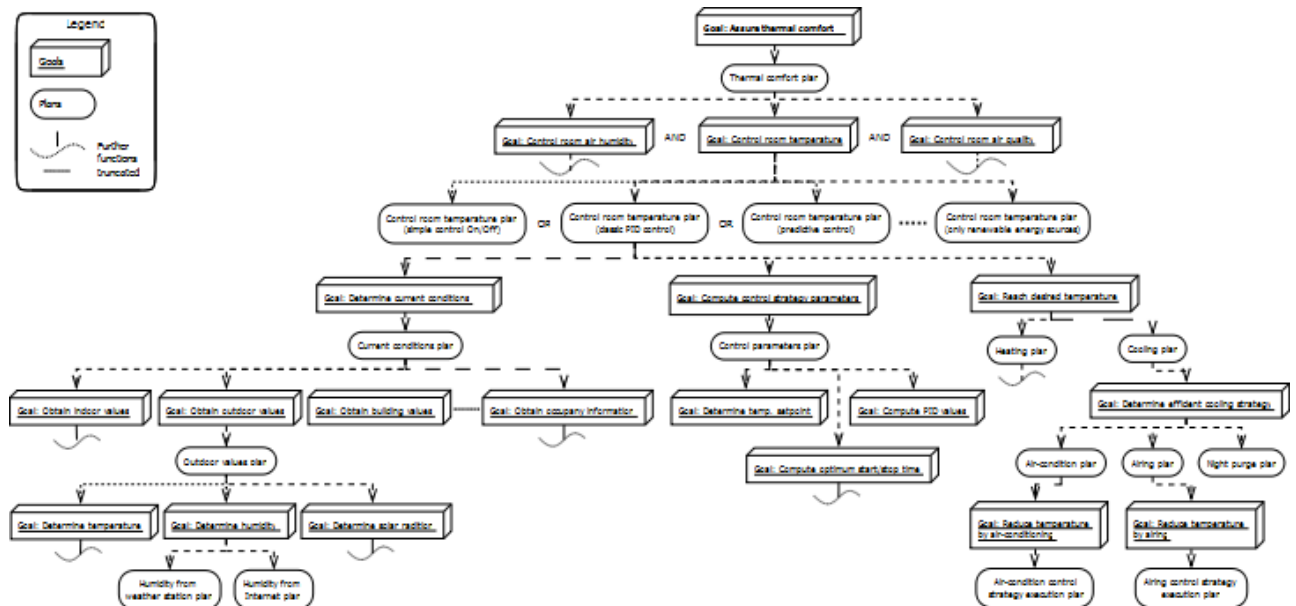


Abbildung 6: Goal-Plan Hierarchie für thermische Behaglichkeit

In weiterer Folge kann der vollständige Goal-Plan Baum dazu verwendet werden, um jene Ziele zu definieren, die von den verschiedenen Agenten verfolgt werden, sowie jene Pläne festzuhalten, die zu diesen Zielen führen. Obwohl dieser Prozess relativ intuitiv und geradlinig erscheint, führt eine Implementierung in Jadex an diesem Punkt zu zwei Herausforderungen: Erstens spezifiziert diese Hierarchie keine Agentenklassen, die im System implementiert werden müssen. Die Prometheus Agentenmethodologie sieht hierfür

eine spezifische Phase vor, in der ein sogenanntes *Data Coupling Diagram* erstellt wird, das diese Informationen enthält. Im Rahmen des ThinkHome-Projekts wurde eine derartige Gruppierung von Agenten bereits in (Reinisch et al., 2011a) beschrieben, wobei hier Basisagenten für Kontrolle, Benutzer, globale Ziele und Interfaces zur Gebäudeautomation sowie zur Wissensbasis identifiziert wurden. Die zweite Herausforderung beruht darauf, dass Jadex vier verschiedene Zieltypen mit jeweils bestimmten Systemverhalten vorsieht: Ein sogenanntes *perform goal* wird dazu benutzt, direkt Aktionen auszuführen. Ein *achieve goal* wird verwendet, um einen bestimmten Status zu erreichen. Ein *query goal* kann die Beschaffung der Information durchführen, die vom Agenten benötigt wird (z.B. Informationsgewinn aus der Wissensbasis). Letztlich gibt es noch das sogenannte *maintain goal*, um einen bestimmten Systemzustand beizubehalten. Da diese Typen nicht direkt in der Goal-Plan Hierarchie abgebildet werden, müssen sie dieser in einem weiteren Schritt manuell zugewiesen werden, jedoch kann in der Praxis eine derartige Abbildung relativ einfach erstellt werden. Wenn beispielsweise Information aus Umgebung oder anderen Agenten benötigt wird, handelt es sich um ein *query goal*, das die dafür notwendigen Mechanismen enthält. Auf eine ähnliche Weise wird ein *perform goal* in solchen Situationen benötigt, wenn Aktionen in der Umgebung ausgeführt werden sollen, aber kein Feedback erwartet wird. In einem Smart Home umfasst dies typischerweise Safety-Funktionen, wie einen Not-Aus Befehl für die Lüftungsanlage. Weiters sind *achieve goals* in einem derartigen System notwendig, wenn eine Zustandsänderung angestrebt wird, wie die Änderung des Lichtschalters vom Zustand *On* auf Zustand *Off*. *Maintain goals* andererseits können dazu verwendet werden, um beispielsweise die Luftfeuchtigkeit eines Raumes auf einem bestimmten Wert zu halten.

In Jadex werden die „Beliefs“ der Agenten, also deren Wahrnehmung von der Welt, die sie umgibt, in einer sogenannten „Beliefbase“ gespeichert, die das Wissen der einzelnen Agenten repräsentiert. Die exakte semantische Repräsentation der verwendeten Wissensbasis wird in Jadex noch nicht spezifiziert. Da aber JADE und Jadex in Java implementiert werden, ist eine Kapselung der Informationen als Java-Objekte empfehlenswert. Im ThinkHome-Projekt wird hierfür eine Ontologie verwendet, die das Wissen über das Gebäude möglichst vollständig repräsentiert. Außer Benutzervorlieben beinhaltet sie auch Informationen über die Gebäudehülle, Energieinformationen der verbauten Gerätschaften sowie externe Einflussfaktoren. Das abgelegte Wissen wird hierbei zur Einbindung in das Agentensystem durch Java-Objekte repräsentiert.

Die Schnittstelle zwischen Wissensbasis und Agentensystem tritt als Wissensagent in Erscheinung, der auf die gespeicherten Informationen und das Wissen in der ThinkHome-Wissensbasis zugreift und diese Informationen an weitere Agenten im System weiterleitet (vgl. Abbildung 2). Die Arbeit an der Spezifikation dieser Schnittstelle wurde entgegen der geplanten Durchführung laut Projektablaufplan bereits früher initiiert, um eine klare Trennung zwischen Wissensbasis und Agentensystem zu schaffen. Da diesem Artefakt eine zentrale Rolle in Bezug auf Systemintegration zukommt, wurde die Spezifikation während des Projekts laufend erweitert, gewartet und in Hinblick auf Entwicklungen im Rahmen der Modellierung der Wissensbasis verfeinert. Nach der Implementierung des

Agentenframeworks wurde der Wissensagent mit Bezug auf den umzusetzenden Anwendungsfall realisiert. Als Technologie für die Implementierung der Schnittstelle zwischen Wissensbasis und Agentenframework wurde nach eingehender Analyse bereits im Vorfeld das Jena Semantic Web Framework gewählt. Dieses Framework stellt eine wohldefinierte Programmierschnittstelle in Java zur Verfügung und eignet sich aus diesem Grund im besonderen Maß für eine Kopplung an das Agentenframework.

3.4 Kontrollstrategien

Eine zentrale Aufgabe von ThinkHome war die Entwicklung intelligenter Kontrollstrategien, die – eingebettet in das Agentensystem – das Zusammenspiel der Haustechnik- und Automationskomponenten gemäß Benutzervorgaben und so energieeffizient wie möglich orchestrieren sollen. Am Ende der Systemspezifikationsphase begann daher die Entwicklung solcher Kontrollstrategien. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Beibehaltung des von den Benutzern gewünschten Komforts gelegt, wobei dieser Komfortlevel möglichst energie- und ressourceneffizient erreicht bzw. gehalten werden soll. Dazu sollen alle Möglichkeiten ausgereizt werden, die ein vernetztes Smart Home bietet. Als Technik hat sich dabei die Vorhersage von Benutzerverhalten (*user behavior prediction*) als besonders zielführend herausgestellt. Durch Clustering-Technologien können Prognosen des Benutzerverhaltens in sehr guter Qualität erhalten werden. Ein neuartiger Clustering-Algorithmus basierend auf Self-Organizing-Maps (eXclusive SOM) wurde entwickelt und mit bestehenden Ansätzen (u.a. klassischen Kohonen Networks, Fuzzy Logic Clustering) verglichen (Iglesias & Kastner, 2010). Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde weiters ein grundlegendes Simulationsmodell nach bauphysikalisch exakten Berechnungen in MATLAB/Simulink erstellt und dem etablierten HAMlab Modell gegenübergestellt (Hofer, 2011). Dieses Simulationsmodell diente als erste Evaluierung der Kontrollstrategien.

Die verschiedenen Ansätze zur Verhaltensvorhersage sowie deren konkrete Umsetzung als Kontrollstrategien und -algorithmen wurden im Zuge dessen bereits auf mehreren Konferenzen vorgestellt: Die Publikation (Iglesias et al., 2012a) beschreibt eine ganzheitliche Smart Home-Lösung, basierend auf Benutzer- und Verhaltensprofilen. In diesem Artikel wird eine Anwendung zur automatischen Kontrolle der thermischen Behaglichkeit präsentiert, die über Anwesenheits-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsprofile realisiert wird. Der Artikel (Iglesias et al., 2011a) behandelt den Einfluss von Benutzergewohnheiten auf den Energieverbrauch eines Eigenheims. Die Arbeit analysiert Benutzerprofile als Basis von Kontrollstrategien. Das Ergebnis der Analyse zeigt, dass Kontrollstrategien mit Benutzerprofilen eine sehr gute Performance in Hinblick auf das Benutzerverhalten in einem Wohnhaus zeigen. Die Publikation (Iglesias et al., 2011b) beschreibt sodann hierfür einen neuartigen Clustering-Algorithmus basierend auf Self-Organizing-Maps (eXclusive SOM), um aus einer Anzahl von Benutzerdaten repräsentative Muster, sogenannte Patterns, zu generieren. Unter anderem wird gezeigt, dass die vorgestellte Methode eine sehr gute Möglichkeit für die Verhaltensmustererkennung in einem Smart Home darstellt. In der Veröffentlichung (Iglesias et al., 2011c) wird dieser mit bestehenden Ansätzen (u.a.

klassischen Kohonen Networks, Fuzzy Logic Clustering) verglichen. Diese Art der Datenextraktion kann in einem Smart Home im Speziellen für die Anwesenheitserkennung eingesetzt werden. In diesem Artikel werden verschiedene Clustering-Methoden daher weiters mit Hilfe von Statistikdaten und Simulationen in Hinblick auf den Einsatz in einem Smart Home evaluiert. Der Artikel (Iglesias et al., 2011d) schlussendlich beleuchtet den Einsatz von Verhaltensprofilen in Bezug auf den Energiepreis und -markt. Hierbei wird eine Kontrollstrategie vorgestellt, die Einsparungspotentiale identifiziert und verschiebbare Lasten optimal vorplant. Diese Planung erfolgt auf Basis von Benutzerprofilen sowie Spot-Energiepreisen. Zur Evaluierung werden Simulationen durchgeführt und ein durchschnittlich erreichbares Einsparungspotential berechnet.

In diesen Artikeln wurde unter Anderem gezeigt, dass mit Hilfe von Clustering-Technologien Prognosen des Benutzerverhaltens in sehr guter Qualität erhalten werden können. Verschiedene Profile werden hierfür mittels unterschiedlicher Attribute charakterisiert (siehe Abbildung 7). *Objects* sind Gegenstände der Überwachung. Dies können Geräte, Zonen, das gesamte Gebäude oder auch Personen oder Personengruppen im Haushalt sein, die im Fokus eines Profils liegen. Das *Type of profile* Attribut legt anhand der Art des überwachten Werts fest, zu welcher Klasse ein bestimmtes Profil gehört. Beispiele für Profilklassen sind hierbei Anwesenheitsprofile, Verbrauchsprofile oder Sollwert-Profile. *Possible values* gibt einen Wertebereich an, für den ein Profil definiert ist (im gezeigten Fall 0–200 Liter). In den *Fields* eines Profils werden die Einzelwerte abhängig von der Sampling Rate eingetragen. Der *Scope* enthält den Geltungsbereich. Hierbei entspräche, wie in Abbildung 7 ersichtlich, für Daily Profiles der Scope-Wert „1 Tag“. Im Falle von stündlichen Samplingraten stünden 24 Einzelwerte (*Fields*) zur Verfügung.

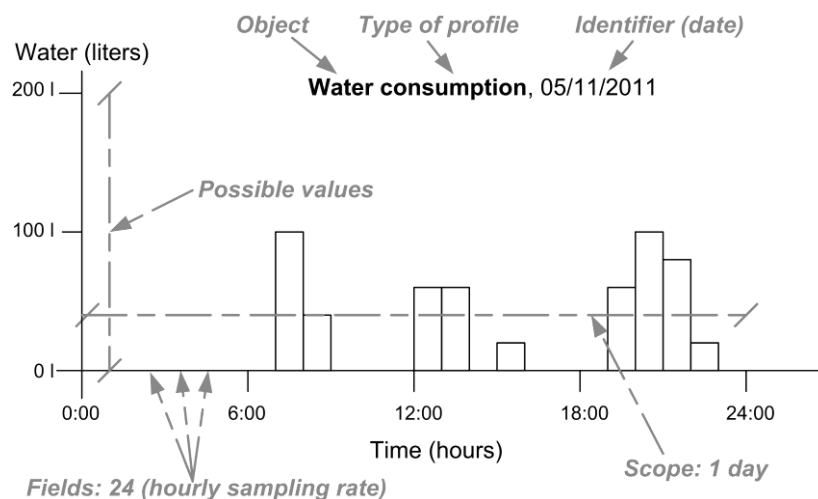


Abbildung 7: Beispiel eines Wasserverbrauchsprofils eines spezifischen Haushalts an einem bestimmten Tag.

Weiterhin wird ein Profil über einen Identifier eindeutig definiert. Im gezeigten Fall handelt es sich dabei um das Datum, für das dieses Profil aufgezeichnet wurde (05. November 2011). Mehrere Profile können in weiterer Folge zu sogenannten *Patterns* oder Mustern zusammengefasst werden. Ein Pattern wiederum wird über einen zeitlichen Begriff identifiziert und in der Wissensbasis klassifiziert. Beispiele hierfür wären Patterns für

Dienstage, Nachmittage oder Wintertage. Diese Patterns werden von einem Pattern-Generator erstellt. Wie bereits in der Literaturübersicht erwähnt, erstellt der Generator aus einer Anzahl von Profilen repräsentative Muster und legt diese in der Wissensbasis ab, um daraufhin bestimmte bereits mehrmals erkannte Situationen voraussagen zu können.

Um die Funktionalität des Pattern-Generators zu validieren, wurde im Rahmen des ThinkHome-Projekts eine Praxisstudie durchgeführt und in (Iglesias et al., 2012b) dokumentiert. Der dabei verwendete Pattern-Generator basierte hierfür auf einen Self-Organizing-Map Algorithmus, um Muster aus den vorhandenen Rohdaten zu extrahieren. In der beschriebenen Beispielanwendung wurden ausschließlich Anwesenheitsprofile untersucht. Eine Übertragung auf andere Profile ist jedoch relativ einfach möglich.

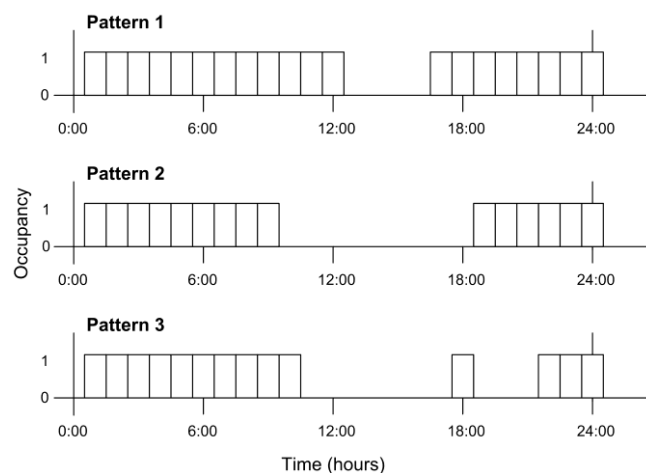


Abbildung 8: Identifizierte Anwesenheitsmuster – Occupancy = 1 bedeutet Anwesenheit, Occupancy = 0 bedeutet Abwesenheit. In diesem Fall wurden drei verschiedene Muster gefunden.

Für den Beispielzeitraum und das Testszenario wurden im Praxistest vom internen Clustering-Mechanismus des Pattern-Generators drei verschiedene Anwesenheitsmuster gefunden (vgl. Abbildung 8). In einem weiteren Schritt entdeckte der Pattern-Generator eine Korrelation mit Wochentagen, konkret von Pattern 1 mit Sonntag, Pattern 2 mit Donnerstag und Freitag, und Pattern 3 mit Montag, Dienstag und Mittwoch. Für Samstag konnte kein reguläres Muster gefunden werden, da hierfür die einzelnen Profil-Anwesenheitszeiten zu unterschiedlich waren, um daraus ein Muster abzuleiten. Somit kann der Samstag als Tag mit nicht-vorhersehbarer Anwesenheit eingestuft werden. Es konnte gezeigt werden, dass die entdeckten Muster sehr gut die wirklichen Gewohnheiten des Benutzers widerspiegeln und somit als Input für die entwickelte prädiktive Regelung bestens geeignet sind.

Anwesenheit ist im Allgemeinen eine sehr mächtige und wichtige Einflussgröße auf die Heim- und Gebäudeautomation. Tatsächlich erkannte Anwesenheit und Abwesenheit (z.B. durch einen Bewegungsmelder) kann dazu genutzt werden, Heizungs-, Lüftungs- und Klimageräte energieoptimiert zu steuern. Aber auch für Anwesenheitsprofile und -muster gibt es eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten. Basierend auf tatsächlicher Anwesenheit und Anwesenheitsprofilen wurde daher im Zuge der Realisierung von intelligenten Kontrollstrategien im ThinkHome-Projekt ein dedizierter Agent entwickelt, der sogenannte *Type of Time Period Agent*. Dieser Agent spezifiziert verschiedene Zeitkategorien, die für ein

Gebäudeautomationssystem eine wichtige Rolle spielen sowie deren Beziehungen zueinander. Im Fall von ThinkHome wurden hierfür vier verschiedene Zeitkategorien identifiziert. Längere Abwesenheit (*Long Absence*), kürzere Abwesenheit (*Short Absence*), Bereitschaft (*Readiness*) und Anwesenheit (*Presence*).

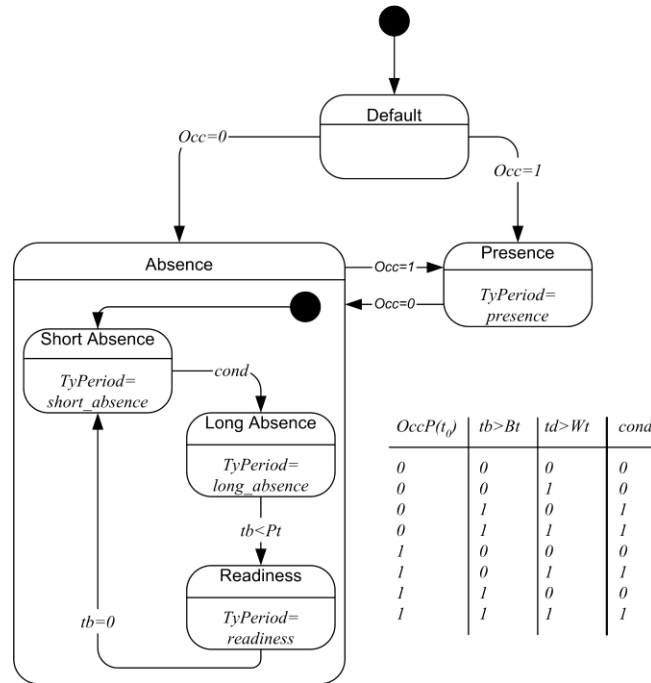


Abbildung 9: Zustandsdiagramm für den „Type of Time Period“ Agenten.

Abbildung 9 zeigt das Zustandsdiagramm des konzipierten Agenten. Bei Instanziierung der Komponente wechselt diese in einen Default Zustand, der gleichzeitig den Startzustand darstellt. Die aktuelle Situation in der überwachten Zone, die durch einen einfachen Bewegungsmelder eruiert werden kann, führt zu einem sofortigen Übergang in die Zustände Abwesenheit oder Anwesenheit abhängig vom festgestellten Wert. Unabhängig von anderen Variablen wechselt der Agent in den *Presence* Zustand, wenn Benutzer zu Hause sind ($Occ=1$). Wenn keine Anwesenheit erkannt wird oder die Benutzer gerade das Gebäude (oder die Zone) verlassen haben ($Occ=0$), wechselt der Algorithmus in den *Short Absence* Zustand. In diesem Zustand gibt es mehrere Möglichkeiten über das weitere Vorgehen des Agenten, die direkt vom aktuellen Wert des Anwesenheitsprofils abhängig sind ($OccP(t_0)$). Einerseits gibt es die Möglichkeit, dass das System die Abwesenheit korrekt angenommen hat, und somit $OccP(t_0) = 0$ gilt. Dies resultiert im *Short Absence* Zustand, wenn die Zeit bis zur nächsten vorhergesagten Anwesenheit (tb) kleiner ist als die Zeit der *Break Period* (Bt). Die *Break Period* ist hierbei ein Parameter, der die maximale Dauer einer kurzen Abwesenheit festlegt. Diese kann individuell angegeben werden. Ist die Zeit bis zur nächsten vorhergesagten Anwesenheit größer als die Zeit der *Break Period* ($tb > Bt$), wechselt der Agent in den Zustand *Long Absence*.

Andererseits ist es möglich, dass das System fälschlicherweise Anwesenheit vorausgesagt hat, d.h., das Anwesenheitsprofil den Wert $OccP(t_0)=1$ aufweist. Diese Situation kann beispielsweise auftreten, wenn der Benutzer vorzeitig das Gebäude verlässt oder später als üblich zurückkehrt. Diese beiden Situationen, die im System durch dieselben

Variablenbelegungen dargestellt werden ($Occ=0, OccP(t_0)=1$), werden vom Algorithmus, wie folgt, gehandhabt. Im ersten Fall setzt das System die Abwesenheitszeit zur letzten sensorisch erkannten Anwesenheit in Beziehung und speichert diese Zeit in der Variable tc . Im zweiten Fall wird die Zeit von der letzten erwarteten Anwesenheit im Profil ($OccP(t_0)=1$) zur aktuellen Zeit in Beziehung gebracht und wiederum die unvorhergesehene Abwesenheit in ta abgespeichert. Beide Werte werden mit der *Waiting Period* (Wt) verglichen, der Toleranzzeit einer Inkonsistenz zwischen erwarteter und tatsächlicher Anwesenheit ($Occ=0, OccP(t_0)=1$). In beiden Situationen wechselt der Agent in den Zustand *Long Abscence*, wenn $td > Wt$, mit $td = \min(ta, tc)$.

Ist das System im Zustand *Long Abscence*, wird ein Zustandswechsel nur durchgeführt, wenn die Zeit bis zur nächsten vorhergesagten Anwesenheit (tb) kleiner ist als die *Preparation Period* (Pt). Der Parameter Pt gibt an, wie lange ein Raum (eine Zone) konditioniert werden muss, um den Komfortbereich zu erreichen. Der Wert dieses Parameters kann wiederum individuell festgelegt und über Rauminformationen aus der Wissensbasis dynamisch berechnet werden, indem beispielsweise die Gebäudebeschaffenheit, die Orientierung und aktuelle Wittereinflüsse berücksichtigt werden. Ist die Bedingung $tb < Pt$ gegeben, wechselt der Agent in den Zustand *Readiness*. Es ist hierbei nicht direkt möglich vom Zustand *Long Abscence* in den Zustand *Short Abscence* zu wechseln. Der Agent verbleibt sodann bis zum Ablauf der *Break Period* (Bt) im Zustand *Readiness*. Wird keine effektive Anwesenheit erkannt, wechselt die Komponente wieder in den Zustand *Short Abscence*.

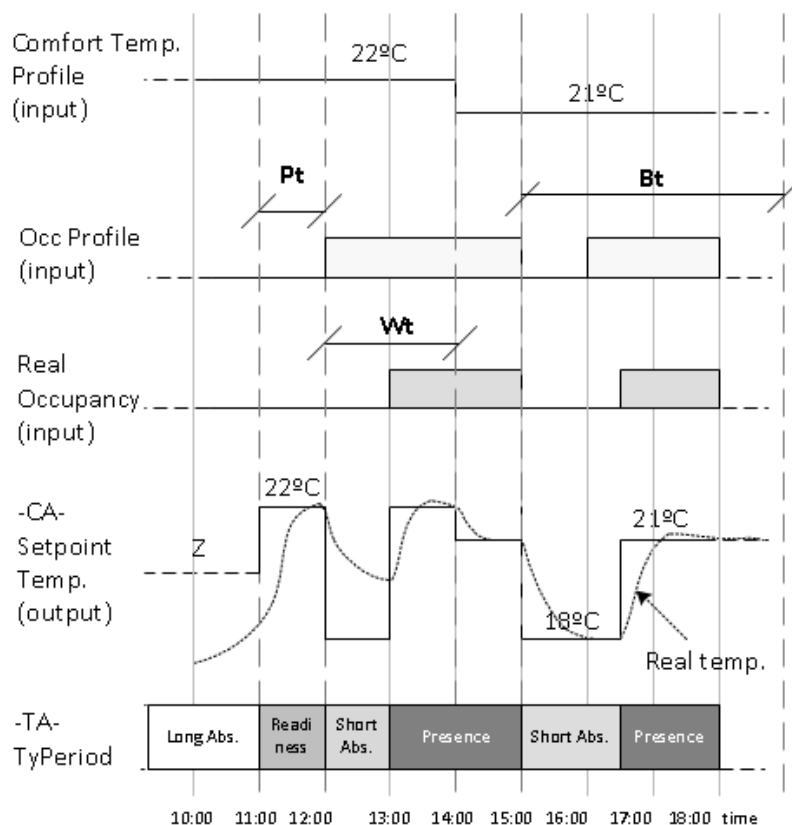


Abbildung 10: Temperaturregelung mit Hilfe von Anwesenheitsprofilen, mit $Pt = 1h$, $Wt = 2h$ und $Bt = 4h$

Abbildung 10 zeigt die Anwendung des beschriebenen Kontrollalgorithmus für die Berechnung der Raumtemperatur. Dies unterstreicht die Möglichkeiten des ThinkHome-Systems in Bezug auf prädiktive Gebäuderegulation. Das Beispiel zeigt einen Temperatur-Kontroll-Agenten (CA), der aufgrund der Informationen des Type of Time Period Agenten (TA) die Temperatur möglichst optimal nach Anwesenheit regelt. Der Zeitablauf beider Agenten wird hierbei mittels Zeitlinien beschrieben. Im Beispiel befindet sich der Kontrollagent CA um 10:00 in einem inaktiven Zustand (Z). TA hat bereits vorher den Zustand *Long Absence* eingenommen und kann diesen aus den bereits beschriebenen Gründen nicht verlassen, solange $Occ=0$ und $tb>Pt$. Das Anwesenheitsprofil $OccP$ erwartet die nächste Anwesenheit um 12:00. Die Preparation Time Pt im Beispiel beträgt 1h und aus diesem Grund wechselt der TA bereits 1 Stunde vor erwarteter Anwesenheit also um 11:00 in den *Readiness* Zustand, da die Bedingung $tb<Pt$ zutrifft. Somit regelt der CA auf die Komforttemperatur von 22°C, die über Benutzervorlieben oder Komfortprofile in der Wissensbasis ermittelt wurde. Um 12:00 wird keine Anwesenheit registriert, da der Benutzer verspätet zu Hause eintrifft. Da $tb=0$ gilt, wechselt TA in den Zustand *Short Absence*. Der CA stellt die Heizung auf Setback Temperatur (im Beispielfall auf 18°C). Da $ta<Wt$ und $tc<Wt$ gilt, wird die Situation als *Short Absence* erkannt. Um 13:00 kehrt der Benutzer heim und das System erkennt effektive Anwesenheit ($Occ=1$). Der TA wechselt in den Zustand *Presence* und setzt somit die Sollwert Temperatur wieder auf den Komfortwert für diesen Raum oder Benutzer. Um 14:00 gleicht das System aufgrund häufiger Benutzeränderung dynamisch den Komforttemperaturwert an und speichert den neuen Komfortwert (21°C) im CA sowie in der Wissensbasis. Um 15:00 tritt die vorhergesagte Abwesenheit auch wirklich ein. Der Benutzer verlässt das Gebäude in etwa zur selben Zeit, wie das System die Abwesenheit erwartet. Da die beiden fallenden Flanken nicht exakt gleichzeitig passieren, werden beide Möglichkeiten analysiert: Der erste Fall ist, dass das Anwesenheitsprofil zuerst die Abwesenheit signalisiert, der Benutzer aber erst kurz danach das Gebäude verlässt. Hierbei tritt kurzzeitig die Situation $Occ=1$ und $OccP(t_0)=0$ auf. Der TA verbleibt im *Readiness* Zustand. Wenn der Benutzer dann endgültig das Gebäude oder den Raum verlässt ($Occ=0$), wechselt der TA in den *Short Absence* Zustand und der CA stellt auf Setback Temperatur. Solange $tb<Bt$, bleibt TA im gewählten Zustand. Der zweite Fall wäre, dass die effektive Anwesenheit sich zuerst ändert und somit die Situation $Occ=0$ und $OccP(t_0)=1$ auftritt. TA geht dadurch sofort in den *Short Absence* Zustand und CA wechselt zur Setback Temperatur. Da $tc<Wt$ und $ta<Wt$ gilt, bleibt TA im gewählten Modus. Wenn schließlich auch das Profil Abwesenheit signalisiert ($OccP(t_0)=0$), wird auf dieselbe Art vorgegangen wie im ersten Fall, d.h., solange $tb<Bt$ ist, bleibt der TA im *Short Absence* Zustand. Um 16:00 wird wiederum Anwesenheit signalisiert, der Benutzer verspätet sich jedoch wieder. Da der TA im *Short Absence* Modus ist, kann er nicht direkt in den *Readiness* Zustand wechseln (vgl. Abbildung 9) und bleibt daher im aktuellen Zustand. Da $ta<Wt$ und $tc<Wt$ vorliegt, ist auch ein Wechsel in den Zustand *Long Absence* nicht möglich. Um 16:30 kehrt der Benutzer heim und effektive Anwesenheit wird registriert ($Occ=1$). Das führt dazu, dass der TA in den *Presence* Zustand wechselt und der CA wiederum die Heizungssteuerung auf Komforttemperatur regelt.

Im Rahmen des ThinkHome-Projekts lag der Fokus auf der Umsetzung des Anwendungsfalls „Thermische Behaglichkeit und Raumluftqualität“. Hierfür wurde eine Aufteilung in vier Grundanwendungen vorgenommen, die im ThinkHome-System durch den Einsatz von Verhaltensprofilen optimiert wurden:

- Kontrolle der Sollwert Temperatur: Diese Anwendung beurteilt thermische Anforderungen eines bestimmten überwachten Hausteils und nimmt Temperatureinstellungen aufgrund von Anwesenheits- und Verhaltensprofilen sowie Komfortpräferenzen vor.
- Kontrolle des Sollwerts Luftfeuchtigkeit: Hierbei wird analog zur Anwendung für den Temperatursollwert vorgegangen.
- Erreichung sowie Beibehaltung der thermischen Behaglichkeit: In Abwesenheitszeiten kontrolliert dieses Service Verschattungsanlagen, Luftbefeuchter sowie natürliche Ventilation, um den überwachten Raum möglichst energiesparend in einem Bereich zu halten, von dem es relativ schnell möglich ist, den Komfortbereich zu erreichen.
- Automatische Belüftung des Gebäudes: Basierend auf Anwesenheits- sowie Luftgüteprofilen startet das ThinkHome-System die Belüftung und wählt hierbei die energiesparendste Variante.

Diese Anwendungen führen im System die Feinabstimmung von Raumluftgüte mit Variablen der thermischen Behaglichkeit durch, indem sie Verhaltensprofile und global anerkannte Standards als erlaubte Bereiche verwenden (Abbildung 11).

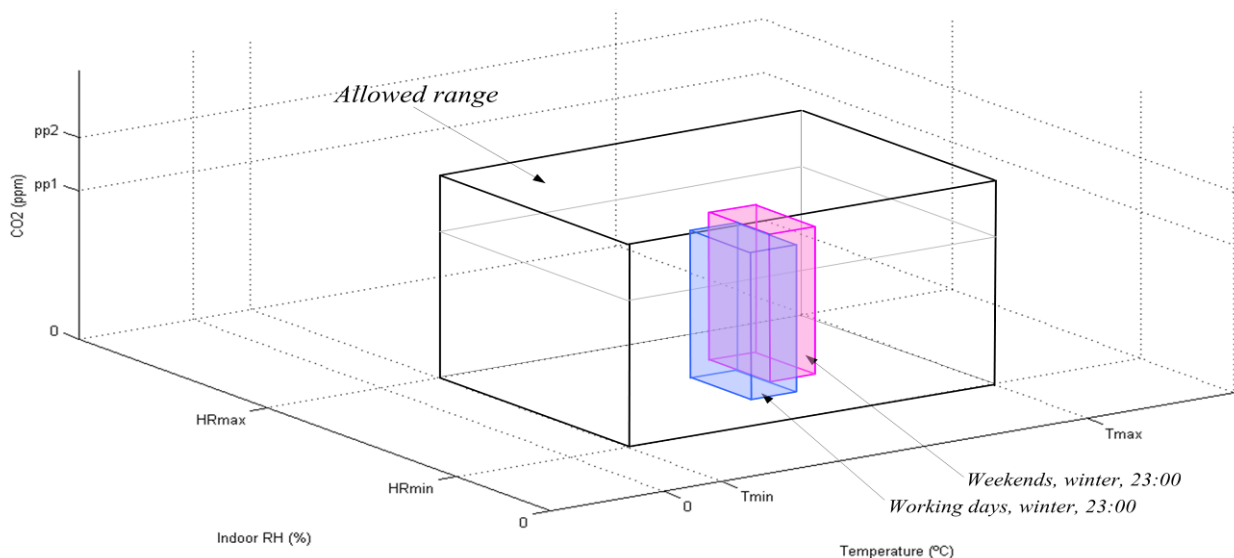


Abbildung 11: In dieser Abbildung werden die Luftgüte und thermische Behaglichkeit durch Bewertung von Raumtemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, sowie der CO₂ Konzentration im Gebäude errechnet. Der erlaubte Bereich ergibt sich aus Standards, wobei die Komfortzone durch zeitabhängige Verhaltensprofile festgesetzt wird.

Um die erwähnten vier Hauptapplikationen zur Herstellung von thermischer Behaglichkeit sowie Luftqualität nun mit Hilfe des ThinkHome-Systemkonzepts umzusetzen, wurden spezialisierte Agenten definiert, die im Zusammenhang mit Verhaltensprofilen

unterschiedliche Aufgaben übernehmen. *Control Agents* sind hierbei für die Entscheidungsfindung in speziellen Bereichen zuständig und beinhalten globale Regeln sowie Routinen und Algorithmen zur Steuerung dieser Bereiche. Konkrete Beispiele für *Control Agents* sind der *Setpoint Temperature Control Agent* zur Kontrolle und Steuerung der Raumtemperatur sowie der *Ventilation Demand Agent* zur Steuerung der Raumbelüftung. Kontextinformation für diese Agenten wird von weiteren Agenten zur Verfügung gestellt. Entscheidungen der *Control Agents* manifestieren sich als Stellgrößenänderungen, die an einen dedizierten *Building Automation System Agent* weitergegeben werden. Dieser nimmt in Abstimmung mit den Informationen in der Wissensbasis die konkreten Einstellungen an verbauten Gewerken des Gebäudeautomationssystems vor. Der Agent stellt somit eine Schnittstelle zum Gebäude dar, wie auch aus Abbildung 2 ersichtlich ist. Der *Conflict Resolution Agent* ist ein spezieller Kontrollagent, der die Kommunikation und Kollaboration zwischen den Kontrollagenten überwacht. Hierbei agiert der *Conflict Resolution Agent* als Schlichtungsstelle, die Prioritäten unter allen Agenten verteilt, mit Hilfe der Wissensbasis Konflikte in gleichzeitig ablaufenden Prozessen erkennt und somit eine schlechte Performance des Systems unterbindet. Eine weitere Agentenart im ThinkHome-Gebäudesystem sind *User Preferences Agents*. Diese Agenten erkennen im Zusammenhang mit Verhaltensprofilen die manuelle Interaktion des Benutzers mit dem Gebäude, beispielsweise die Aktivierung oder Deaktivierung bestimmter Geräte, wie Heizung oder Belüftungsgeräte. Weiters wird in diesen Komponenten auch festgelegt, ob der Fokus auf Komfort oder Energieeinsparungen liegen soll. Die *User Preference Agents* interagieren mit den bereits beschriebenen *Control Agents*, um die Vorlieben der Benutzer adäquat zu berücksichtigen. *Global Goals Agents* kommunizieren wiederum mit *User Preference Agents*, um globale Ziele des Systems möglichst rasch zu erreichen. Hierfür analysiert ein Agent den Kontext des Benutzers sowie gespeicherte Benutzerpräferenzen in der Wissensbasis und löst erkannte Inkonsistenzen. Auf diese Art wird ein Verhalten des Systems realisiert, das die Erreichung der globalen Ziele anstrebt aber zur gleichen Zeit auch Benutzervorlieben berücksichtigt. *Context Inference Agents* stellen in diesem Zusammenhang diejenigen Teile des Systems dar, die keine Entscheidungen treffen, die direkten Einfluss auf Endgeräte nehmen, aber eine Abstraktion des Kontexts modellieren. Agenten dieser Art können daher als Vermittlungskomponenten gesehen werden. Ein Beispiel für einen *Context Inference Agent* ist der bereits vorgestellte *Type of Time Period Agent*. Der *KB Interface Agent* verbindet das Multi-Agentensystem und die darin enthaltenen Softwarekomponenten mit der zentralen Wissensbasis und ermöglicht somit einen einheitlichen Zugriff auf die gemeinsame Sicht der Welt („Shared Vocabulary“). Die Komponente hat hierbei die Aufgabe Stellgrößen und Zustandswerte in die Wissensbasis zu übertragen und somit ein möglichst vollständiges Abbild der aktuellen Bedingungen im Gebäude zu erreichen. Die Hauptaufgabe des letzten zu erwähnenden Softwarekonstrukts, dem *BAS Interface Agent* ist es, den Zugriff auf die Haustechnikkomponenten sicherzustellen. Hierbei kann die Komponente als Schnittstelle zu unterschiedlichen Geräten oder Netzwerken der Gebäudeautomation gesehen werden.

3.5 Profilbasierte Kontrollstrategien

3.5.1 Prototyp: Systemübersicht und -struktur

Der erstellte Prototyp, der die Anwesenheit, künstliche Beleuchtung sowie natürliche Lichtverhältnisse berücksichtigt, wurde zur Umsetzung auf einem handelsüblichen PC implementiert. Die Informationen wurden hierbei einerseits im Fall von Stelldaten vom Gebäude und dem Benutzerverhalten und andererseits im Fall von Wetterdaten von der "Google Weather Forecast" Applikation für den Standort Wien übernommen. Der Fokus des Prototyps lag im Rahmen des Projekts darauf, Anwesenheits- sowie Beleuchtungszeiten vorauszusagen. Um diese Aufgabe umzusetzen, wurden Anwesenheitsprofile aufgezeichnet, die das System in Folge analysierte und zu Anwesenheitsmustern zusammenfasste. Diese Werte wurden im weiteren Verlauf dazu verwendet, Aufschluss darüber zu erhalten, wie zuverlässig und stabil erkannte Gewohnheiten sind. In der auf die Testphase folgenden Prototyp-Evaluierungsphase wurden die vom System vorhergesagten Gewohnheiten mit den erkannten Gegebenheiten verglichen. Auf diese Art konnte der Einsatz von Anwesenheitsprofilen in Hinblick auf eine Verbesserung der Kontexterkennung überprüft werden.



Abbildung 12: ThinkHome-Prototyp Installation in den Laborräumlichkeiten des Arbeitsbereichs, TU Wien.

Die schematische Darstellung des im Rahmen von ThinkHome erstellten Prototyps ist aus Abbildung 13 ersichtlich.

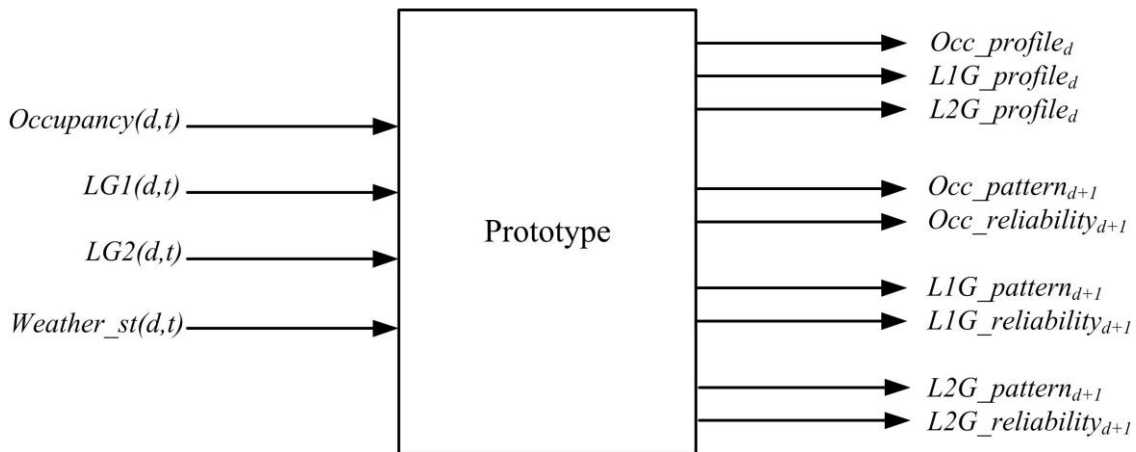


Abbildung 13: Schematische Black-Box Darstellung des ThinkHome-Prototypen mit definierten Ein- sowie Ausgängen

Hierbei stellt die Variable d den aktuellen Tag sowie t die Tageszeit dar. Weiters übernimmt das skizzierte System Daten vier verschiedener Ausprägungen: Anwesenheit (*Occupancy*), bedingt durch die physische Anwesenheit von Personen in der überwachten Zone, Beleuchtungsgruppe 1 (*LG1*) und Beleuchtungsgruppe 2 (*LG2*), die die künstlichen Beleuchtungsmöglichkeiten in der Zone abbilden, sowie Wetterzustände (*Weather_st*), die für den Gebäudestandort vorhergesagt sind. *LG1* und *LG2* beschreiben den aktuellen Schaltzustand der Beleuchtungseinrichtungen und sind als boolesche Werte realisiert. *Weather_st* kann verschiedenste vorher definierte Werte annehmen (vgl. Abschnitt 3.5.2).

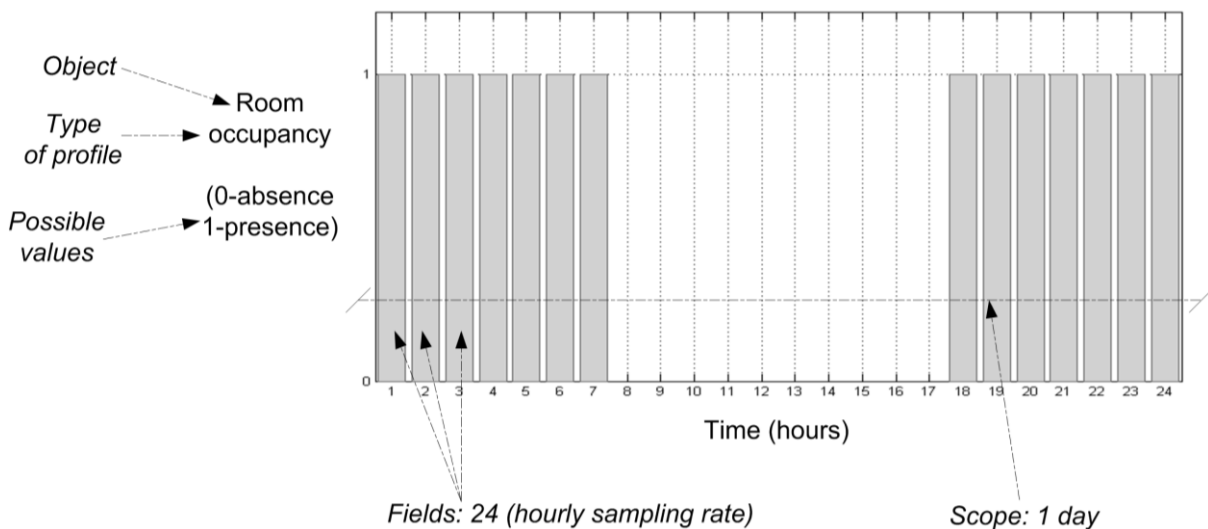


Abbildung 14: Darstellung eines Anwesenheitsprofils für einen bestimmten Tag

Am Ende eines Tages werden vom System die gesammelten Daten in Form von Profilen in der Wissensbasis abgelegt. Im konkreten Fall des Prototyps ergeben sich daraus die Profile *Occ_profile*, *L1G_profile* und *L2G_profile*. Diese Profile werden später dazu benutzt, Gewohnheitsmuster für den darauffolgenden Tag zu generieren. Hierfür werden bisherige Erfahrungen zu einem Muster (*Pattern*) zusammengefasst. Dies erfolgt über Clustering-Mechanismen, die versuchen in gesammelten Profilen bestimmte gleichmäßige Muster zu

erkennen. In Abbildung 13 wird hierbei die Kennzeichnung $d+1$ benutzt, um den prädiktiven Charakter der Muster herauszustreichen. *Occ_pattern*, *L1G_pattern* und *L2G_pattern* sind daher die vom System berechneten Profile für den nächsten Tag, während *Occ_reliability*, *L1G_reliability* und *L2G_reliability* Fließkommazahlen aus dem Intervall 0–1 beinhalten und die *Verlässlichkeit* eines Musters als Wahrscheinlichkeitsfunktion darstellen. Die Verlässlichkeitswerte erlauben somit die Bewertung eines Musters betreffend der Fähigkeit ein regelmäßig wiederkehrendes Verhalten abzubilden. Im Prototyp berechnet sich die Verlässlichkeit eines Musters aufgrund der bereits gesammelten Daten eines bestimmten Tages. Wurden für diesen Tag viele relativ ähnliche Profile zur Berechnung des Musters verwendet, wird die Verlässlichkeit des Musters dementsprechend hoch sein. Es handelt sich daher um ein starkes Muster. Beschreiben die verwendeten Profile viele Unregelmäßigkeiten in den aufgezeichneten Benutzergewohnheiten, wird die Verlässlichkeit des Musters sinken und es sich dementsprechend um ein schwaches Muster für diesen Tag handeln. Die Verlässlichkeit beschreibt somit die erkannten Gewohnheiten in der Vergangenheit und gibt an, wie gut ein bestimmtes Muster die vergangenen Profile des entsprechenden Tages abbildet.

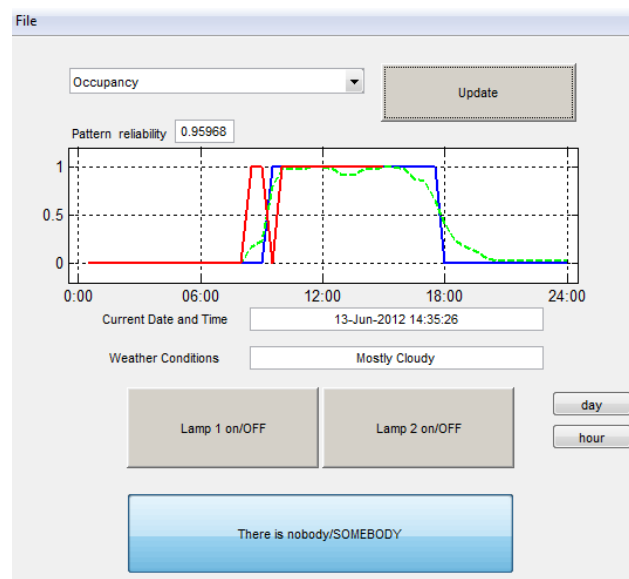


Abbildung 15: Graphische Schnittstelle der Prototypimplementierung mit Ergebnissen für die Anwesenheit (*Occupancy*).

Abbildung 15 zeigt eine Momentaufnahme der Aufzeichnungen des Prototyps. Die rote Kurve entspricht dem tatsächlich registrierten Verhalten des derzeitigen Tages (*Profile*), während die grünen und blauen Kurven die Prädiktion (*Pattern*) darstellen. Hierbei stellt die blaue eine gerundete Variante der grünen Kurve dar. Diese Vereinfachung ergibt sich daraus, dass beispielsweise für die Anwesenheit ein Wert von 0,7 keinen Sinn ergibt, da Anwesenheit nur die Werte 0 (abwesend) oder 1 (anwesend) annehmen kann.

Das Flussdiagramm in Abbildung 16 veranschaulicht nochmals graphisch den Programmablauf des entwickelten Prototyps.

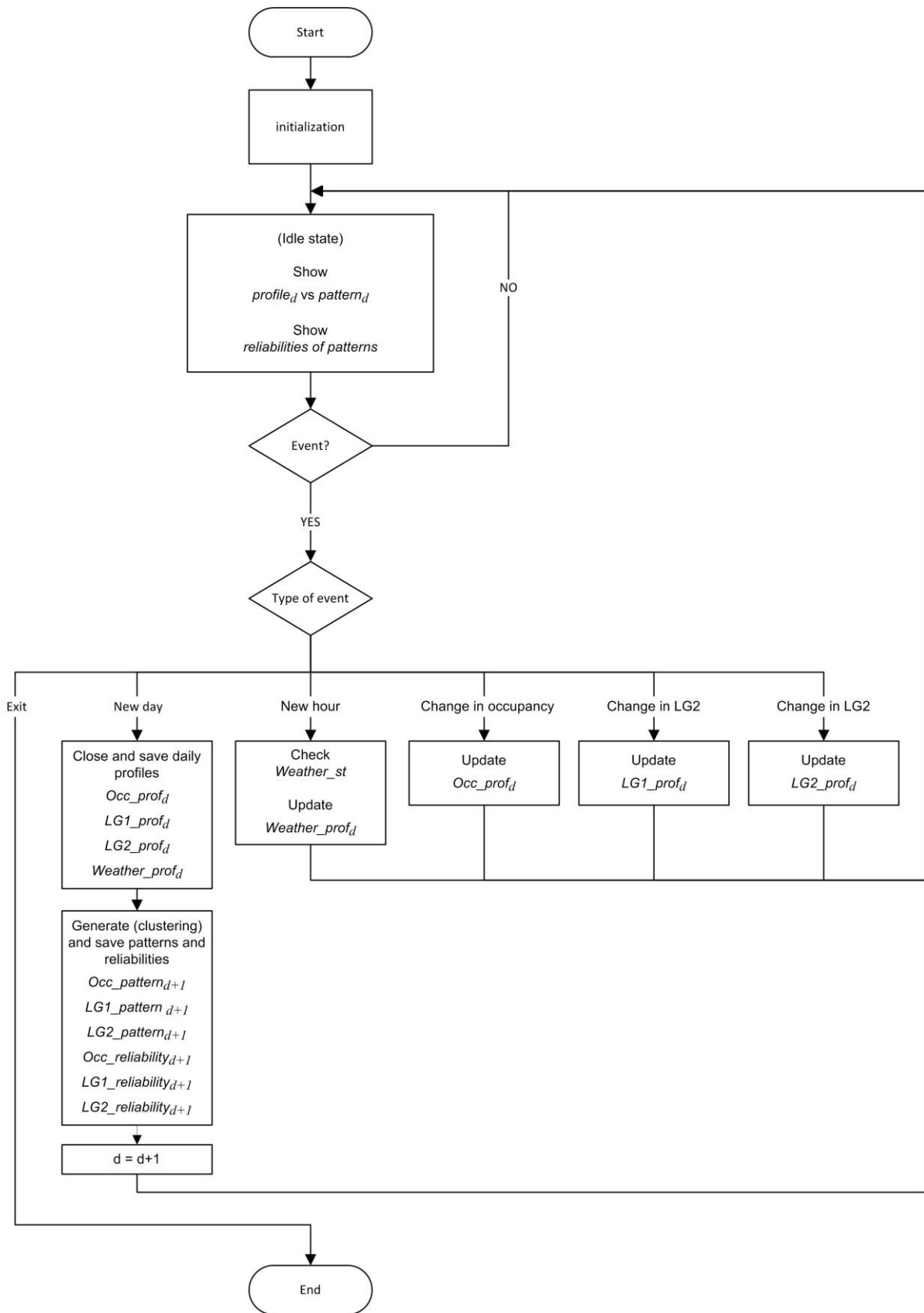


Abbildung 16: Flussdiagramm des internen Ablaufs im erstellten Prototyp

3.5.2 Feldstudie

Als Testzone wurde für die Evaluierung des Prototyps ein nord-gerichteter Raum mit 18.23m² gewählt (siehe Abbildung 17). Dieser Raum hat zwei Beleuchtungsgruppen, LG1 und LG2 und wird üblicherweise von drei Personen frequentiert. Da kein existierendes Smart Home für die Umsetzung des Prototyps verfügbar war, handelt sich bei diesem Raum um eine Büroräumlichkeit. Die Ergebnisse der Prototyp-Implementierung sind jedoch allgemeingültig und können auch ohne Anpassungen auf ein Smart Home angewendet werden.

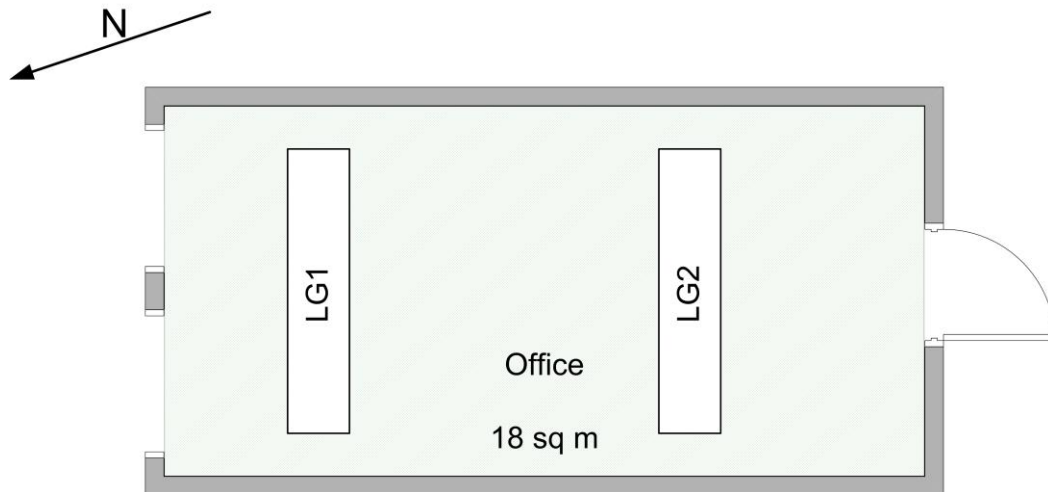


Abbildung 17: Testräumlichkeiten zur Evaluierung des profilbasierten ThinkHome-Prototyps

Die Zustände des Raums wurden im Rahmen der Evaluierung durch das Prozessmodell simuliert (Abbildung 12). Im Speziellen wurden die beiden Beleuchtungsgruppen durch das Modell nachgebildet. Die Belegung des Raums wurde durch einen einfachen Anwesenheits-Button realisiert, der die Aufgabe des Anwesenheitssensors übernimmt.

Der Prototyp wurde vom 16.04.2012 bis 05.06.2012 über 51 Tage einer Evaluierung unterzogen. Im Laufe dieses Testzeitraums (siehe Abbildung 18) haben sich auch einige Sonderzustände und -intervalle ergeben, die im Folgenden kurz erklärt werden:

- Das Intervall von 16.04.2012 bis 19.04.2012 kann als Initialisierungsphase gesehen werden. Daher gibt es für diese Tage keine dazugehörigen Muster.
- In der Prototypimplementierung ist keine Wochenend- oder Feiertagserkennung realisiert. Daher werden diese wie gewöhnliche Wochentage behandelt. Die zusätzlichen Feiertage in der Testperiode waren 01.05.2012, 17.05.2012 und 28.05.2012.
- Aufgrund von unvorhersehbaren Ereignissen im Testzeitraum, wie beispielsweise Stromausfälle, existieren weitere Tage ohne Verhaltensmuster:
 - 28.04.2012
 - 29.04.2012
 - 19.05.2012

- 20.05.2012
- 29.05.2012
- Ein Benutzerversehen in der Applikationsbedienung führte dazu, dass im Zeitraum von 01.06.2012 bis 04.06.2012 falsche Statuswerte gesammelt wurden. Diese Sonderfälle wurden nicht aus dem Testbereich entfernt. Sie dienten vielmehr dazu, zu testen, wie das System auf einzelne nicht vorhandene sowie falsche Profile („outliers“) reagiert.

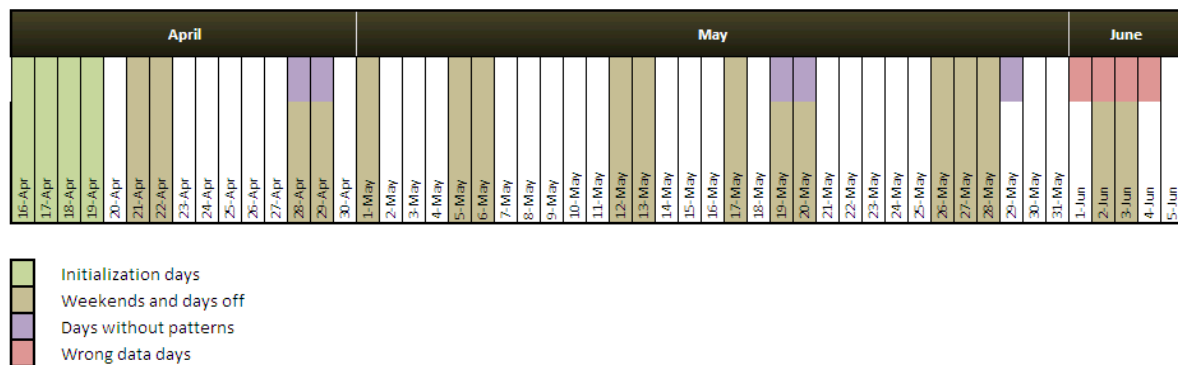


Abbildung 18: Vollständiger Evaluierungszeitraum mit Initialisierungsphase, Wochenenden und Tagen mit keinen bzw. falschen Daten.

Die Mustergeneratoren (*pattern generators*) verwendeten für den Prototyp Self-Organizing Maps (SOM) zur Mustererkennung. SOM Algorithmen berücksichtigen hierfür alle Profile und teilen diese in verschiedene Cluster ein. Die Anzahl der Cluster wurde hierbei für diese einfache Prototyprealisierung auf drei fixiert. Die Muster werden sodann in verschiedene Gruppen eingeteilt und aufgrund ihrer Zugehörigkeit zu verschiedenen Wochentagen kategorisiert. Bei drei Kategorien könnten diese Gruppen beispielsweise folgendermaßen aufgeteilt sein:

- Gruppe 1: Montag, Dienstag
- Gruppe 2: Mittwoch, Donnerstag, Freitag
- Gruppe 3: Samstag, Sonntag

Wetterwerte und deren Beschreibungen wurden als Strings von der Google Wetterapplikation übernommen (siehe Tabelle 1 im Anhang). Diese wurden in weiterer Folge im Prototyp eindeutig auf einen Variablenwert w_a gemappt. Für die Evaluierung der Korrelation zwischen künstlicher und natürlicher Beleuchtung wurde für diese Werte ein Mapping auf einen *outdoor_lighting* Wert mit folgender Charakterisierung erstellt:

- $w_b = 1$, gute natürliche Lichtverhältnisse.
- $w_b = 2$, durchschnittliche natürliche Lichtverhältnisse.
- $w_b = 3$, schlechte natürliche Lichtverhältnisse.

3.5.3 Evaluierung

3.5.3.1 Kenngrößen

Die Evaluierung des Prototyps verwendet zwei unterschiedliche Ansätze, um eine Bewertung von profilbasierten Anwendungen im ThinkHome-System vorzunehmen.

1. Korrektheit der Muster durch Verlässlichkeitswerte (*reliability*)

In Mustern prognostizierte Werte werden tageweise mit tatsächlich erkannten Werten verglichen und dadurch evaluiert. Für einen Beispieltag generiert das System zu Beginn des Tages (z.B. Beispiel 10.06.2012 0:00) das über Sensorik erkannte Anwesenheitsprofil für den vorhergegangenen Tag (*Occ_profile_09_06_2012*) und prognostiziert sodann das Muster für den neuen Tag (*Occ_pattern_10_06_2012*) unter Einbeziehung des Vortagesprofils. Das bedeutet, dass für jeden Tag ein vorhergesagtes Muster sowie ein tatsächlich erkanntes Profil vorhanden sind. Der pOK-Index (*prediction OK*), der zur Evaluierung des Prototyps verwendet wurde, beschreibt den Prozentsatz, zu dem die vorhergesagten Werte auch tatsächlich eingetroffen sind. Damit kann ein Vergleich von vorausgesagten Werten zu tatsächlich eingetretenen Situationen durchgeführt werden.

$$pOK\% = 100\left(1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N profile_{d[i]} \oplus pattern_{d[i]}\right)$$

Definition von pOK: Die Variable N steht hierbei für die Anzahl der Profelfelder. Diese wurde im Fall des Prototyps mit dem Wert N=48 belegt, da ein Sampling-Intervall von 30 Minuten vorgesehen war.

Die Zuverlässigkeit eines Musters wird andererseits mittels euklidischer Distanz im Pattern berechnet. Es kann hierbei festgestellt werden, dass eine durchschnittliche Differenz von 30 Minuten zwischen Muster und aktueller Situation eine Zuverlässigkeit von 0.92, eine Differenz von einer Stunde eine Zuverlässigkeit von 0.83 und eine Differenz von 1,5 Stunden eine Zuverlässigkeit von 0.75 ergibt.

2. Einfluss der natürlichen Beleuchtung (äußerlichen Gegebenheiten) auf die künstliche Beleuchtung im Gebäude

Hierbei wird wiederum der pOK-Index verwendet, um die Genauigkeit der vorhergesagten Muster für die Beleuchtungsgruppen zu messen. Weiters werden Kombinationen zwischen natürlicher Beleuchtung durch gute Wetterzustände (z.B. sonniges Wetter) und LG1 sowie LG2 im Prototyp berücksichtigt und zur folgenden Berechnung der Korrelation zwischen natürlicher und künstlicher Beleuchtung herangezogen. Die berücksichtigten Kombinationen sind hierbei:

- **Schlechte natürliche Beleuchtung** und **LG1** im Zustand „aus“
- **Durchschnittliche natürliche Beleuchtung** und **LG1** im Zustand „aus“
- **Gute natürliche Beleuchtung** und **LG1** im Zustand „aus“
- **Schlechte natürliche Beleuchtung** und **LG1** im Zustand „ein“

- **Durchschnittliche natürliche Beleuchtung** und **LG1** im Zustand „**ein**“
- **Gute natürliche Beleuchtung** und **LG1** im Zustand „**ein**“
- **Schlechte natürliche Beleuchtung** und **LG2** im Zustand „**aus**“
- **Durchschnittliche natürliche Beleuchtung** und **LG2** im Zustand „**aus**“
- **Gute natürliche Beleuchtung** und **LG2** im Zustand „**aus**“
- **Schlechte natürliche Beleuchtung** und **LG2** im Zustand „**ein**“
- **Durchschnittliche natürliche Beleuchtung** und **LG2** im Zustand „**ein**“
- **Gute natürliche Beleuchtung** und **LG2** im Zustand „**ein**“

Mit dieser Klassifizierung kann der Einfluss der natürlichen Beleuchtung auf den Zustand künstlicher Beleuchtungseinrichtungen relativ einfach abgebildet werden.

3.5.3.2 Beurteilung der Zuverlässigkeit sowie Korrektheit der erkannten Muster

Tabelle 2 im Anhang des Ergebnisberichts zeigt die Resultate in Bezug auf Zuverlässigkeit und Korrektheit der generierten Gewohnheitsmuster (*habit patterns*). Die Tabelle zeigt, dass die beiden Indizes *pOK* und *reliability* durchgehend hohe und somit akzeptable Werte aufweisen. Schlussfolgernd kann ein Smart Home-System, das diese Muster zur Berechnung des Benutzerverhaltens und -kontexts verwendet, eine effiziente Optimierung des Systems erreichen.

Zur weiteren Interpretation der Resultate zeigen die Abbildung 19, Abbildung 20 und Abbildung 21 überlagerte Kurven für die beiden Werte. Hierbei wurde der Wert der *reliability* mit dem Faktor 100 multipliziert, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass zwei vermeidbare negative Effekte bewusst in den Ergebnissen berücksichtigt wurden, um die Fehlerrobustheit des Ansatzes zu testen. Hierbei handelt es sich einerseits um Falschdaten (z.B. bei einer Fehlfunktion von Sensoren) und unvorhergesehene Abwesenheitstage (z.B. Feiertage), wobei die zweite Falschdatenart in einer Praxisimplementierung dem Clusteringalgorithmus problemlos bereits im Vorfeld mitgeteilt werden kann.

Im Allgemeinen zeigt eine Korrelation zwischen beiden Kurven eine positive Beurteilung des Systems in Hinblick auf die Gültigkeit seiner eigenen Vorhersagen. Die hohe Korrelation der beiden Kurven, speziell an fallenden Flanken, kann als exzellentes Signal für die Robustheit des Algorithmus für die Mustererstellung interpretiert werden. Diese Eigenschaft lässt den Schluss zu, dass profilbasierte Ansätze zu einer verbesserten Kontexterkenkung im Smart Home beitragen können. Ein niedriger *pOK* Wert ist daher nicht notwendigerweise ein schlechtes Resultat. Es zeigt nur, dass sich an diesem Tag das aktuell erkannte Benutzerverhalten vom erwarteten Verhalten unterschieden hat. Wenn diese Situation für einen bestimmten Tag öfters auftritt, ist es somit die Aufgabe des Smart Home-Systems, eine niedrigere Verlässlichkeit des Patterns (*reliability*-Wert) für diesen Tag vorauszusagen (vgl. Kreismarkierungen in Abbildung 19). In der Praxis treten solche Sonderfälle, also Tage, die nicht dem erwarteten Trend folgen, auf zwei verschiedene Arten auf:

- Vorhergesehen: Hierbei handelt es sich beispielsweise um bereits bekannte Feiertage oder Urlaubszeiten.
- Unvorhergesehen: Wenn Feiertage dem System nicht im Voraus mitgeteilt wurden oder eine sonstige unvorhergesehene Abwesenheit der Benutzer eintritt.

Werden solche Sonderfälle vom System als normaler Tag interpretiert, können diese Fehlinterpretationen noch lange nach Auftreten zu schlechten Mustern führen, da sie zukünftige Vorhersagen beeinflussen. Dies kann zu verzerrten Vorhersagen und unnötigerweise verringerten reliability-Werten führen (siehe Quadratmarkierung in Abbildung 19).

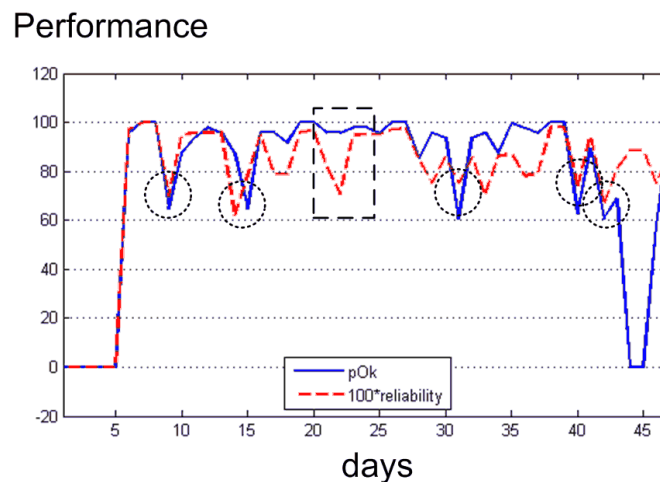


Abbildung 19: pOK und reliability Graphen für den gesamten Testzeitraum und den Datenwert Anwesenheit (*Occupancy*)

Eine Fehlinterpretation der ersten Art ist relativ einfach zu vermeiden, indem diese Tage dem System bereits im Voraus bekannt gemacht werden. Spezialfälle der zweiten Art können über spezielle Clustering-Mechanismen erkannt und von Musterberechnungen für diesen Tag ausgeschlossen werden. Der im Prototyp verwendete Clustering-Mechanismus (SOM) weist jedoch keine derartigen Filterfähigkeiten auf.

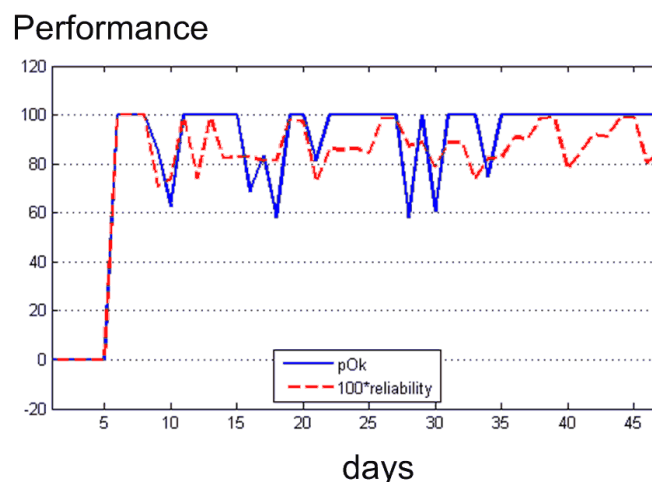


Abbildung 20: pOK und reliability Graphen für den gesamten Testzeitraum und den Datenwert Beleuchtungsgruppe 1 (*LG1*)

Im Testzeitraum gab es zudem eine Periode mit Falschdaten, die am 01.06.2012 um 18:00 startete und am 04.06.2012 um 10:00 endete. Da der erste und der letzte Tag teilweise korrekte Werte aufwiesen, sind die pOK Werte im Vergleich zu den anderen Tagen in dieser Periode höher.

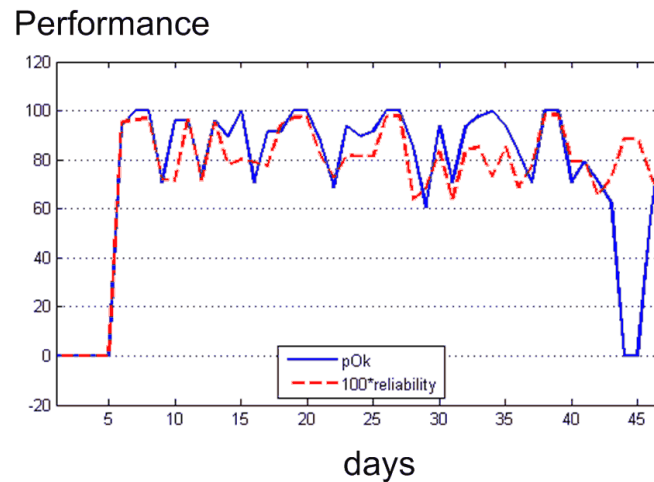


Abbildung 21: pOK und reliability Graphen für den gesamten Testzeitraum und den Datenwert Beleuchtungsgruppe 2 (LG2)

3.5.3.3 Einfluss von natürlichen Lichtverhältnissen auf Nutzungsprofile von Leuchtgruppen

Tabelle 3 im Anhang zeigt die erkannten natürlichen Lichtverhältnisse, während Tabelle 4 die Korrelation von natürlichen Verhältnissen und künstlicher Beleuchtung der Beleuchtungsgruppen LG1 und LG2 veranschaulichen.

Die Ergebnisse betreffend der Zeiten Zustand „An“ in Tabelle 4 sind im Einklang mit der Anordnung der beiden Beleuchtungsgruppen (vgl. Abbildung 17). Aufgrund der fensternahen Anordnung der Beleuchtungsgruppe LG1 bestand hierbei weniger Notwendigkeit zur Beleuchtung (27,2% der Zeiten mit erkannter Anwesenheit) als bei LG2 (68,1%), die im hinteren Bereich des Raumes installiert ist.

Derselbe Faktor kann für die höhere Korrelation von LG1 mit natürlichen Lichtverhältnissen verantwortlich gemacht werden, wobei die Nutzung von LG2 hierbei keine erkennbare Beziehung mit natürlichen Gegebenheiten aufweist. Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus dem Fakt, dass LG1 bei guten natürlichen Lichtverhältnissen nur sehr selten eingeschaltet wurde (10,7% der Gesamtzeit mit Anwesenheit), die Nutzung dieser künstlichen Lichtquelle jedoch bei schlechteren Lichtverhältnissen erheblich zunimmt (über 30% Mehrnutzung). Andererseits zeigt die Lichtquelle LG2 eine relativ insignifikante Mehrnutzung bei schlechten Lichtverhältnissen (ca. 10%).

Aus diesem Grund kann es als sinnvoll für zukünftige Kontrollstrategien erachtet werden, den LG-Status durch LG-Muster und erkannte tatsächliche Anwesenheiten sowie der erkannten natürlichen Beleuchtung, wie folgt, zu berechnen:

$$LxG_prediction = f(LxG_pattern, Occupancy, Weather_st)$$

Im Testfall führt diese Art der weiterentwickelten Kontrolle zu einer relativ kleinen aber merkbaren Verbesserung der Beleuchtungsgruppe 2 (LG2), von 89,2 % auf 92,1 %. Dies ist auf den relativ geringen Zusammenhang dieser Gruppe mit der gemessenen natürlichen Beleuchtung zurückzuführen. Die richtige Voraussage der Beleuchtungsgruppe 1 (LG1) konnte hierbei jedoch in größerem Ausmaß verbessert werden, von 93,3% auf 98,5% (vgl. Abbildung 22).

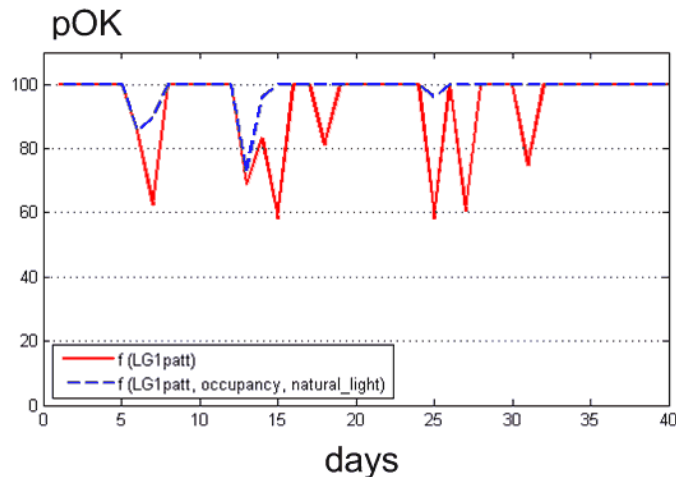


Abbildung 22: pOK Werte der Beleuchtungsgruppe 1 (LG1). Der Graph $f(LG1patt)$ stellt die Werte in Bezug auf das vorhergesagte Musters dar, während der Graph $f(LG1patt, occupancy, natural_light)$ auch noch zusätzlich die aktuell erkannte Anwesenheit sowie die natürliche Beleuchtungssituation mit einbezieht.

4 Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms

4.1 Einpassung in das Programm

Das vorliegende Projekt wurde vorrangig unter Bezug auf die Aktionslinie „Schlüsseltechnologien und Konzepte für Gebäude der Zukunft“ eingereicht. Dabei fokussiert ThinkHome vor allem auf den Teilbereich „Auf dem Weg zum Plus-Energie-Haus“.

ThinkHome verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz, um das Ziel einer gesteigerten Energieeffizienz zu erreichen. Durch intelligente Kontrollstrategien kann – bei einem minimierten Energieeinsatz – der Komfort für die Bewohner oder Nutzer des Gebäudes auf einem hohen Niveau gehalten werden. Dadurch werden Energiebedarf und laufende Betriebskosten gesenkt sowie der Ausstoß treibhausrelevanter Emissionen verringert. Durch eine durchgängige Einbeziehung und Berücksichtigung des Faktors „Mensch“ in der Designphase gelingt es beim vorliegenden Projekt, die normalerweise zu befürchtenden Komforteinbußen fast vollständig abzufedern. Das System ist aus technologischer Sicht als Softwaresystem konzipiert, wobei die einzelnen Bestandteile frei verfügbar sind. Diese technologische Basis kann von verschiedenen Interessenten aufgegriffen und erweitert werden, wodurch eine starke Verbreitung erwartet werden darf.

ThinkHome leistet ebenso wichtige Vorarbeiten für die Umsetzung von Plus-Energie Häusern. Das zugrundeliegende Softwaresystem erlaubt die bevorzugte und zeitlich abgestimmte Nutzung von dezentral erzeugter Energie, wobei Vorhersagemechanismen eine Planung des Energieeinsatzes zulassen. Dies erleichtert die Einbindung der Gebäude in Smart Grids (Kastner et al., 2012).

Da in Österreich der flächendeckende Einsatz von Automatisierungstechnologie (Haustechnik) vor allem im Eigenheim noch nicht gegeben ist, wurde sichergestellt, dass ein Einsatz des ThinkHome-Systems bereits bei der Verfügbarkeit von einfacher Haustechnik möglich ist. Dadurch können auch bestehende Gebäude ohne große zusätzliche Investitionen im Betrieb energetisch optimiert werden. Im Fall von bereits höher automatisierten Gebäuden (Zweckbau, Bürogebäude) kann das ThinkHome-System unverändert eingesetzt werden. In diesen Fällen ist ein größeres Optimierungs- und damit Einsparungspotential gegeben.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass das ThinkHome-Projekt theoretisch fundierte und praktisch verwertbare Lösungsansätze geschaffen hat, die

- die Energieeffizienz im Gebäude steigern,
- eine Reduktion der Lebenszykluskosten des Gebäudes ermöglichen,
- eine selbständige Anpassung an klimatische, bauliche, individuelle, Ausstattungs- oder Nutzungsänderungen vorsehen,
- für eine zukünftige Integration in Smart Grids und Smart Cities ausgelegt sind,
- unter Einbeziehung von ExpertInnen und NutzerInnen entstanden sind und mit den Bedürfnissen und Komforterwartungen der zukünftigen BenutzerInnen abgestimmt sind.

Das ThinkHome-Projekt hat dabei Übereinstimmungen mit vielen Aktionspunkten der ersten Ausschreibung, wobei der Fokus des Projekts auf „Intelligente Haustechniksysteme“ gelegt wurde. Es wurde ein **Gesamtkonzept** entwickelt, das auf Basis vorhandener Haustechniksysteme eine **optimierte Steuerung und Vernetzung** diverser Geräte (insbesondere Energieverbraucher) im Gebäude realisiert. Dabei werden neben den traditionellen Haustechnikfeldern auch weitere Geräte, wie Unterhaltungselektronik und Haushaltsgeräte, in die Ansätze integriert. Die Steuerungs- und Regelungskonzepte sehen ebenfalls die bestmögliche Nutzung eigenproduzierter Energie vor und stehen demnach im Zusammenhang mit dem Ausschreibungspunkt „**Gebäudeintegrierte Energieerzeugung, Energiespeicherung und -nutzung**“. Darüber hinaus wurden ausgewählte Themengebiete wie die prädiktive Klimaregelung forciert, so dass in diesen Bereichen ein Hauptteil der Entwicklungsarbeit für **innovative, neue Komponenten** bereits geleistet wurde. Aufgrund einer ganzheitlichen Betrachtung des Forschungsfeldes „intelligentes Gebäude“ wurde im Rahmen des Projekts auch bereits der Anknüpfungspunkt für eine bevorstehende **Integration der Gebäude in übergeordnete Energiesysteme** geschaffen.

4.2 Beitrag zum Gesamtziel des Programms

Im Detail setzt das ThinkHome-Projekt in vielfältiger Weise an folgenden allgemeinen Kriterien der ersten Ausschreibung an.

Schaffung der technologischen Basis für das Gebäude der Zukunft, insbesondere das Plus-Energie-Haus:

Das ThinkHome-System und die dazu gehörenden Kerntechnologien liefern eine wichtige technologische Basis für zukünftige Niedrig- bzw. Plus-Energie Gebäude. Die modulare, offene Softwarearchitektur kombiniert mit einer einheitlichen Wissensbasis ermöglicht die flexible Ankopplung von weiteren Softwaremodulen. Zusätzlich wurde das ThinkHome-System unter der Verwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz entworfen. Es ist daher höchst adaptiv und zu einem gewissen Maß auch selbstanpassungsfähig, wodurch die spätere Integration weiterer Systeme stark vereinfacht wird. Neben der speziellen Softwaretechnik wurde auch Forschung im Bereich der Steuerungs- und Regelungsstrategien der klassischen Haustechnikkomponenten betrieben. So wurde einerseits der Steuerungshorizont um Unterhaltungselektronik und Haushaltsgeräte erweitert, um so weitere Optimierungsfelder für die Kontrollstrategien zu erschließen. Andererseits schafft diese Erweiterung auch neue Möglichkeiten zur Berücksichtigung und Integration gebäudeinterner Energieproduktionssysteme. Besonderes Augenmerk wurde auf die bevorzugte Nutzung gerade verfügbarer lokal produzierter Energie gelegt. Mit Hilfe von Vorhersagealgorithmen, die unter anderem Wettersituation, Gebäudenutzung und verfügbare Endgeräte im Haushalt in die Berechnung einbeziehen, kann so die gerade lokal verfügbare Energie aus erneuerbaren Energieträgern bestmöglich und zeitnah eingesetzt werden. Ebenso können an dieses Gesamtkonzept übergeordnete Regelstrategien angekoppelt werden, die zum Beispiel Demand Side Management oder die lokale Verteilung der Energie auf Siedlungs-/Orts-/Bezirksebene vorsehen.

Unterstützung der internationalen Vernetzung der österreichischen KompetenzträgerInnen, Verstärkung des internationalen Know-how-Transfers sowie Aufbau von Humanressourcen und Integration vorhandenen Wissens in entsprechende Ausbildungen:

Das Motto des Projekts „ThinkHome is open for all“ wurde im Besonderen auch bei der Verbreitung der Ergebnisse und des neu generierten Know-Hows verfolgt. So wurden Ergebnisse des Projekts bei über 20 wissenschaftlichen Veranstaltungen präsentiert. In diesen Rahmen konnte ein intensiver Wissensaustausch mit internationalen ExpertInnen stattfinden, wodurch auch aktuelle Forschungsergebnisse in ThinkHome integriert werden konnten. Durch diese Dissemination auf wissenschaftlichen Veranstaltungen erfolgte ein Ideen- und Know-How Transfer nach Österreich, der dazu beigetragen hat, bessere Projektergebnisse rascher zu erreichen. Ebenso wurde das ThinkHome-Projekt auf zahlreichen Veranstaltungen mit regem Interesse aufgenommen, wodurch die Thematik nachhaltiger Gebäude international stärker verankert wurde und Österreich als ein führender Forschungsstandort in diesem Gebiet wahrgenommen wurde.

Neben der rein wissenschaftlichen Verwertung der Ergebnisse wurde als zweite Säule der Dissemination die Zusammenarbeit und Einbeziehung verschiedener beteiligter Stakeholder und Kompetenzträger verfolgt. Diese erfolgte zumeist im Rahmen von öffentlich zugänglichen Workshops, wo allgemeine Themengebiete nachhaltiger Gebäude sowie die Lösungskonzepte des ThinkHome-Projekts zur Diskussion standen. Durch den Austausch mit erfahrenen Planern, Architekten, Umwelt- und Energietechnikern konnte die Ausrichtung des Projekts laufend überprüft werden sowie eine spätere praktische Verwertbarkeit der Projektergebnisse verbessert werden.

In Zusammenhang mit den besuchten Workshops ist auch der Forschungsschwerpunkt „Energie und Umwelt“ der Technischen Universität Wien zu erwähnen, in dem das ThinkHome-Projektteam seit Gründung stark involviert ist. Dieser bot dem Projekt eine ausgezeichnete Plattform, die eine erhöhte Außenwirkung mit sich brachte. Diese führte zur Möglichkeit zusätzlicher Präsentationen des Projekts, zu Einladungen zur Teilnahme an weiteren Workshops und zu mehreren Kooperationsanfragen österreichischer KMUs.

Die zur Verfügung gestellten Fördermittel wurden zu einem hohen Anteil für die Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern aufgewendet. So wurden im Rahmen des Projekts drei PhD Studenten angestellt, die das Projekt von Beginn an begleiteten und im Rahmen von ThinkHome ihre Dissertation abschließen werden. Die Einreichung aller drei Arbeiten ist noch 2012 geplant. Zusätzlich dazu wurden mehrere Masterstudenten in das Projekt einbezogen, die in ausgewählten Bereichen die Entwicklung des ThinkHome-Systems unterstützt haben und teilweise auch Masterarbeiten dazu verfasst haben.

Nicht zuletzt fanden und finden die Projektergebnisse kontinuierlich Berücksichtigung bei der Ausbildung von Studenten. Im Rahmen der universitären Lehre des Arbeitsbereichs Automatisierungssysteme wurden Forschungsthemen von ThinkHome direkt in die Lehrveranstaltungen einbezogen. Dadurch wurde bei Studenten das Wissen über den aktuellen Stand und die Herausforderungen von Smart Homes sowie energieeffizienten Gebäuden gestärkt und so der Grundstein für weiterführende Forschung und Entwicklung in diesem Bereich gelegt.

4.3 Einbeziehung der Zielgruppen (Gruppen, die für die Umsetzung der Ergebnisse relevant sind) und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt

Wie bereits erwähnt, wurden im Rahmen von ThinkHome zahlreiche Informationsveranstaltungen und Workshops abgehalten, die unter anderem die Ziele der Einbeziehung von Expertenwissen und den Know-How Transfer verfolgt haben. So wurden die wichtigen Stakeholder Architekten, Planer, Gebäudephysiker, Meteorologen und Energietechniker gezielt zum Erfahrungsaustausch eingeladen, um einerseits über aktuelle und zukünftige technische Möglichkeiten wie das ThinkHome-System zu informieren und andererseits um Anregungen, Hinweise und Lösungsansätze der Stakeholder in der Planung und Systementwicklung zu berücksichtigen. Die im Rahmen der Workshops erhaltenen

Informationen wurden somit zu einer Verbesserung des ThinkHome-Ansatzes genutzt. Zugleich wurde die Möglichkeit einer späteren Überführung der Projektergebnisse zur praktischen Anwendung verbessert.

Der Arbeitsbereich Automatisierungssysteme pflegt zusätzlich intensive Kontakte zu Herstellern von Automationslösungen, wie sie in nachhaltigen Gebäuden mit steigender Häufigkeit eingesetzt werden. Durch diese Kooperation konnte sichergestellt werden, dass die Lösungen des ThinkHome-System mit den am Markt etablierten Automationssystemen kompatibel sind und deren Möglichkeiten so gut als möglich ausreizen. Dennoch muss angemerkt werden, dass das ThinkHome-System in keiner Weise auf ein spezifisches System oder auf einen bestimmten Hersteller zugeschnitten wurde, sondern auf Basis jeglicher Automationskomponenten operieren kann. Vielmehr wurden die im Laufe des Projekts identifizierten Verbesserungsmöglichkeiten an den darunterliegenden Systemen sowohl der Scientific Community als auch den Herstellern der Automationslösungen zur Verfügung gestellt.

Da sich das ThinkHome-Projekt in erster Linie als Grundlagenforschungsprojekt versteht, wurde von Beginn an die Kooperation und Kommunikation mit internationalen Wissenschaftlern der einzelnen Fachbereiche forciert. Diese half der gegenseitigen Ideengabe, unterstützte die Weiterentwicklung des ThinkHome-Ansatzes und diente schlussendlich der Validierung der Projektergebnisse.

4.4 Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale (Marktpotenzial, Verbreitungs- bzw. Realisierungspotenzial) für die Projektergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden zuerst die theoretischen Grundlagen des ThinkHome-Systems erarbeitet. Die grundsätzliche Umsetzbarkeit des ThinkHome-Systems wurde zudem durch einen Prototypen gezeigt, bei dem ausgewählte Funktionen implementiert, getestet und auf ihre Performance hin evaluiert wurden. Da die Spezifikationen in hohem Detaillierungsgrad vorliegen und die Auswertung der Evaluierungsergebnisse ein hohes Nutzungspotential zeigen, ist eine an das Projekt anschließende Weiterentwicklung des Systems zur Marktreife anzustreben. In erster Linie sollte dabei eine Umsetzung des Gesamtsystems ThinkHome erfolgen, um so alle aufeinander abgestimmten Teile auch im realen Betrieb zur Verfügung zu haben und so die Einsparungspotentiale besser nutzen zu können. Zur Überführung der Projektergebnisse in ein Produkt ist jedoch eine anfängliche Investition in Form von Entwicklungszeit und -budget nötig. Für die Entwicklung eines kommerziell erfolgreichen Produkts ist zudem eine Kooperation mit etablierten Systementwicklern und Gebäudeautomationsherstellern von Vorteil. So können bereits bei der Entwicklung allfällige besonders im Realbetrieb auftretende Schwierigkeiten behoben werden. Weiters kann in den Bereichen Vertrieb und Marketing eine Kooperation erfolgen.

Ist eine Umsetzung aller Teile des Gesamtsystems aus zeitlichen oder finanziellen Gründen nicht möglich, kann der bestehende Prototyp sukzessive um zusätzliche Funktionalitäten

erweitert werden. Denkbar ist in diesem Zusammenhang zum Beispiel die Entwicklung einer auf den Ideen von ThinkHome aufbauenden, maßgeschneiderten Lösung für ausgewählte Anwendungsfälle im Smart Home.

Eine weitere Möglichkeit der Umsetzung stellt die entkoppelte Weiterentwicklung einzelner ThinkHome-Komponenten dar. In diesem Fall bieten sich vor allem die Forschungsergebnisse im Bereich Kontrollstrategien für eine Verwertung an. Einzeln betrachtet haben diese mit viel Know-How verknüpften Algorithmen das Potential ohne große Anpassungen in bestehende Systeme integriert und dort zur Erreichung von höherer Energieeffizienz genutzt zu werden. Ebenfalls ist dies für eine weitere Nutzung der Wissensbasis denkbar.

Das allgemeine Marktpotential der im Rahmen des Projekts entwickelten Lösungen wird als hoch eingeschätzt, insbesondere da Energieeffizienz in Gebäuden in den kommenden Jahren von stark zunehmender Bedeutung sein wird. ThinkHome als adaptives System hat das Potential als zusätzliches Gerät in vielen Gebäuden zur Anwendung zu kommen und dort eine Optimierung der Energieeffizienz durchzuführen. Die mögliche Verbreitung umfasst dabei alle Gebäude, in denen Automationstechnologie zur Verfügung steht. Durch den vermehrten Bau von Niedrig- und Nullenergie-Häusern, wo Automationstechnologien eine zentrale Rolle spielen, wird der mögliche Einsatzbereich von solchen ThinkHome-Geräten in der Zukunft stetig steigen. Ebenso wirkt sich der Trend zu stärkerer Vernetzung aller Geräte im Haushalt positiv auf die Marktchancen von ThinkHome aus.

5 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Durch die intensive Beschäftigung mit dem Thema Energieverbrauch in Gebäuden hat sich die ursprüngliche Annahme des Projektteams, dass Energieeffizienz ein wesentliches und gerade erst am Beginn stehendes Forschungsgebiet ist, stetig verfestigt. Eine Erkenntnis ist daher, dass bereits heute ein großer Bedarf an Energieeffizienz-steigernden Maßnahmen besteht, und auch dass Personen bereit sind, diese Maßnahmen anzunehmen. Bedingung dafür ist, die Verfügbarkeit eines einfachen, am besten Fall selbstdenkenden Systems. Es wurde ersichtlich, dass gewisse Abstriche beim Komfort eher toleriert werden, wenn sie die Benutzer mit konkreten Effizienzmaßnahmen in Bezug bringen können. Die automatische Kontrolle von Funktionen im Gebäude/Haus ist wichtig, um den alltäglichen Komfort zu erhöhen und trotzdem Energie einzusparen. Gleichzeitig dürfen Benutzer nicht das Gefühl haben, dass ihnen keine Eingriffsmöglichkeiten bleiben.

Die Schlussfolgerung daraus ist, dass ein neues System nur unter Einbeziehung der Benutzer erfolgreich entwickelt werden kann. Die Maximierung der Energieeffizienz im Haus ist dabei nur möglich, wenn verschiedene Teilaspekte, wie Gebäudestruktur, verfügbare Systeme und Geräte, Nutzertätigkeiten und vieles mehr von Beginn an mit betrachtet werden. Dieser Herausforderung wird mit einem ganzheitlichen Ansatz bereits bei Design und Konzeption begegnet.

Auch im Zuge der immer präsenter werdenden Diskussion über erneuerbare Energieträger hat das Projektteam erkannt, dass deren Integration in Zukunft von entscheidender Bedeutung sein wird. Nachdem bauliche Maßnahmen in Passivhäusern den Energieverbrauch bereits signifikant reduzieren, steht der nächste Optimierungssprung durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger erst bevor. In ThinkHome wurden diese Quellen daher bereits von Beginn an einbezogen. Eine Erkenntnis in diesem Zusammenhang ist die hohe Bedeutung von interdisziplinären Ansätzen und dem Erfahrungsaustausch mit Experten aus verwandten Forschungsfeldern und Industrie, wie Architekten, Bauplanern oder Energietechnikern.

Durch die Integration von Forschungsthemen in die Lehre konnte erkannt werden, dass die heranwachsende Generation ein wesentliches höheres Problembewusstsein in Sachen Energie und Umwelt hat. Die fachlichen Ergebnisse von ThinkHome haben dazu beigetragen, Studenten neue Möglichkeiten aufzuzeigen und sie allgemein mit dem Problemfeld und seinen Lösungsansätzen besser vertraut zu machen.

Die drei am Projekt federführend beteiligten Jungwissenschaftler streben nach Projektende die Fertigstellung ihrer Dissertationen im Bereich der Smart Homes an. Zu diesem Zweck werden die bisherigen Forschungsergebnisse nochmals beleuchtet und gegebenenfalls erweitert oder verbessert. Weiters sollen die Kompetenzen des Instituts im Bereich der Gebäudeautomation und bei nachhaltigen Betriebsstrategien für Smart Homes weiter ausgebaut werden. Dazu stellen die Forschungsergebnisse essentielle Grundlagen für weiterführende Forschungen und die wissenschaftliche Wissensvermittlung an Studierende dar.

Nicht zuletzt sollen die erarbeiteten Ergebnisse zum Grundstock für die Einreichung wissenschaftlicher Folgeprojekte werden. Dabei sind zum einen Programme zur Weiterentwicklung Richtung Marktauglichkeit und zum anderen Kooperationen mit Industriepartnern vorgesehen.

Die an den Projektergebnissen interessierten Gruppen können in vier Kategorien eingeteilt werden. Erstens stellen die Projektergebnisse eine exzellente Grundlage für weiterführende Forschung auf den Gebieten Smart Homes, Kontrollstrategien und Wissensmodellierung dar. Daher war bereits während des Projekts der Austausch mit anderen Forschern, privaten Dienstleistern und auch Industrieunternehmen ein häufig genutzter Baustein der Dissemination.

Ebenso hat sich gezeigt, dass seitens der Öffentlichkeit (Medien) wiederholt Anfragen und Nachfragen zu Projektergebnissen kamen. Auch gibt es eine zunehmend große Zahl an umweltbewussten Privatpersonen, die aus den Ergebnissen beispielsweise Energiespartipps ableiten möchten. Als dritte Säule können Firmen gesehen werden, die Weiterentwicklungen aufbauend auf der Grundlagenforschung betreiben möchten.

Zu guter Letzt können auch Experten aus den angrenzenden Disziplinen die Forschungsergebnisse nutzen. Für diese Spezialisten in anderen Bereichen wird ersichtlich, wie bestehende Technologien besser in einem Smart Home integriert werden können und auch in welche Richtungen sie selbst weiterforschen können. Es wird daher möglich, ihre

Forschungen zum Teil auch der verbesserten Integration ihrer Technologien und Ansätze im Smart Home zu widmen und so insgesamt höhere Effizienzsteigerungen zu bewirken.

6 Ausblick und Empfehlungen

Von einem wissenschaftlichen Standpunkt aus betrachtet stellt das ThinkHome-Projekt viele Möglichkeiten zur weiteren Forschung und Entwicklung dar. Grundsätzlich kann die Fortführung der Arbeiten auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Zum einen können weitere Grundlagen und Lösungsansätze erforscht werden, die andere Bereiche des Smart Homes abdecken (z.B. die noch stärkere Integration des Smart Homes in ein Smart Grid oder die Berücksichtigung weiterer erneuerbarer Energiequellen). Zum anderen ist es möglich, den Schwerpunkt der Forschung auf die Weiterentwicklung der bestehenden Technologien/Systeme und Algorithmen zu legen. Diese können dabei schrittweise verbessert werden und auch für den täglichen praktischen Einsatz optimiert werden. In diesem Bereich stellt vor allem der erstellte Prototyp eine gute Ausgangsbasis dar. Dieser kann um Funktionalitäten erweitert werden. Auch die bereits implementierten Algorithmen und Kontrollstrategien können weiter optimiert und verfeinert werden.

Da es sich beim vorliegenden Projekt um die Projektart Grundlagenforschung handelt, ist eine direkte Umsetzung des Systems als Produkt nicht ohne weitere Entwicklungsarbeit möglich. Dennoch stellt der in Kapitel 3.5 präsentierte Prototyp eine hervorragende Grundlage für weitere Entwicklungen dar. Auf dem Prototyp bauen im Moment unter anderem folgende Anwendungen im Smart Home-Bereich auf:

- Automatische Steuerung der Sollwert-Raumtemperatur: In dieser Anwendung werden die thermischen Voraussetzungen des zu konditionierenden Raums bewertet und eine Sollwert-Temperatur abhängig von momentaner Anwesenheit und Gewohnheitsprofilen für Anwesenheit sowie Komforttemperaturen berechnet.
- Kontrolle der thermischen Behaglichkeit: In Zeiten, in denen das Haus nicht besetzt ist, können von einem derartigen Service Lüftung, Verschattung sowie Air Conditioning frei kontrolliert werden, um den Raum mit möglichst niedrigem Energieaufwand in bestmöglichen Bedingungen zu halten.
- Automatische Beleuchtungssteuerung: Die in Profilen gesammelten Datenwerte von Anwesenheit, künstlicher sowie natürlicher Beleuchtung erlauben, wie bereits gezeigt, die automatische Anpassung der Innenraumbeleuchtung an Benutzervorlieben sowie -bedürfnissen.

Ausgehend von diesen Anwendungen ist bei entsprechender Ressourcenverfügbarkeit eine Heranführung an ein marktreifes Produkt möglich. In jedem Fall können die in ThinkHome entwickelten Technologien im Rahmen von Demonstrationsobjekten weiterentwickelt und auch praktisch in realitätsnahen Szenarien erprobt werden. Die Herausforderung bei einer solchen Weiterentwicklung besteht in der praktischen Umsetzung von Teilaspekten des ThinkHome-Systems. So gehen die entwickelten Kontrollstrategien unter anderem von der

Verfügbarkeit einer Vielzahl von Aktuatoren und Sensoren aus, die zum jetzigen Zeitpunkt nur bei ausgewählten kommerziellen Bauvorhaben auch physikalisch vorhanden sind.

7 Literatur-/ Abbildungs- / Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

Augusto Juan, Nugent Chris. *Smart Homes Can Be Smarter*. Designing Smart Homes, The Role of Artificial Intelligence, 1–15, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006.

Braubach Lars, Pokahr Alexander, Lamersdorf Winfried. *Jadex: A BDI-agent system combining middleware and reasoning*. Software agent-based applications, platforms and development kits, 143–168, Birkhäuser Verlag, 2005.

Cook Diane, Youngblood Michael, Heierman Edvin, Gopalratnam Karthik, Rao Sira, Litvin Andrey, Khawaja Farhan. *MavHome: An Agent-based Smart Home*. Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'03), 521–524, 2003.

Davidsson Paul, Boman Magnus. *A Multi-Agent System for Controlling Intelligent Buildings*. IEEE Proceedings of the Fourth International Conference on MultiAgent Systems, 377–378, 2000.

Hagras Hani, Callaghan Victor, Colley Martin, Clarke Graham, Pounds-Cornish Anthony, Duman Hakan. *Creating an Ambient-Intelligence Environment Using Embedded Agents*. IEEE Intelligent Systems, Volume 19, Issue 6, 12–20, 2004.

Hofer Richard. *Untersuchung des Einflusses von Regelungsstrategien auf den Heizwärmebedarf und die operative Raumtemperatur bei unterschiedlichen Gebäudestandards*. Diplomarbeit TU Wien, 2011.

Iglesias Felix, Kastner Wolfgang. *Usage Profiles for Sustainable Buildings*. Proceedings of the 15th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 1–8, 2010.

Iglesias Felix, Kastner Wolfgang, Reinisch Christian. *Impact of user habits in smart home control*. Proceedings of the 16th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 1–8, 2011.

Iglesias Felix, Cantos Gaceo Sergio, Kastner Wolfgang, Montero Morales José A. *Behavioral profiles for building energy performance using Exclusive SOM*. IFIP Engineering Applications of Neural Networks, Volume 363/2011, 31–40, 2011.

Iglesias Felix, Kastner Wolfgang. *Clustering methods for occupancy prediction in smart home control*. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 1321–1328, 2011.

- Iglesias Felix, Kastner Wolfgang, Cantos Gaceo Sergio, Reinisch Christian. *Electricity Load Management in Smart Home Control*. Proceedings of the International Conference on Building Simulation (IBPSA), 957–964, 2011.
- Iglesias Felix, Kastner Wolfgang. *Thermal comfort support application for smart home control*. Ambient Intelligence – Software and Applications, Volume 153/2012 109–118, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- Iglesias Felix, Kastner Wolfgang, Kofler Mario J. *Holistic Smart Homes for Air Quality and Thermal Comfort*. Intelligent Decision Technologies, to be published, 2012.
- Iglesias Felix, Kastner Wolfgang. *Detecting User Dissatisfaction in Ambient Intelligence Environments*. Proceedings of the 17th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 1–4, 2012.
- Jorge Daniel, Gonçalves Viegas. *Ubiquitous Computing and AI towards an inclusive Society*. ACM Proceedings of the EC/NSF Workshop on Universal Accessibility of Ubiquitous Computing: Providing for the Elderly, 37–40, ACM, New York, 2001.
- Kalogirou Soteris. *Applications of Artificial Neural Networks for Energy Systems*. Applied Energy, Volume 67, Issues 1–2, 17–35, Elsevier Science Ltd., 2000.
- Kastner Wolfgang, Kofler Mario J., Reinisch Christian. *Using AI to Realize Energy Efficient Yet Comfortable Smart Homes*. Proceedings of the 8th IEEE Workshop on Factory Communication Systems (WFCS), 169–172, 2010.
- Kastner Wolfgang, Reinisch Christian, Kofler Mario J. *ThinkHome*. Tagungsband E-Nova 2011: Nachhaltige Gebäude, Band 15, 101–110, 2011.
- Kastner Wolfgang, Kofler, Mario J., Reinisch Christian. *Wissensrepräsentation für das adaptive Eigenheim im Kontext von Smart Cities*. e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, Volume 129, Number 4, 286–292, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012.
- Kofler Mario J., Kastner Wolfgang. *A Knowledge Base for Energy-Efficient Smart Homes*. Proceedings of the 1st IEEE International Energy Conference & Exhibition (ENERGYCON), 85–90, 2010.
- Kofler Mario J., Reinisch Christian, Kastner Wolfgang. *An Intelligent Knowledge Representation of Smart Home Energy Parameters*. Proceedings of the World Renewable Energy Congress (WREC), 921–928, 2011.
- Kofler Mario J., Reinisch Christian, Kastner Wolfgang. *A semantic representation of energy-related information in future smart homes*. Energy and Buildings, Volume 47, 169–179, Elsevier Science Ltd., 2012.
- Kofler Mario J., Christian Reinisch, Wolfgang Kastner. *An Ontological Weather Representation for Improving Energy-Efficiency in Interconnected Smart Home Systems*.

Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling/Artificial Intelligence and Soft Computing, 2012.

Liang Neng-Shiang, Fu Li-Chen, Wu Chao-Lin. *An Integrated, Flexible, and Internet-based Control Architecture for Home Automation System in the Internet Era*. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1101–1106, 2002.

Mozer Michael. *The Neural Network House: An Environment that Adapts to its Inhabitants*. Proceedings of the American Association for Artificial Intelligence Spring Symposium on Intelligent Environments, 110–114, 1998.

Pokahr Alexander, Braubach Lars, Lamersdorf Winfried. *Jadex: A BDI reasoning engine*. Multi-Agent Programming, 149–174, Springer Science+Business Media Inc., 2005.

Qiao Bing, Liu Kecheng, Guy Chris. *A Multi-Agent System for Building Control*. Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT), 653–659, 2006.

Reinisch Christian, Kofler Mario J., Kastner Wolfgang. *ThinkHome: A Smart Home as Digital Ecosystem*. Proceedings of the 4th IEEE Conference on Digital Ecosystems and Technologies, 256–261, 2010.

Reinisch Christian, Kofler Mario J., Iglesias Felix, Kastner Wolfgang. *ThinkHome: Energy Efficiency in Future Smart Homes*. EURASIP Journal on Embedded Systems, Volume 2011:18, Hindawi Publishing Corp., New York, 2011.

Reinisch Christian, Kastner Wolfgang. *Agent based control in the Smart Home*. Proceedings of the 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), 334–339, 2011.

Yang In-Ho, Yeo Myoung-Souk, Kim Kwang-Woo. *Application of Artificial Neural Network to Predict the Optimal Start time for Heating System in Building*. Energy Conversion and Management, Volume 44, Issue 17, 2791–2809, Elsevier Science Ltd., 2003.

Zhang Haiato, Wang Fei-Yue, Ai Yunfeng. *An OSGi and Agent Based Control System Architecture for Smart Home*. Proceedings of the IEEE Conference on Networking, Sensing and Control, 13–18, 2005.

Internetquellen

ThinkHome-Website: <http://www.auto.tuwien.ac.at/thinkhome>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Use Case Diagramm für den Anwendungsfall „Waschmaschine aktivieren“	18
Abbildung 2: ThinkHome – Technische Systemübersicht	19
Abbildung 3: High-Level Überblick der dargestellten Domänen in der ThinkHome-Wissensbasis. Die Wissensbasis teilt sich in 5 unabhängige Domänen-Ontologien, die die wichtigsten Parameter für ein autonomes Smart Home-System enthalten: Wetter und externe Einflüsse, Gebäudeinformationen, Komfort und Benutzervorlieben, Prozesse und Verhaltensprofile sowie Energieinformation und Gerätschaften	23
Abbildung 4: Konkrete Abbildung einer energiewirksamen Gerätschaft in der Wissensbasis. Gezeigt werden unter anderem die möglichen Zustände des Geräts sowie dessen Energieverbrauch und -produktion in den einzelnen Zuständen. Ebenso sind die Art der benötigten und zur Verfügung gestellten Energie sowie der Standort der Gerätschaft abgebildet.....	25
Abbildung 5: Struktur der Jadex-Architektur (Braubach et al., 2005)	31
Abbildung 6: Goal-Plan Hierarchie für thermische Behaglichkeit	33
Abbildung 7: Beispiel eines Wasserverbrauchsprofils eines spezifischen Haushalts an einem bestimmten Tag.....	36
Abbildung 8: Identifizierte Anwesenheitsmuster – Occupancy = 1 bedeutet Anwesenheit, Occupancy = 0 bedeutet Abwesenheit. In diesem Fall wurden drei verschiedene Muster gefunden.	37
Abbildung 9: Zustandsdiagramm für den „Type of Time Period“ Agenten.	38
Abbildung 10: Temperaturregelung mit Hilfe von Anwesenheitsprofilen, mit $P_t = 1h$, $W_t = 2h$ und $B_t = 4h$	39
Abbildung 11: In dieser Abbildung werden die Luftgüte und thermische Behaglichkeit durch Bewertung von Raumtemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, sowie der CO ₂ Konzentration im Gebäude errechnet. Der erlaubte Bereich ergibt sich aus Standards, wobei die Komfortzone durch zeitabhängige Verhaltensprofile festgesetzt wird.	41
Abbildung 12: ThinkHome-Prototyp Installation in den Laborräumlichkeiten des Arbeitsbereichs, TU Wien.....	43
Abbildung 13: Schematische Black-Box Darstellung des ThinkHome-Prototypen mit definierten Ein- sowie Ausgängen.....	44
Abbildung 14: Darstellung eines Anwesenheitsprofils für einen bestimmten Tag	44
Abbildung 15: Graphische Schnittstelle der Prototypimplementierung mit Ergebnissen für die Anwesenheit (<i>Occupancy</i>).	45

Abbildung 16: Flussdiagramm des internen Ablaufs im erstellten Prototyp	46
Abbildung 17: Testräumlichkeiten zur Evaluierung des profilbasierten ThinkHome-Prototyps	47
Abbildung 18: Vollständiger Evaluierungszeitraum mit Initialisierungsphase, Wochenenden und Tagen mit keinen bzw. falschen Daten.	48
Abbildung 19: pOK und reliability Graphen für den gesamten Testzeitraum und den Datenwert Anwesenheit (<i>Occupancy</i>)	51
Abbildung 20: pOK und reliability Graphen für den gesamten Testzeitraum und den Datenwert Beleuchtungsgruppe 1 (<i>LG1</i>).....	51
Abbildung 21: pOK und reliability Graphen für den gesamten Testzeitraum und den Datenwert Beleuchtungsgruppe 2 (<i>LG2</i>).....	52
Abbildung 22: pOK Werte der Beleuchtungsgruppe 1 (<i>LG1</i>). Der Graph $f(LG1patt)$ stellt die Werte in Bezug auf das vorhergesagte Musters dar, während der Graph $f(LG1patt, occupancy, natural_light)$ auch noch zusätzlich die aktuell erkannte Anwesenheit sowie die natürliche Beleuchtungssituation mit einbezieht.	53

8 Anhang

Tabelle 1: Wetter Status Bezeichner sowie Identifier in der prototypischen Implementierung

Bezeichnung	ID	outdoor_lighting
partly sunny	w_a=1	w_b=1
scattered thunderstorms	w_a=2	w_b=3
showers	w_a=3	w_b=3
scattered showers	w_a=4	w_b=2
rain and snow	w_a=5	w_b=2
overcast	w_a=6	w_b=3
light snow	w_a=7	w_b=2
freezing drizzle	w_a=8	w_b=2
chance of rain	w_a=9	w_b=2
sunny	w_a=10	w_b=1
clear	w_a=11	w_b=1
mostly sunny	w_a=12	w_b=1
partly cloudy	w_a=13	w_b=2
mostly cloudy	w_a=14	w_b=3
chance of storm	w_a=15	w_b=2
rain	w_a=16	w_b=3
chance of snow	w_a=17	w_b=2
cloudy	w_a=18	w_b=3
mist	w_a=19	w_b=2
storm	w_a=20	w_b=3
thunderstorm	w_a=21	w_b=3
chance of storm	w_a=22	w_b=2

sleet	w_a=23	w_b=2
snow	w_a=24	w_b=2
icy	w_a=25	w_b=2
dust	w_a=26	w_b=2
fog	w_a=27	w_b=2
smoke	w_a=28	w_b=2
haze	w_a=29	w_b=2
flurries	w_a=30	w_b=2
light rain	w_a=31	w_b=2
snow showers	w_a=32	w_b=2
hail	w_a=33	w_b=2

Tabelle 2: Detaillierergebnisse der Prototyp Implementierung und Auswertung

Tag	Anwesenheit		LG1		LG2		Anmerkungen
	pOk	Reliability	pOk	Reliability	pOk	Reliability	
16.04.2012	0	0	0	0	0	0	Initialisierungsphase
17.04.2012	0	0	0	0	0	0	Initialisierungsphase
18.04.2012	0	0	0	0	0	0	Initialisierungsphase
19.04.2012	0	0	0	0	0	0	Initialisierungsphase
20.04.2012	95,8	0,97	100	1	93,8	0,95	
21.04.2012	83,3	1	100	1	100	0,96	Wochenende
22.04.2012	100	1	100	1	100	0,97	Wochenende
23.04.2012	100	0,7	97,9	0,71	70,8	0,72	
24.04.2012	85,4	0,95	62,5	0,74	95,8	0,71	
25.04.2012	93,8	0,96	100	0,99	95,8	1	
26.04.2012	97,9	0,96	100	0,7	72,9	0,7	

27.04.2012	95,8	1	100	1	95,8	1	
28.04.2012	–	–	–	–	–	–	Wochenende, keine Daten
29.04.2012	–	–	–	–	–	–	Wochenende, keine Daten
30.04.2012	91,7	0,6	100	0,8	89,6	0,8	
01.05.2012	64,6	0,78	100	0,8	100	0,8	Feiertag
02.05.2012	95,8	0,95	68,8	0,83	75	0,8	
03.05.2012	93,8	0,79	83,3	0,81	91,7	0,78	
04.05.2012	95,8	0,79	58,3	0,81	91,7	0,94	
05.05.2012	100	0,96	100	0,98	100	0,97	Wochenende
06.05.2012	100	0,97	100	0,97	100	0,98	Wochenende
07.05.2012	91,7	0,82	81,3	0,73	87,5	0,82	
08.05.2012	100	0,71	100	0,86	68,8	0,73	
09.05.2012	97,9	0,95	100	0,86	93,8	0,82	
10.05.2012	95,8	0,95	100	0,86	89,6	0,82	
11.05.2012	97,9	0,95	100	0,85	89,6	0,81	
12.05.2012	100	0,97	100	0,99	100	0,98	Wochenende
13.05.2012	100	0,97	100	0,99	100	0,98	Wochenende
14.05.2012	87,5	0,85	93,8	0,87	87,5	0,64	
15.05.2012	93,8	0,75	100	0,89	89,6	0,68	
16.05.2012	93,8	0,86	60,4	0,79	93,8	0,84	
17.05.2012	62,5	0,75	100	0,89	70,8	0,64	Feiertag
18.05.2012	93,8	0,86	100	0,89	91,7	0,84	
19.05.2012	–	–	–	–	–	–	Wochenende, keine Daten
20.05.2012	–	–	–	–	–	–	Wochenende, keine Daten
21.05.2012	95,8	0,7	100	0,74	93,8	0,85	
22.05.2012	87,5	0,9	75	0,8	100	0,7	

23.05.2012	100	0,9	100	0,8	93,8	0,9	
24.05.2012	97,9	0,78	100	0,91	83,3	0,69	
25.05.2012	95,8	0,79	100	0,9	70,8	0,8	
26.05.2012	100	0,98	100	1	100	1	Wochenende
27.05.2012	100	0,98	100	0,99	100	0,98	Wochenende
28.05.2012	62,5	0,73	100	0,78	70,8	0,8	Feiertag
29.05.2012	–	–	–	–	–	–	keine Daten
30.05.2012	87,5	0,94	100	0,85	79,2	0,8	
31.05.2012	62,5	0,66	100	0,92	70,8	0,65	
01.06.2012	66,7	0,81	100	0,91	62,5	0,72	falsche Daten
02.06.2012	0	0,9	100	1	0	0,9	Wochenende, falsche Daten
03.06.2012	0	0,88	100	0,99	0	0,89	Wochenende, falsche Daten
04.06.2012	58,3	0,75	100	0,8	56,3	0,74	falsche Daten
05.06.2012	97,9	0,87	100	0,85	95,8	0,63	

Tabelle 3: Anteilmäßige natürliche Beleuchtung in Anwesenheitszeiten

Natürliche Beleuchtung		
Gute Lichtverhältnisse	Durchschnittliche Lichtverhältnisse	Schlechte Lichtverhältnisse
51,0%	13,9%	35,1%

Tabelle 4: Künstliche Beleuchtung in Anwesenheitszeiten mit Bezug zu natürlichen Verhältnissen

	LG1	LG2
Zeit im Zustand „An“	27,2%	68,1%
„An“ mit guten natürlichen Lichtverhältnissen	10,7%	69,4%
„An“ mit durchschnittlichen natürlichen Lichtverhältnissen	57,1%	46,4%
„An“ mit schlechten natürlichen Lichtverhältnissen	47,9%	78,9%