Konsortialschlussbericht

SENSE: Semantisches, interoperables Smart Home

Ein Projekt zur Bekanntmachung

Strategische Einzelprojekte - Schwerpunkt a) digitale Daten als Wirtschaftsfaktor

Förderkennzeichen: 01MT18007A

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH

Prof. Dr.-Ing. Philipp Slusallek

Trippstadter Straße 122

D-67663 Kaiserslautern

fon: + 49 681 85775 7742

fax: + 49 681 85775 2235

Amtsgericht Kaiserslautern, HRB 2313

SENSE
Semantisches, interoperables Smart Home

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen des Vorhabens ... 3

1.1 Ausgangssituation, Voraussetzungen ... 3

1.2 Aufgabenstellung und gewählte Lösungsansätze ... 6

2 Planung und Ablauf des Vorhabens ... 8

2.1 Projektpartner, Laufzeit und Fördergeber ... 8

2.2 Ablauf des Vorhabens ... 9

3 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangszustand ... 9

4 Erreichte Ergebnisse ... 12

4.1 Evaluation ... 13

4.2 Architektur ... 15

4.2.1 Smart-Home-Ontologie ... 15

4.2.2 SENSE WoT ... 16

4.2.3 Locations ... 17

4.2.4 Editor für die einfache Erstellung von SENSE WoT Beschreibungen ... 18

4.2.5 Datenmodelle, semantisches Uplifting und Lowering, Mapping ... 18

4.3 Registry ... 19

4.4 Digitaler Zwilling ... 20

4.5 Semantische Dienste zur erleichterten Anwendungsentwicklung ... 21

4.5.1 Dienststrukturierung ... 21

4.5.2 Basisdienste ... 22

4.6 Aufbau und Betrieb einer Cloud-Umgebung für Smart-Living-Dienste ... 22

4.7 Multiagentensteuerung für Smart Home ... 22

4.8 Gebäude als Service ... 23

4.9 Anwendungsbeispiele und assoziierte Projekte ... 24

4.9.1 Anwendungsbeispiel Energiemanagement ... 24

4.9.2 Anwendungsbeispiel Komfort und Assistenz ... 24

4.9.3 Anwendungsbeispiel Sicherheit ... 24

4.9.4 Assoziierte und unterbeauftragte Projekte ... 24

4.10 Testwohnungen ... 28

4.11 SENSE-Demonstrator ... 29

4.12 Semantic Building Labor ... 31

5 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit ... 38

5.1 Wissenschaftlicher Nutzen und Verwertung ... 38

5.2 Wirtschaftlicher Nutzen und Verwertung ... 38

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ... 39

7 Fortschritte bei anderen Stellen ... 39

8 Veröffentlichungen ... 41

1 Aufgabenstellung und Voraussetzungen des Vorhabens

1.1 Ausgangssituation, Voraussetzungen

Die Grundlage für die Projektidee „Semantisches, interoperables Smart Home (SENSE)“ war die zum Zeitpunkt der Projektentwicklung (und bis heute zu beobachtende) schnell wachsende System- und Komponentenvielfalt von Geräten sowie die Frage, wie diese Systeme und Komponenten im Kontext eines für die Bewohnerinnen und Nutzerinnen wirklich nützlichen und mehrwertstiftenden Smart Home möglichst reibungslos zusammenspielen sollten. Für einen langfristigen, über viele Jahre zuverlässigen Betrieb ist es zudem essenziell, dass defekte Komponenten und Geräte durch weiterentwickelte Komponenten sowie durch Komponenten anderer Hersteller problemlos ausgetauscht werden können. Die Anforderungen an ein Smart Home ändern sich durch neue Lebenssituationen und/oder Mieterwechsel, so dass es ebenso wie beim Komponentenersatz problemlos möglich sein sollte, neue Komponenten in eine bestehende Installation einzufügen. Keine dieser Anforderungen ist bis heute hinreichend erfüllt. Der Bereich Smart Home / Smart Living ist vielmehr weiterhin von kleinen und mittleren Unternehmen, sehr vielen verschiedenen und meist inkompatiblen, oft historisch gewachsenen Smart-Home-Standards, diversen Datensilos sowie einem marktführenden Standard, KNX, gekennzeichnet. Die Unternehmen stehen in intensivstem Wettbewerb zueinander, da der Markt in zwei große Blöcke aufgeteilt ist. Der professionelle Bereich der Gebäudeautomation wird im Wesentlichen von dem Standard KNX dominiert. Der Consumer-orientierte Teil ist sehr fragmentiert, sehr preissensitiv und von unterschiedlichsten Funklösungen dominiert. Die zu Projektbeginn zu beobachtende und durch neue Geräte immer noch zunehmende Heterogenität in vielen realen Smart-Home-Installationen war und ist bis heute ein nahezu unüberwindliches Hindernis bei der Erstellung von Smart-Home-Anwendungen und -Services, die nicht nur innerhalb einer Systemfamilie lauffähig sind, sondern herstellerübergreifend auf die Geräte zugreifen müssen. Die Vielzahl der zu berücksichtigenden Schnittstellen verhindert eine effiziente Serviceentwicklung, die im Kontext von Digitalisierung und IoT als besonders wertschöpfungssteigend erachtet wird. Dies betrifft sowohl den technischen Aufwand wie auch die Kosten, die für die Erstellung und Wartung der Schnittstellen anfallen. Die Heterogenität bei den Installationen hat verschiedene Ursachen:

Lebenszyklen: Die technischen Ausrüstungen in Gebäuden haben teilweise stark voneinander abweichende Lebenszyklen. Elektronische Geräte und somit auch Smart Home Komponenten unterliegen einem vergleichsweise schnellen Alterungsprozess, der oft nicht einmal 10 Jahre umfasst. Geräte aus der weißen Ware, Heizungs- und Photovoltaiksysteme haben Lebenszyklen zwischen 10 und 20 Jahren. Sicherheitsrelevante Komponenten, wie Rauchmelder sollen mindestens alle 10 Jahre getauscht werden. Die elektrische Gebäudeinstallation hat eine Lebensdauer von mehr als 20 Jahren. Müssen Geräte oder Komponenten ausgetauscht werden, passen die Ersatzkomponenten oft nicht mehr zu den ursprünglichen Anwendungen und Schnittstellen. Dies kann auch dazu führen, dass eine ganze Reihe von Komponenten ausgetauscht werden muss, weil es die grundlegende Systemfamilien nicht mehr am Markt gibt.

Updates: Der Smart-Home-Markt ist gekennzeichnet durch eine sehr heterogene Systemlandschaft bezogen auf die generelle Qualität sowie die Updatezyklen der Komponenten. Vor allem preiswertere Smart Home Komponenten werden meistens gar nicht oder nur eine eng begrenzte Zeit mit Updates versorgt. Danach wird aus Sicherheitsgründen ein kompletter Austausch nötig. Die verschiedenen Lebenszyklen der sehr unterschiedlichen Komponenten führt regelmäßig zu Inkompatibilitäten, die bislang stets Änderungen an den Schnittstellen und den darauf beruhenden Anwendungen erfordern. Es ist dadurch kaum kosteneffizient möglich, flächig systemunabhängige Smart Home Anwendungen zu erstellen.

Langfristige Anpassungen: Ein weiterer Faktor sind langfristig notwendige Anpassungen durch geänderte Lebenssituationen, neue Nutzende und/oder neue Nutzungsmuster. All diese Faktoren

führen in realen Umgebungen langfristig zu einer heterogenen und sehr individuellen Smart Home Installation. Die Komponenten und Geräte stammen dabei meist aus 2 oder mehr Systemwelten und/oder Systemgenerationen – für Serviceanbieter eine nahezu undurchdringliche Situation.

Damalige und noch aktuelle Praxis: Aufgrund der beschriebenen Randbedingungen ist die gelebte Praxis, dass Serviceanbieter entweder nur einzelne Smart-Home-Systemfamilien unterstützen (und somit die Verbreitung ihres Service künstlich einschränken) oder aber selbst zum Hardware-Lieferanten werden. Dies bedeutet, dass eigene, speziell auf die Anwendung angepasste Hardware die Basis für einen Service bildet und an die Kunden mitgeliefert wird. Für die Kunden bedeutet dies, u.a. redundante Komponenten in der Wohnung sowie ggfs. eine Vielzahl von Basisstationen in der Wohnung. Nichts davon ist geeignet, die Akzeptanz im Sinne eines breiten Marktes zu erhöhen.

Alle Versuche, einheitliche Low-Level-Protokolle, wie z.B. die üblichen Funkprotokolle, Zigbee, z-Wave, ENOCEAN und Bluetooth LE sowie neutrale Standards, wie EEBUS und der neu hinzugekommen Standard Matter, zur Verbesserung der Interoperabilität und Entscheidungssicherheit zu etablieren, haben stets nur begrenzten Erfolg gezeigt. Bestenfalls in Einzelbereichen, wie z.B. Philipps HUE im Bereich Beleuchtung und ansatzweise EEBUS im Bereich Energie, weiße Ware, sind Quasistandards etabliert. Wie sich der neue Standard Matter durchsetzt, bleibt bis zum Projektende noch offen.

Die vorherrschenden Prinzipien im Smart-Home-Markt waren und sind immer noch weitestgehend von Silo-Denken geprägt. Die meisten Geräte oder Systemfamilien bringen inzwischen eigene APPs mit, sie sind „App enabled Devices“. Zu Projektbeginn waren zudem offene API-Zugänge zu Systemen unüblich oder nur in Verbindung mit kommerziellen Partnerschaften möglich. Offene APIs inkl. umfassender Beschreibungen gab es von einigen Unternehmen, die als Referenz genutzt werden konnten, z.B. Philips HUE, Netatmo oder Hom.ee. Projektpartner IoT CONNCTD als Anbieter einer offenen IoT Plattform stand mit dem eigenen Verständnis einer interoperablen IoT-Welt für Smart Home und Building zwischen den Herstellern, die ihre Produktverkäufe in Gefahr sahen und den Anbietern von Systemen, die ihre Plattform-Modelle durchsetzen wollten. Parallel wurde jedoch mit gestarteten Voice-Control Angeboten – den smarten Lautsprechern. Diese Systeme beherrschen mehrere Funkprotokolle, Wifi, Zigbee und bieten sogenannte Skills für ausgewählte Geräte und funktionieren als Protokollübersetzer. Amazon Echo/Alexa als erster Vertreter dieser neuen Systeme machte deutlich, welche Möglichkeiten entstehen können, wenn Smart Home Systeme und Geräte mehr oder weniger frei miteinander interagieren.

Unter diesen Bedingungen und basierend auf einem Low-Level-Protokoll ein Datenökosystem aufzubauen, welches langfristig Interoperabilität sichert und systemübergreifende Anwendungen zu realisieren, ist nahezu unmöglich bzw. wirtschaftlich nicht darstellbar. Das Projekt SENSE hat daher für die beschriebene Situation Lösungsansätze auf der Ebene der semantischen Interoperabilität entwickelt und in verschiedenen Use Cases und Konstellationen erprobt. Grundlage sind standardisierte Web-Technologien, die zu Projektstart bereits eine gute Verbreitung aufwiesen. Das Konsortium hatte den working draft des WoT-Models (Web of Things) des W3C als Referenzmodell für Datenabstraktion ausgewählt. Während der Projektlaufzeit wurden aus dem working draft die erste offizielle Version des WoT-Standards vom W3C veröffentlicht. Das SENSE-Projekt hat diesen Standard gezielt genutzt und als SENSE-WoT weiterentwickelt, um die zusätzlichen Anforderungen, z.B. aus notwendigen Kontextinformationen (Locations) umfassender abzubilden.

Die Fokussierung von SENSE auf diese abstrakte Ebene der Interoperabilität ermöglicht es den deutschen Herstellern unterhalb der semantischen Interoperabilitätsebene, sich im Wettbewerb hinreichend von ausländischen Mitbewerbern zu unterscheiden und die auch Interoperabilität auf tieferen Ebenen, z.B. auf Protokollebene, zulassen und mitberücksichtigen. Unterstützend kam hinzu, dass heute praktisch alle Smart-Home-Geräte und Systemfamilien mit mehr oder weniger offenen und dokumentierten Web-Schnittstellen ausgestattet sind, die entweder direkte Zugriffe auf Geräteebene oder aber Zugriffe über eine Cloud auf der Ebene der digitalen Zwillinge dieser Geräte erlauben. Somit ist im Projektverlauf bereits eine gewisse Vereinheitlichung entstanden, auf die sich SENSE abstützen

konnte. SENSE richtet sich in seiner Grundstruktur an den B2B-Bereich. Im Sinne von Gebäude als semantischer Service sollen Service Entwickler in die Lage versetzt werden, interoperable Smart Home Anwendungen/Service möglichst einfach und ohne die bisher übliche Integration einer Vielzahl von hersteller- bzw. systemspezifischen Schnittstellen und Besonderheiten zu entwickeln. Das generelle und im Projektverlauf auch erreichte Ziel von SENSE war die Vereinfachung der Anwendungsentwicklung.

Der Arbeitskreis „Semantische Interoperabilität“ im ZVEI hat maßgeblich dazu beigetragen, das Thema Semantik und semantische Interoperabilität bei den Unternehmen bekannt zu machen und hat somit die Grundlagen der Projektidee für SENSE zu entwickeln. Die Akzeptanz von Semantik als Basis für Interoperabilität war jedoch bei Projektbeginn nicht etabliert und der Weg dahin sowohl technisch als auch geschäftspolitisch offen. Das Projekt war demzufolge zu Beginn und über weite Strecken von der Skepsis der Anbieter geprägt und von den geringen Kapazitäten der Unternehmen, sich technisch einzubringen. Im Projektverlauf ist dann das Thema künstliche Intelligenz (KI) im Kontext von Smart Home, Smart Living immer stärker in den Fokus geraten. Vor allem für Verfahren aus der neuronalen KI, maschinellem Lernen sind sehr viele, qualitativ hochwertige Daten erforderlich. In sinnvollen Anwendungsszenarien werden i.d.R. immer mehrere Smart Home Komponenten (meist auch aus unterschiedlichen Systemwelten) mit Geräten aus der weißen Ware, dem Küchenbereich und/oder dem Bereich Heizung und Klimatisierung in einer KI-Anwendung zusammengeführt. Es ist dabei keine Lösung, für alle verschiedenen Systemwelten jeweils eigene Schnittstellen zu entwickeln, um an die Daten zu kommen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit für einen Standard, der eine einheitliche Datenbeschreibung und -interpretation ermöglicht. Ein weiteres wichtiges Thema ist die Datenqualität und deren Beschreibung mit/in dem entsprechenden Datenpunkt sowie die sinnvolle Verwaltung von Datenbeständen im Hinblick auf eine spätere KI-Nutzung. Mit dem Fortschritt von SENSE und mit neuen Anforderungen an die Technologien (aus dem Bereich KI sowie auch aus Gaia-X heraus) wurden die technischen Prinzipien der Semantik von größerer Bedeutung. Die technologische Betrachtung der Mehrheit der Unternehmen in diesen Themen hat sich im Projektverlauf dementsprechend deutlich verändert. Gerade KI wird als „Game Changer“ verstanden, der genug Anziehungskraft hat, um an die eigene Öffnung von APIs und ggfs. Datenbeständen zu denken.

SENSE entstand insbesondere auch vor dem Hintergrund, dass das Internet der Dinge als zentrales Thema der Digitalisierung des Gebäudes zum Zeitpunkt der Projektentwicklung ein für die deutsche Industrie hoch relevantes Spannungsfeld aufzeigte: Auf der einen Seite – abstrakt betrachtet – das „Internet“, charakterisiert vor allem durch Informationstechnologie, große nicht-europäische Tech- und IT-Konzerne sowie die Regionen USA und zunehmend China, und auf der anderen Seite die „Dinge“, im Gebäude insbesondere geprägt durch Elektrotechnik oder, allgemeiner formuliert, den deutschen industriellen Mittelstand. Das Internet verbindet heute Branchen, Dienstleister, Kunden, Datenwelten usw. Die deutsche Industrie wird im internationalen Wettbewerb in einer digitalisierten Wirtschaft zukünftig nur bestehen können, wenn Unternehmen aller Größenklassen bereit und in der Lage sind, technischen und organisatorischen Herausforderungen von branchenübergreifender Bedeutung auf vorwettbewerblicher Basis gemeinsam zu begegnen.

Zum Projektende lässt sich aus Sicht des Konsortiums indes feststellen, dass viele Unternehmen in der Domäne Smart Home / Smart Building – trotz der Projekterfolge von SENSE oder jüngst im Rahmen des Smart Living KI-Plattformprojekts ForeSight – ihre Prioritäten und Kapazitäten weiterhin noch ganz überwiegend bei ihren bisherigen, mitunter tradiert erscheinenden Geschäftsmodellen sehen. Das Beharrungsvermögen ist hier noch relativ ausgeprägt, was auf mehrere Faktoren zurückgeführt werden kann:

- Die Geschäftsmodelle der deutschen Unternehmen sind immer noch in erster Linie Hardware-zentriert. Hier haben viele Unternehmen immer noch ihre Kernkompetenz, was die Auseinandersetzung mit der Service-Entwicklung nicht zuletzt aus kurz- bis mittelfristigen

betriebswirtschaftlichen Erwägungen bremst. Dementsprechend tun sich zahlreiche Unternehmen mit der Service-Entwicklung noch sehr schwer.
- Für die eigene Entwicklung von wertschöpfungssteigernden Services fehlen in den Unternehmen nicht selten Personalressourcen bzw. die erforderlichen Fachkräfte mit technischen Kompetenzen hinsichtlich offener Cloud- und KI-Technologien sowie flexibler, datenbasierter Serviceentwicklung.
- Das Silo-Denken in der Domäne ist und bleibt auch vorerst ausgeprägt.

Das Projekt SENSE hat mit seinen technischen Entwicklungen sowie seinen Beiträgen für die Bildung bzw. den Ausbau einer deutschen Smart-Living-Community einen ersten wesentlichen Schritt zum Aufbrechen von Daten-Silos geleistet und die Hürden für mehr Interoperabilität bereits massiv gesenkt. Es wird allerdings weitere Überzeugungsarbeit erfordern – etwa über eine fortgesetzte intensive Community-Arbeit, weitere anwendungsorientierte Forschungsprojekte und praxisnahe exemplarische Use Cases –, um tatsächlich einen nachhaltigen und wirkungsvollen Wandel hin zu zukunftsgerichteten digitalen Geschäftsmodellen zu erreichen. Ziel muss es dabei sein, die deutsche Kernkompetenz Hardware und neue wertschöpfungssteigende Services miteinander zu verbinden, um das Internet der Dinge und Dienste zukünftig gemeinsam und erfolgreich mitzugestalten.

1.2 Aufgabenstellung und gewählte Lösungsansätze

Es war das Ziel von SENSE, den in Abschnitt 1.1 beschriebenen Zustand zu verbessern und die nötigen Grundlagen für eine funktionierende Datenökonomie zu legen. Im Zusammenspiel mit den Projekten SUITE, ForeSight sowie Gaia-X konnte eindrucksvoll gezeigt werden, wie mit semantischer Interoperabilität Herstellerunabhängigkeit realisiert werden kann, ohne die Hersteller unterhalb der Interoperabilitätsebene in ihren Bemühungen um optimierte Marktpositionen zu behindern, wie Semantik zum Aufbau eines Datenökosystems Smart Living beitragen kann und welche neuen Möglichkeiten die Semantik im Hinblick auf intelligente, KI-gestützte Smart Living Systeme und Anwendungen eröffnet. Folgende Aufgabenstellungen waren Grundlage des Projektes:

- Konzepte, Implementierungen, Werkzeuge und Beispiele für herstellerneutrale, semantische Interoperabilität für Smart Home Geräte, Systeme und Anwendungen,
- Aufbau einer vorwettbewerblichen, neutralen Labor- und Erprobungsumgebung,
- Initiierung und Durchführung assoziierter Projekte mit Unternehmen aus der Smart Living Community.

Die Auswahl der Konzepte und Standards für SENSE folgte dabei den Erfahrungswerten aus dem Arbeitskreis „Semantische Interoperabilität“ am ZVEI. Die dortigen Diskussionen mit Herstellern und Serviceanbietern hat deutlich gemacht, dass es sehr schwierig sein würde, ein von allen Herstellern gleichermaßen unterstütztes Low-level-Protokoll zu erarbeiten und zu etablieren. Ähnliches gilt auch auf der Ebene der Cloud-Schnittstellen und Programmierinterfaces für eine gemeinsam genutzte Ontologie. Aufgrund des stark umkämpften, immer noch vergleichsweisen kleinen Marktes für Smart-Home-Lösungen (der sich im Projektverlauf jedoch spürbar erweitert hat) und dem damit verbundenen, intensiven Wettbewerb zwischen den Herstellern und Anbietern erscheinen nur solche Ebenen der Interoperabilität umsetzbar,

- die es den Anbietern erlauben, unterhalb des Interoperabilitätslayers ihre eigenen Standards und Alleinstellungsmerkmale weiterzuentwickeln
- und die es sehr einfach machen, die Geräte und Systeme in einen Interoperabilitätslayer einzubringen.

Der für SENSE gewählte Lösungsansatz ist die **Semantische Interoperabilität** zwischen Smart-Home-Geräten und Systemwelten. Im Sinn der Leitidee „Gebäude als Service“ wurden in SENSE die aus dem W3C-Umfeld stammenden Konzepte und Standards zur semantischen Interoperabilität auf den Anwendungsfall Smart Home angepasst und in mehreren Unterprojekten erprobt und

weiterentwickelt. Im Projektverlauf wurden die notwendigen semantischen Modelle sowie die zur effizienten Anwendungsentwicklung erforderlichen Basiskomponenten und Werkzeuge erforscht und entwickelt. Die Basis der entwickelten semantischen Beschreibungen ist der W3C-Standard „Web of Things (WoT)“ sowie als RDF-Basisontologie „iotschema.org“. Beide Standards wurden weitestgehend unverändert übernommen und lediglich mit den Smart Home Spezifika erweitert. Somit ist der im Projektverlauf entstandene Standard „SENSE WoT“ kompatibel mit WoT und auf RDF beruhenden Ontologien. Semantische Interoperabilität ermöglicht digitale und hybride Mehrwertangebote rund um das vernetzte Gebäude und die Integration von Gebäuden in übergeordnete, digitale Strukturen, wie Smart Cities, smarte Energienetze, etc.

Aspekte der **IT-Security**, der **System-Performance** zur Laufzeit und geeignet skalierbare Berechtigungen mögliche Zugriffs-Restriktionen auf die Gebäude- und Nutzerdaten. Anpassbare Ebenen der Datenaggregation und Granularität sollen neue effiziente Dienste ermöglichen und eine fortschreitende Entwicklung hin zu autonomen Systemen erlauben und dabei hochentwickelten modernen technischen Regelungs- und Automatisierungssystemen im Sinne der Digitalisierung eine Integration in gemeinsame übergreifende Ökosysteme ermöglichen. Eine hohe Herausforderung ist dabei stets, die zu fordernde Dienstqualität auch für komplexe Aufgaben, die unterschiedliche Informationen auf völlig neue Art korrelieren und verknüpfen, zu gewährleisten. Gerade hierzu ist es unerlässlich, gewerke- und unternehmensübergreifend im vorwettbewerblichen Bereich in einer geschützten Laborumgebung neue Konzepte zu erproben. Beispielhaft für den smarten Energiebereich sei hier die elektrisch geführte bedarfsgerechte intelligente Kopplung von Kraft-Wärme-Maschinen mit unterschiedlichen konventionellen und regenerativen Quellen, Senken sowie thermischen und elektrischen Speichern genannt. Derartige Fragen sind mit traditionellen technischen Methoden allein nur schwerlich zu lösen und dürften erhebliche Komplexitätsprobleme auch im Hinblick auf die notwendige, stets rechtzeitige Datenverfügbarkeit im Netz aufwerfen. Der Digitalisierungsprozess sowie die geeignete Vernetzung und dynamische Parametrierung von zunehmend intelligenten autonomen und stabilen Systemen, kann hier geeignete Wege ermöglichen. Es bestehen so außerordentliche Chancen für die im Smart Home/Smart Building- Bereich tätigen Unternehmen durch die Bündelung ihrer Kompetenzen erhebliche Synergieeffekte zu erreichen und ihr Kernangebot in eine Dienstumgebung zu integrieren.

Das **Semantic Building Labor (SENSE Lab)** war und ist gedacht als zentrale Anlaufstelle für Partner innerhalb der wachsenden deutschen **Smart Living Community**, die in der vorwettbewerblichen Zusammenarbeit die Chance zur Bewältigung übergeordneter, häufig gleichgelagerter technischer und organisatorischer Herausforderungen sieht. Die bis zur Gründung des SENSE Lab existierenden Labore waren entweder herstellergebunden, dienten mehr oder weniger exklusiv der Forschung oder waren Showrooms der Wohnungswirtschaft. Ein neutraler und herstellerunabhängiger Ort, welcher neueste Smart-Living-Technologien in exemplarischen Anwendungsszenarien zeigt und sich als hochwertige Workshop- bzw. Meeting-Umgebung eignet, fehlte bislang. Die Örtlichkeit des SENSE Labs wurde zum Projektbeginn gesucht, um dieser Situation Rechnung zu tragen und um möglichst vielen Unternehmen eine einfache praktische Teilnahme anzubieten, um zusammen Erfahrungen zu sammeln und um assoziierte Projekte nahe an den Anforderungen der Unternehmen durchzuführen. Das SENSE Lab in Berlin wurde aufgesetzt, um der Smart Living Community einen neutralen Ort zu bieten, sich fachlich auszutauschen und inspirieren zu lassen bzw. weitere Unternehmen und Personen mit Interesse an den Themenstellungen einzubeziehen. Dies ist mit Meetups und Demo-Workshops erfolgt. Im SENSE Lab wurden gemeinsam mit Unternehmen und Dienstanbietern die Konzepte der semantischen Technologien sowie geeigneter verteilter Systemarchitekturen erprobt und weiterentwickelt. Hierzu gehören zunächst neben entsprechenden Ontologien und Referenzimplementierungen auch Basisdienste, intelligente Zustandsverwaltung und Datenaggregation. Im Zusammenwirken von neuen Diensten und verteilter Hardware aus unterschiedlichen Bereichen wird ein besseres Verständnis der gemeinsamen Digitalisierungsprozesse und der beteiligten Teilsysteme, aber auch neuer Strukturen und Verknüpfungen möglich. Diese vorwettbewerblichen Strukturen und Komponenten ermöglichen den Unternehmen und Dienstanbietern, Konzepte zu erproben, das notwendige Know-how

aufzubauen sowie die effiziente Entwicklung eigener Dienste. Zusätzlich wurden in SENSE erste Ansätze aus dem Bereich künstliche Intelligenz exemplarisch realisiert und in der geschützten Laborumgebung eingesetzt, um das Potential dieser Technologien in dem Smart-Home-Kontext einschätzen und überprüfen zu können.

Alle Veranstaltungen und Workshops im SENSE Lab waren sehr erfolgreich und gut besucht. Das Projekt SENSE mit dem Labor war der Nukleus der in den Nachfolgeprojekten ForeSight und Gaia-X weiterwachsenden Smart Living Community. Bis zur Corona-Pandemie hat das Labor die Aufgaben sehr gut ausgefüllt. Mit Beginn der Pandemie musste der Arbeitsmodus angepasst werden und das SENSE Lab wurde für die Remote-Nutzung angepasst, so dass alle vorgesehen Arbeiten vor Ort ab Mitte des Projekts auch virtuell durchgeführt werden konnten (weitere Ausführungen zum Lab finden sich in Abschnitt 4.12).

Eine wesentliche Aufgabenstellung für das SENSE Lab war die Initiierung und Durchführung **assoziierter Projekte**. Unternehmen aus der Smart Living Community waren eingeladen, ihre eigenen Projektideen rund um das Thema semantische Interoperabilität einzubringen. Es sollte untersucht werden, welche Formate der Zusammenarbeit mit und ohne das SENSE Lab und welche Themen gut funktionieren und wie die Erwartungen und Anforderungen der interessierten Unternehmen sind. Diese für die Smart Living Community neuartige Format wurde gut angenommen und es konnten einige erfolgreiche Projekte mit ganz unterschiedlichen, von den Unternehmen eingebrachten Themen umgesetzt werden.

2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war in 6 aufeinander aufbauende Arbeitspakete (AP) gegliedert. Alle APs sind weitestgehend wie geplant durchgeführt wurden. Es gab lediglich kleine Verschiebungen bei den Enddaten einzelner APs sowie einige Mittelumwidmungen z.B. zur Beschaffung von zusätzlicher Hardware. Aus Sicht der Konsortialleitung haben allen Partner nach anfänglichen Personalschwierigkeiten ihre jeweiligen APs zielgerichtet und sehr erfolgreich abarbeiten können. Auch wurden alle zwischenzeitlichen Rückstände im Projektverlauf ausgeglichen. Vor allem im Kontext der assoziierten Projekte haben alle Partner zusätzliche Aufwände geleistet, die nicht in den Arbeitsplänen enthalten waren. Da es vergleichsweise zahlreiche Einzelprojekte waren, ergeben sich hieraus nennenswerte Übererfüllungen der geleisteten Aufwände.

Die größten Verschiebungen gab es durch die Corona-Pandemie. Die Arbeiten rund um das SENSE Lab und hier vor allem die Präsenzveranstaltungen, Workshops sowie einzelne Arbeiten an assoziierten Projekten waren stark betroffen. Durch die im Projektverlauf durchgeführte Virtualisierung konnten alle technischen Arbeiten erfolgreich in und mit dem Labor realisiert werden. Aus Sicht der Konsortialleitung hat die Pandemie jedoch das sehr positiv gestartete Labor massiv behindert. Den technischen Projektergebnissen hat dies nicht geschadet, jedoch der Community-Arbeit und der Etablierung des Labors als Leuchtturm für Smart Living. Eine Reaktion darauf ist die Fortsetzung der Laborarbeit im Projekt ForeSight mindestens bis zu dessen Laufzeitende am 31.12.2022.

2.1 Projektpartner, Laufzeit und Fördergeber

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) GmbH

IoT CONNCTD GmbH

Fachhochschule Dortmund, Institut für Kommunikationstechnik (IKT-Do)

Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V. (FE)

Laufzeit: 38 Monate, 01.11.2018 bis 31.12.2021

Fördergeber: BMWK

FZK: 01MT18007A, 01MT18007B, 01MT18007C, 01MT18007D

Das Vorhaben wurde technisch wie geplant durchgeführt, jedoch aufgrund der unvermeidbaren Verzögerungen durch die Corona Pandemie um 3 Monate bis 31.12.2021 kostenneutral verlängert.

2.2 Ablauf des Vorhabens

Die Zeitplanung des Projekts hat berücksichtigt, dass technische und praktische Arbeiten erst mit Betrieb des SENSE Labs möglich würden, so dass die Arbeitspakete zu Anforderungen und Architektur vorangestellt wurden. Die Arbeiten im SENSE Lab wurden im Laufe des ersten Projektjahres aufgenommen. Erste assoziierte Projekte wurden im ersten Projektjahr bereits gestartet.

Das Projekt war wie folgt strukturiert:

AP 1 Anforderungen, Konzepte, Workshops

AP 2 Architekturen, Komponenten und Werkzeuge

AP 3 Referenzimplementierungen und Smart Home Basisdienste

AP 4 Semantic Building Labor

AP 5 Entwicklung und Implementierung der Anwendungsszenarien

AP 6 Projektmanagement

In den einzelnen AP wurden vielschichtige Unter-Aufgaben abgebildet, um prinzipiell auf Basis von Anforderungen Plattform-Architekturen, Datenmodelle und APIs zu formulieren, diese technisch zu entwickeln und zu implementieren, bevor in der praktischen Übung mit Partnern genutzt, getestet und in konkreten Use Cases als Referenzinstallationen umgesetzt wurden.

3 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangszustand

Semantische Interoperabilität: Die Akzeptanz von semantischen Webservices hängt stark mit dem Aufwand zusammen, der notwendig ist, um sie zu implementieren. Deshalb ist das automatische Mapping von Ontologien seit längerem ein Forschungsthema im Bereich des semantischen Web. Um Ontologien aufeinander abzubilden, werden üblicherweise Metriken zur Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Ontologien auf Basis der beschriebenen Entitäten, Regeln oder Abhängigkeiten definiert, auf deren Basis automatisch erstellte Abbildungen optimiert werden.

Die in SENSE durchgeführten Anwendungsszenarien stellen hier eine besondere Herausforderung dar, da vielfältige heterogene Dienste miteinander vernetzt werden sollen. Solche Netzwerke sind offen, in dem Sinne, dass Services hinzugeschaltet werden können sollen, deren Schnittstellen a priori nicht klar definiert sind. Im Projekt SENSE wurden die Ansätze im Kontext von Smart Home Ontologien evaluiert.

Smart-Home-Standards: Die o.a., grundsätzlichen Forderungen sind bis heute nur teilweise erfüllt. In aller Regel legt man sich vor dem Aufbau eines Smart Home auf eine Systemfamilie bzw. einen Standard fest und versucht mit den dort angebotenen Komponenten die notwendigen Smart Home Funktionen zu realisieren.

Im Umfeld von Smart Home und Smart Building existieren bereits etablierte Standards (Tabelle 1), wie z.B. KNX[1], Zigbee[2], Thread[3], etc., die entsprechende Automationskomponenten verbinden. Alle Standards sind untereinander nicht kompatibel. Üblich sind jedoch Gateways, die von einem in das andere Protokoll übersetzen und so mindestens eine Interoperabilität zwischen zwei Protokollen herstellen. Eine weitere, vor allem im Consumerbereich etablierte Lösung sind Multiprotokollboxen, wie z.B. hom.ee sowie die Echo-Geräte von Amazon. Diese verstehen mehrere Funkprotokolle und ermöglichen so übergreifende Wenn-Dann-Szenarien. Meist bieten die Boxen auch eine Editorumgebung an, die das Anlegen mehr oder weniger komplexer Entscheidungs- und Abhängigkeitsabläufe ermöglichen. Die Boxen bieten auch eine Cloud-Schnittstelle, die mit den üblichen Web-Interfaces angesprochen werden kann und die sich sehr gut in die SENSE Entwicklungen einfügen.

Auch gab und gibt es Versuche, Standards auf Protokollebene zu etablieren, wie z.B. EEBUS[4], Zigbee[5] und ganz neu Matter[6]. Diese haben bis heute nur sehr begrenzten Erfolg gehabt.

Systemfamilie/Protokoll	Kabel/Funk
KNX	Kabel und Funk
Zigbee	Funk
LoRaWan	Funk
EEBUS/SPINE	Generisch
ENOCEAN	Funk
z-Wave	Funk
AVM Dect	Funk
Bosch Smart Home	Funk
innogy Smart Home	Funk
Homematic	Funk
Philips HUE	Funk
Magenta Smart Home	Funk
Apple Homekit	Funk
Wifi	Funk
Bluetooth LE	Funk
Matter	Generisch

Tabelle 1 Auswahl an verbreiteten Smart Home, Smart Building Standards/Protokollen

Eine gewisse Standardisierung ergibt sich auf der Ebene von Cloud-Angeboten. Praktisch alle Hersteller, bilden inzwischen ihre Geräte und Systemfamilien in digitalen Cloud-Angeboten und zugehörigen Smartphone-Apps ab. Dieser Trend setzt sich bis heute fort. Kaum ein neues Produkt aus dem Smart Home, Smart Building oder dem generellen Smart Devices Umfeld kommt noch ohne ein entsprechendes Cloud-Interface aus. Inkompatibilitäten sind dennoch verbreitet, denn praktisch jeder Hersteller hat ein eigenes, meist JSON-basiertes, Programmierinterface. Hinzu kommt, dass nicht alle Funktionen über die Cloud-Schnittstelle verfügbar gemacht werden.

Matter[7]: Matter ist ein völlig neuer Standard, der sich während der Projektlaufzeit von SENSE gegründet hat. Er wird u.a. von Amazon, Google, Apple und Huawei unterstützt und vorangetrieben,

[1] https://knx.org/
[2] http://www.zigbee.org/
[3] https://threadgroup.org/
[4] https://www.eebus.org
[5] https://zigbeealliance.org
[6] https://matter-smarthome.de
[7] https://matter-smarthome.de und https://csa-iot.org/all-solutions/matter/ und https://www.homeandsmart.de/matter-smart-home

so dass alleine aufgrund der Marktmacht von einer erheblichen Verbreitung ausgegangen werden kann, wenn sich der Standard sinnvoll etabliert hat. Wesentlicher Treiber sind dabei die smarten Lautsprecher, die diese Anbieter zunehmend als Zentralen für smarte Geräte in einem Haushalt etablieren (wollen). Die Aktivitäten sind im Gegensatz zu KNX IoT auf den Consumer-Bereich ausgerichtet. Traditionell legen diese Anbieter Wert auf eine einfache Installation durch die Endkunden, wohingegen KNX auf die klassische Installation durch Elektrofachpersonal ausgerichtet ist. Matter ist ein Low-level-Standard, welcher aus den Standards Thread und Zigbee heraus entwickelt wurde bzw. von dort Ansätze übernimmt. Matter ist ein reines Funkprotokoll und erfordert stets eine 2,4 GHz IP-Verbindung. Es kann voraussichtlich für Smart-Home-Zentralen, wie die Echo Lautsprecher, Google Home und Apple Homepod und weitere Geräte prinzipiell per Firmware-Update nachgerüstet werden. Auch Bluetooth LE, welches dem Apple-Homekit-System zugrunde liegt soll perspektivisch angebunden werden können. Allerdings bestehen Unsicherheiten, ob Geräte, die ohne eine Basisstation auskommen, Firmware-Updates erhalten, um mit Matter kompatibel zu werden. Geräte aus Funkstandards, wie z-Wave, ENOCEAN und auch Zigbee werden Prinzip bedingt ohne Basisstation nicht mit Matter kompatibel werden. Völlig offen ist auch, ob sich KNX für Matter öffnet und wieviel Sinn dies machen kann, denn wie unten beschrieben, unterscheiden sich die grundlegenden Modellierungen eines Smart Home erheblich voneinander.

KNX IoT[8]: KNX ist der führende Standard vor allem im Bereich der bewirtschafteten Wohn- und Zweckgebäude. KNX IoT ist die semantische Repräsentation des klassischen KNX-Protokolls. Es verwendet dieselben W3C-Standards wie SENSE. Neben der semantischen Beschreibung der existierenden KNX-Geräte und Funktionen als Abbild der bekannten KNX-Installationen mit der ETS in der Mitte, ist auch die Integration auf Web-Service-Ebene mithilfe einer REST-API vorgesehen. Diese ermöglicht die Integration von Cloud-Services, d.h. digitalen Gerätezwillingen in der Cloud, sowie Geräten, die eine Web-Schnittstelle anbieten. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass das KNX-System das führende System ist. Eine weitere Besonderheit ist die engere Integration von KNX IoT mit Building Information Modelling (BIM).

Ein großer Nachteil von KNX IoT ist jedoch die sehr eigene, am klassischen KNX-Datenmodell bzw. an der ETS orientierte Art, wie Zusammenhänge und Funktionalitäten beschrieben werden. Die KNX-Ansätze unterscheiden sich erheblich vom klassischen Device-Modell, auf dem SENSE WoT und praktisch alle anderen Datenmodelle beruhen. Somit wird ein Mapping zwischen KNX IoT und anderen IoT Ontologien, wie das in SENSE verwendete iotschema.org erschwert und in manchen Aspekten auch unmöglich sein. Bei der Definition von KNX IoT stand somit die Kompatibilität zu KNX Classic im Vordergrund und nicht die Nutzbarkeit von KNX außerhalb einer KNX Installation, z.B. für ein heterogenes Datenökosystem.

SAREF[9]**, SAREF4Ener**: Ursprünglich aus einem EU-Projekt entstanden und bis heute maßgeblich von der niederländischen Forschungseinrichtung TNO fortgeführt, entwickelt sich aus der standardisierten SAREF Basisontologie eine ganze Reihe domänenspezifischer Ontologien, die sich alle von SAREF ableiten. SAREF verfolgt das Device-Modell und ist somit sehr einfach in SENSE zu verwenden. Eine für SENSE relevante Ableitung ist SAREF4Ener für den Energiebereich. SAREF4Ener repräsentiert das von EEBIUS standardisierte SPINE Datenmodell. Dieses bildet die Basis für die Arbeiten im EU-Projekt Interconnect[10]. Im Rahmen von SENSE wurden erste Integrationen von SAREF4Ener in SENSE WoT im assoziierten Projekt mit der KEO GmbH erprobt. Die Erfahrungswerte aus SENSE sind vom DFKI sowie der FH Dortmund in Interconnect eingebracht worden. Ein Mapping zwischen dem Datenmodell aus Interconnect und SENSE WoT existiert.

Maschinelles Lernen und Multiagentensysteme: Agenten sind als eine autonome Softwareeinheit definiert, die über virtuelle oder reale Sensoren und Aktoren verfügt, die ihre Umgebung wahrnimmt

[8] https://www.knx.org/knx-de/fuer-fachleute/knx-vorteile/knx-internet-der-dinge/
[9] https://saref.etsi.org
[10] https://interconnectproject.eu

und mit ihr interagiert, um definierte Ziele zu erreichen. Kommen mehr als zwei miteinander kommunizierende Agenten zum Einsatz, wird von einem Multiagentensystem (MAS) gesprochen. Das Multiagentensystem-Paradigma hat bewiesen, dass es für die Realisierung fortgeschrittener verteilter Anwendungen in Umgebungen mit hoher Diversität, wie sie typischerweise in Internet of Things (IoT) -Domänen aufzufinden sind, eingesetzt werden kann. Mit dem MAS-Paradigma kann eine höherwertige „intelligente“ Funktionalität auf Anwendungsebene implementiert werden, wodurch gleichzeitig der Bereitstellungskontext heterogener Systemlandschaften vor dem Anwender verborgen wird. Durch die enorme Menge an Sensorinformationen die IoT-Umgebungen erzeugen, können im Kontext von Smart Homes Verhaltensprofile von Bewohnern durch Multiagentensysteme in Verbindung mit Machine Learning Ansätzen erlernt und klassifiziert werden. Durch diese Verhaltensmuster kann dann das MAS-gesteuerte intelligente Heim proaktiv auf dessen Bewohner reagieren. In den Projekten SENSE, SUITE und ForeSight konnte das Potential dieses hybriden Ansatzes für Smart Living eindrucksvoll gezeigt werden.

Grundsätzlich bezeichnet Deep Learning das maschinelle Lernen mittels tiefer künstlicher Neuronaler Netze (KNNs), die nichtlineare Funktionen abbilden und approximieren können. KNNs erleben seit einiger Zeit nicht nur in der Computer-Vision eine Renaissance, sondern auch in der Sprachverarbeitung, Astronomie, Bioinformatik, dem autonomen Fahren und Finanzdienstleistungen. Auch im Smart-Home Bereich haben KNNs eine lange Tradition. Der Ursprung von Deep Learning liegt im Bereich Bildanalyse und Spracherkennung. Die Besonderheit im Bereich Smart Living und zugleich die Anpassungsaufgabe ist die fast ausschließliche Fokussierung auf das maschinelle Lernen auf/mit langen Zeitseriendaten, denn praktisch alle Smart-Home-Sensoren und -Geräte liefern Zeitserien.

Im Bereich der Multiagentensysteme hat das DFKI das AJAN MAS-Framework entwickelt und in SENSE eingebracht. AJAN ist ein im Zuge der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekte ARVIDA und INVERSIV entstandenes Multiagentensystem. Ein Schwerpunkt von AJAN ist die Orchestrierung von Linked-Data-Diensten.

AJAN legt einen Entwicklungsschwerpunkt auf die intuitive Verhaltensmodellierung, die in einem ersten Schritt mit der Verwendung des Behaviour Tree (BT)-Paradigmas umgesetzt wurde. Zur Modellierung von BTs stellt AJAN einen Webeditor zur grafischen Programmierung bereit. AJAN verwendet für die Formalisierung des Agentenmodells das RDF (Resource-Description-Framework) aus den semantischen Web-Technologien. Das sogenannte Weltwissen ist somit semantisch beschrieben und beschreibt die aktuelle Situation in einer Gebäudeautomation. AJAN entscheidet demnach entlang dieses gesammelten Weltwissens.

Gaia-X: Gaia-X[11] strebt Interoperabilität auf Cloud-Ebene an und passt mit den bisher bekannten Konzepten sehr gut und nahtlos mit den SENSE-Entwicklungen zusammen. SENSE WoT kann in diesem Kontext die domänenspezifischen semantischen Beschreibungen und föderierten Kataloge abbilden, die mit der Cloud-Ebene und die dortigen Federated Catalogues verbunden werden.

4 Erreichte Ergebnisse

Alle definierten Arbeitspakete und Projektziele wurden sowohl inhaltlich als auch zeitlich erreicht oder sogar übererfüllt. Vor allem bei der Auswahl und Konzeptentwicklung der semantischen Beschreibungen wurde von der ursprünglichen Planung abgewichen und das nun erfolgreich umgesetzte und gerade im Smart Home Kontext sehr flexible Web of Things (WoT) Konzept zur semantischen Beschreibung eingesetzt. Erst mit der Einführung von WoT konnte die gewünschte Unabhängigkeit erreicht werden. Die Hersteller und Systemanbieter können unterhalb der semantischen Ebene eigene Semantiken (wie KNX IoT, SAREF4Ener) und eigene Protokolle auf unterschiedlichen Ebenen (wie EEBUS, Matter, z-Wave, Zigbee etc.) einsetzen und eigene Alleinstellungsmerkmale umsetzen. Dies gilt so lange, wie sinnvolle Web-Schnittstellen bereitgestellt

[11] https://www.data-infrastructure.eu/GAIAX/Navigation/EN/Home/home.html

werden, die die essenziellen Informationen und Funktionen zugänglich machen. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Informationen bereits semantisch beschrieben angeliefert werden und ob die Web-Schnittstelle lokal oder in der Cloud vorliegt. Das Hauptergebnis von SENSE, SENSE WoT, ist äußerst flexibel und transparent bei der Einbindung hochverteilter Ressourcen. Auch eine Mischung unterschiedlich semantisch beschriebener Ressourcen (z.B. SAREF und iotschema.org) ist ohne weiteres möglich. Schwierigkeiten entstehen dann, wenn sich die Datenmodelle derart unterscheiden, dass ein einfaches Mapping nicht oder nur sehr begrenzt möglich ist. Wie beschrieben, ist dies regelmäßig bei KNX/KNX IoT aufgrund der sehr eigenen Modellierung der Fall. Die FH Dortmund hat jedoch in ihrem System ein entsprechendes Mapping umgesetzt und kann somit auch KNX Ressourcen in SENSE WoT verfügbar machen.

4.1 Evaluation

Interoperabilität, Herstellerneutralität: Gesucht wurde ein Konzept, welches die semantische Beschreibung von Geräten und Systemen auf einer Ebene ermöglicht, die es den Herstellern unterhalb dieser Ebene erlaubt, eigene Ansätze und Alleinstellungsmerkmale von existierenden Systemen weiterzuführen. Das Konzept sollte so weit wie möglich auf existierenden Standards beruhen, die typischen Silostrukturen (Abbildung 1) überwinden, bekannte Entwicklungsschemata aufweisen und sich selbst als semantischer Smart Home Standard eigenen.

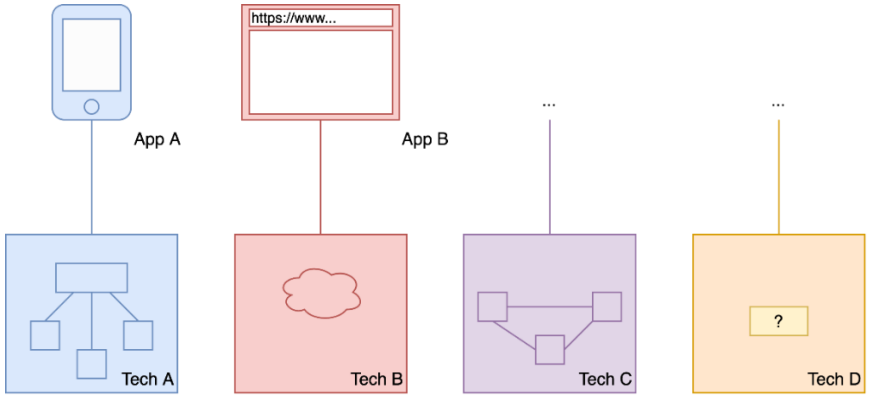

Abbildung 1 Silostruktur existierender Smart-Home-Systemwelten

Ein bisher üblicher Weg, Daten aus zunächst geschlossenen Systemen zu gewinnen, sind klassische Middleware-Lösungen. Diese implementieren für jedes beteiligte System eine eigene Schnittstelle (Abbildung 2). Der große Nachteil ist, dass jedes Mal, wenn sich eine Schnittstelle ändert, die Middleware und alle darauf beruhenden Anwendungen mehr oder weniger stark angepasst werden müssen. Dies erzeugt bei größeren Anwendungssystemen erhebliche Aufwände.

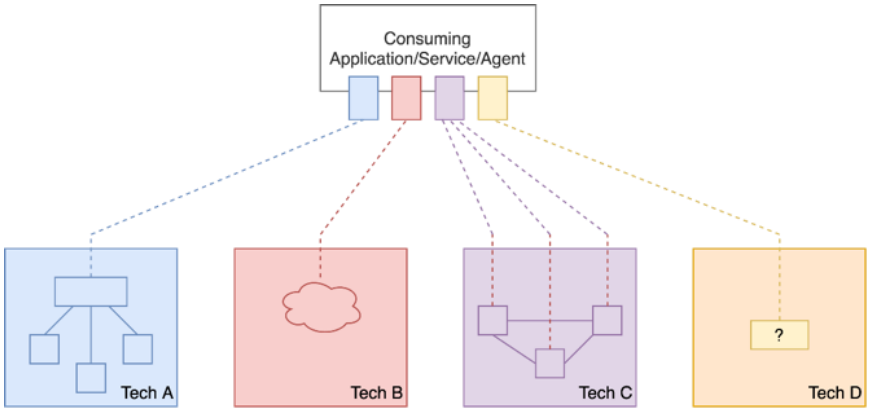

Abbildung 2 Middleware-Ansatz mit Schnittstellen zu jeder Systemwelt

Um diese Nachteile zu umgehen, fiel die Wahl auf das Web of Things-Konzept, inzwischen ein W3C-Standard. Es wurde um einige Smart Home Spezifika zu SENSE WoT (Abbildung 3 sowie Abschnitt 4.2.1) erweitert und im Projekt sowie in den Folgeprojekten SUITE und ForeSight umfassend erprobt und weiterentwickelt. Die semantische Beschreibung beschreibt die darunterliegenden Systeme, so dass darüber liegende, konsumierende Anwendungen nicht geändert werden müssen, wenn sich an den konkreten Systemen etwas ändert. Wie eingangs gefordert ermöglicht dieser Ansatz auch die weitere Nutzung spezifischer APPs (Abbildung 4).

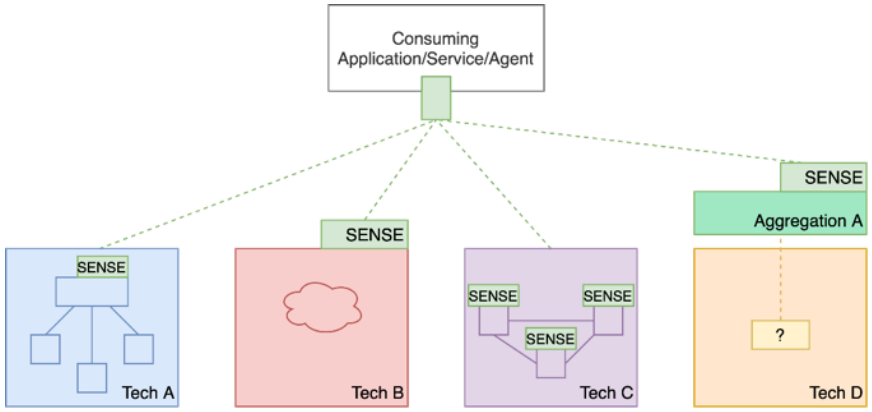

Abbildung 3 Semantische Interoperabilität mit SENSE WoT

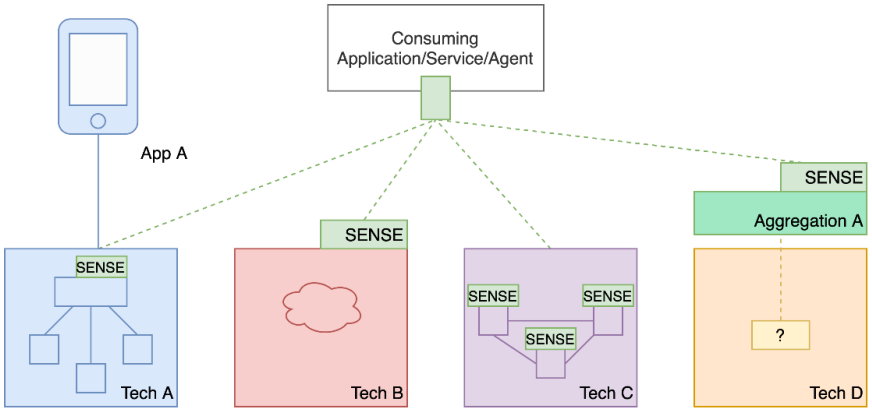

Abbildung 4 Semantische Interoperabilität mit SENSE WoT ergänzt um einen herstellerspezifischen APP-Zugang

Für die semantische Beschreibung bzw. Modellierung der Interdependenzen zwischen Datenpunkten wurden mehrere Ontologien und Datenmodelle aus dem Smart-Home- und IoT-Bereich evaluiert. Die Wahl fiel auf iotschema.org.

Datenschutz: Ein wesentliches Thema im Smart Home ist der Datenschutz. Die Rohdaten aus einem Smart Home lassen sich leider nicht nur für den ursprünglichen Zweck auswerten, sondern sie enthalten in vielen Fällen sehr persönliche Informationen, die die Nutzenden ursprünglich nicht mit Serviceanbietern oder Unternehmen teilen wollten. In SENSE wurde der Ansatz gewählt, möglichst wenige Rohdaten herauszugeben. Zur Abstraktion und Informationsverdichtung wurden im Projekt vor allem Machine Learning Verfahren eingesetzt, die es möglich machen Einzelgeräte/Sensoren, Sensorgruppen oder ganze Automationsbereiche in einem Wert, einer Prognose, einem detektierten Muster, etc. zusammenzufassen. Dieser Ansatz hat sich als äußerst wirkungsvoll erwiesen. Rohdaten werden nicht mehr übertragen.

KI-Methoden im Smart-Home-Kontext: Die u.a. für die Datenabstraktion notwendigen Machine-Learning-Bibliotheken, wie z.B. Google Tensor Flow, wurden auf ihre Verwendungsmöglichkeiten im Smart-Home-Kontext untersucht. In die Evaluation wurden die typischen, anfallenden Daten sowie die

erwartbaren Muster in Datenbeständen eines Smart Home mit einbezogen. Im Rahmen der Evaluation fiel die Wahl auf Tensorflow, ein etabliertes Framework für Machine Learning. Tensorflow verwendet mit dem Python Framework “Keras” (https://keras.io/) eine einheitliche Schnittstelle für verschiedene Machine Learning Backends. Dazu zählen neben Tensorflow beispielsweise Microsoft Cognitive Toolkit, R oder Theano. Das Anwendungsbeispiel „Aktivitätenerkennung“ wurde konzeptionell in der plattformübergreifenden Umgebung, „Jupyter Notebook“ (https://jupyter.org/) mit einem Deep Learning-Ansatz implementiert. Das Training des Modells wurde auf dem im Rahmen von SENSE beschafften GPU Compute Node in der Compute-Plattform durchgeführt.

4.2 Architektur

Im Projektverlauf wurde eine Referenzarchitektur (Abbildung 5) für interoperable Smart-Home-Anwendungen bzw. semantische Smart-Living-Dienste erstellt. Teil der Architektur ist der entwickelte Standard SENSE WoT, eine Smart-Home-Ontologie, zugeordnete Mapping-Verfahren sowie darauf aufbauende, wesentliche Basisdienste. Als strukturierendes Element wurden digitale Zwillinge als zentrales Element zur Interaktion mit einem Smart Home entwickelt. Digitale Zwillinge halten alle verfügbaren Daten und Ressourcen eines Smart Home in semantisch beschriebener Form zur Weiterverwendung in entsprechenden Anwendungen vor. Dies gilt auch für die Datenhistorie. Die Basisdienste vereinfachen den Umgang mit dem geschaffenen Gesamtsystem erheblich. Das Konzept sah von Beginn an eine intensive Verteilbarkeit (Föderierung) vor, welche es im Extremfall ermöglicht, alle Dienste, digitalen Zwillingen etc. in jeweils unterschiedlichen Umgebungen laufen zu lassen. Virtuell werden sie z.B. auf Anwendungsebene zu einem Gesamtsystem zusammengeführt. Auch dies ist ein wesentlicher Aspekt im Umfeld des Datenschutzes, denn auf diese Weise können sensible Daten in ihren jeweiligen Umgebungen verbleiben. Es werden nur ihre Thing Descriptions benötigt und der jeweilige Link zu ihrem physischen Ablageort. Ein sehr flexibler und mächtiger Ansatz.

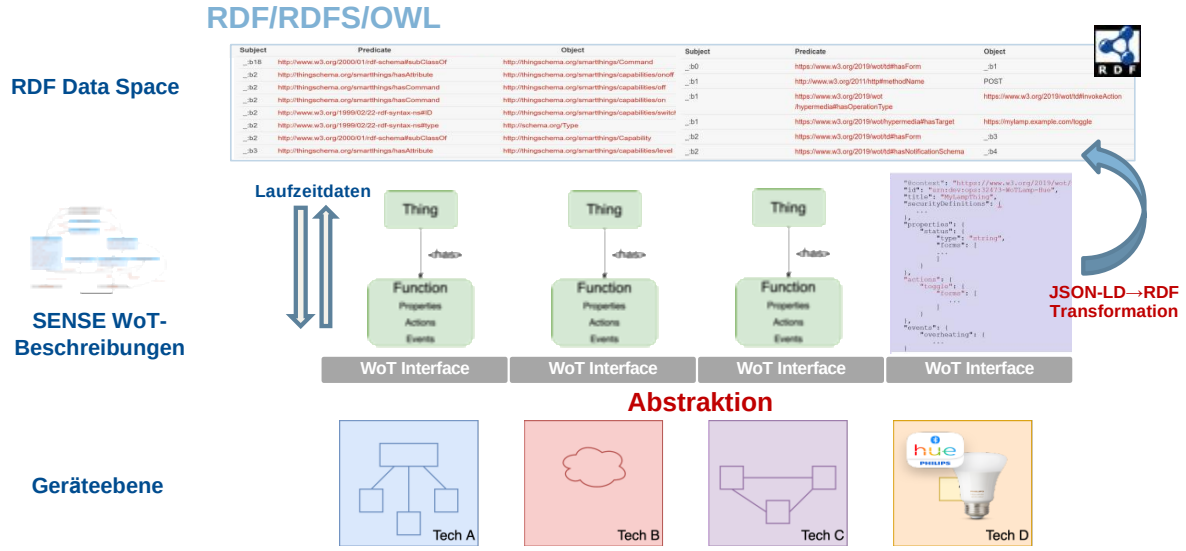

Abbildung 5 Übersicht über die entwickelte SENSE Referenzarchitektur

4.2.1 Smart-Home-Ontologie

Für die Referenzarchitektur wurden die Ontologien Iotschema.org[12] (später Teil von schema.org) und Mozilla Capability Schemas verglichen. In SENSE sowie in den BMWi-Projekten SUITE und ForeSight wird vor allem die Ontologie iotschema.org verwendet, da diese eine breite Anzahl von Geräteklassen beschreibt und nach wie vor von einer weltweiten Community aktiv entwickelt wird. In SENSE gibt es

[12] http://iotschema.org

jedoch keine Festlegung auf nur eine Ontologie, da dies die Vielfalt an prinzipiell integrierbaren Geräten von vorneherein stark einschränken würde. Vielmehr wird auf das Linked-Data-Prinzip gesetzt, welches gerade die Integration verschiedenster Systeme ermöglicht und propagiert. Im Projektverlauf kamen Beschreibungen in iotschema.org nicht vorhandener Geräteklassen hinzu, welche auch in den BMWi-Projekten SUITE und ForeSight fortgeführt werden. Im Projektverlauf konnte so eine umfassende Liste an unterschiedlichsten Smart Home Geräten semantisch beschrieben werden, die aus alle vier Anwendungsfeldern Komfort, Sicherheit, Energie und Assistenz kommen bzw. dafür eingesetzt werden.

4.2.2 SENSE WoT

Alle in Abschnitt 4.2.1 betrachteten Ontologien beschreiben nicht, wie man mit einem Service interagiert. Es gibt daher keine Möglichkeit in den jeweiligen Smart Home Ontologien zu beschreiben, unter welcher URI (Adresse) die gewünschten Daten zu finden sind und wie diese strukturiert sind - beides sind jedoch Grundvoraussetzungen für Interoperabilität auf der Anwendungsebene sowie für die grundsätzliche Föderierbarkeit. Daher wurde der W3C Web of Things (WoT) [13] Standard in SENSE eingeführt. Web of Things Descriptions bieten die benötigten Elemente,

- ein Informationsmodell in JSON-LD,
- die Thing-Abstraktion zur Beschreibung von Datenstrukturierung, Metadaten und Schnittstellen eines „Thing“ (Abbildung 6),
- beliebige Erweiterungsmöglichkeiten durch semantische Annotationen,
- sowie die Verwendung der Ontologie iotschema.org.

WoT basiert dabei selbst auf einer Ontologie und bietet daher auch die automatische Transformation in Triplestore (Datenbank für RDF-Triples). WoT wird im Kontext von SENSE an den Stellen erweitert, wo es keine existierenden Beschreibungsmöglichkeiten gibt, und bildet die Basis für alle Dienste. Zentrales Projektergebnis ist der SENSE WoT-Standard für die semantische Beschreibung von Smart-Home-Komponenten und -Geräten als Smart Home Things. Die Kerneigenschaften von SENSE WoT sind

- Semantische Beschreibung von Metadaten und Schnittstellen von Geräten/Dingen
- Formales Modell und eine allgemeingültige, herstellerunabhängige Repräsentation von Web Things
- Abstraktion von physischen oder virtuellen Entitäten
- Beschreibung von Interaktionen mit einem Thing
- Formale Repräsentation im JSON-Format mit JSON-LD Verarbeitung
- JSON-LD repräsentiert das Wissen über Geräte/Dinge in maschinenlesbarer Form

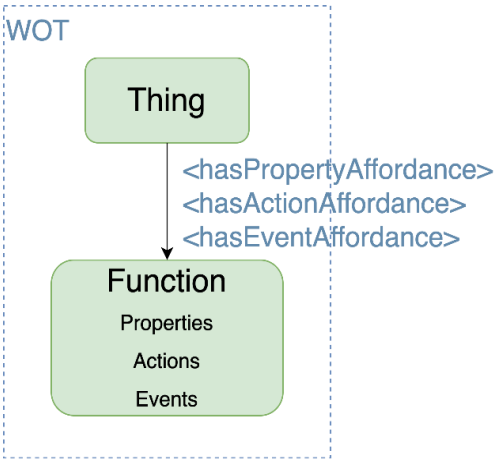

Abbildung 6 WoT-Modell

SENSE WoT erweitert die W3C WoT-Spezifikation um zusätzliche Building Blocks (Abbildung 7), bleibt dabei aber zu 100% kompatibel mit W3C WoT:

- Thing Location: Semantische Beschreibung von Thing-Standorten bspw. in einem Haus oder Apartment. Hierfür wurde eine *Location-View* (gebäudezentrische Sicht) erarbeitet. Die exakte

[13] https://www.w3.org/WoT/

Modellierung dieser Struktur ist aktuell nicht finalisiert und kann sich in Hinblick auf andere laufende Entwicklungen (z.B. BIM, BOT, SAREF4BLDG[14][15][16]) zukünftig ändern.

- Thing Hardware: Eine weitere Ergänzung des *TD*-Modells wurde zur näheren Geräte- und Hardware-Beschreibung vorgenommen. Diese Datenstruktur, aktuell als *Hardware-View* bezeichnet, erweitert die *TD* um Eigenschaften wie beispielsweise: Herstellername, EAN-Nummer, Seriennummer, Software-Version, Hardware-Version. Um das *TD*-Modell nicht strukturell modifizieren zu müssen, werden *Location*- und *Hardware-View* als modulare Komponenten in separaten Datenstrukturen, die neben dem *TD*-Modell liegen, angesehen.
- Thing History: Beschreibung über Endpunkte, die Zeitreihen bestimmter Thing-Eigenschaften liefern, wie Energieverbrauch oder Temperatur.

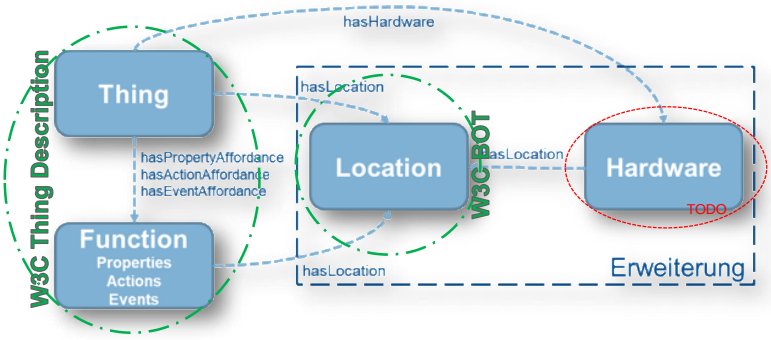

Abbildung 7 Zusammenhang zwischen Ontologie, Web of Things sowie Building Topology Ontology

Durch die die enge Zusammenarbeit mit den assoziierten Projektpartnern und daraus resultierenden unterschiedlichen Anforderungen entstanden weitere Konzepte zur Beschreibung semantischer Eigenschaften von IoT Geräten:

- Entwicklung eines Konzepts für die semantische Beschreibung von dimensionslosen Zustandswerten (vgl. Encoding) und deren Bedeutung (z.B. true = Closed, false = Open). Diese erfordert eine semantische Erweiterung des WoT Basismodells.
- Eine Modellerweiterung durch die Ontologien *Semantik Sensor Network* (SSN) und *Sensor, Observation, Sample, and Actuator* (SOSA) für die Beschreibung von SystemCapabilities und SystemProperties (z.B. Frequency, Accuracy) wurde im IKT-Do konzeptionell erprobt. (Beschreibung von Sensoreigenschaften und Zeitreihenverhalten)

4.2.3 Locations

Im Smart Home spielt die Lokation eines Gerätes oder Sensors eine oftmals entscheidende Rolle. Das das Standard-WoT keine Möglichkeit anbot, eine räumliche Verortung zu beschreiben, wurde WoT mit der Building Topology Ontology (BOT) so erweitert, dass dies möglich wurde (Abbildung 8, Abbildung 9).

Daraus resultierte die Erweiterung der Verlinkung des Thing-Description-Graphen mit dem BOT-[17] Graphen und ermöglicht so die semantische Navigation in den verteilten RDF Graphen von Locations und Things. Das BOT Modell wurde zusätzlich um eine GeoJSON Beschreibung zur Abbildung von 3D Koordinaten in räumlichen Strukturen erweitert und wird im Forschungsprojekt Internet of Light evaluiert.

[14] BIM - https://de.wikipedia.org/wiki/Building_Information_Modeling
[15] BOT - https://w3c-lbd-cg.github.io/bot/
[16] SAREF4BLDG - http://ontoology.linkeddata.es/publish/saref4bldg/index-en.html
[17] Building Ontology Topology (W3C)

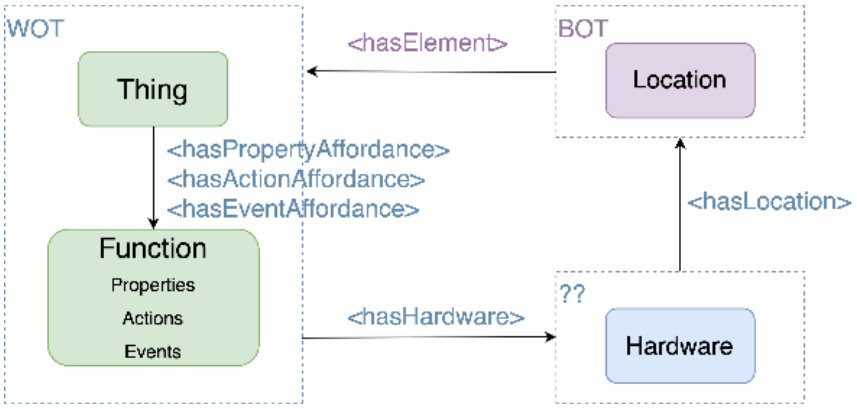

Abbildung 8 Beschreibung mit der Building Topology Ontology (BOT)

Abbildung 9 zeigt die erweiterte Beschreibung in einer Thing Description.

```
{
    "@context": {
        "bot": "https://w3id.org/bot#",
        "geo": "https://purl.org/geojson/vocab#",
        "schema": "http://schema.org/"
    },
    "@id": "https://api.connctd.io/api/betav1/wot/locations/63ade586-3a1a-4547-a66d-5e32e29d854c",
    "@type": [
        "bot:Space",
    ],
    "schema:name": "Living Room",
    "bot:hasElement": [
        {
            "@id": "https://api.connctd.io/api/betav1/wot/locations/968f62a0-b172-482f-949c-5dc230f87767"
        }
    ],
    "geo:geometry": {
        "geo:coordinates": [
            [
                110,
                10
            ], …
```

Hinweis auf verwendete Schemata

Referenz auf Thing-Location

Dimensionierung des Raumes

Abbildung 9 Erweiterung von SENSE WoT um Locations (bot) und Rauminformationen (geo)

4.2.4 Editor für die einfache Erstellung von SENSE WoT Beschreibungen

Im Bereich des Toolings wurde ein SENSE WoT Template Server (IKT-Do) als Microservice (Digital Twin) für die Erstellung von Thing Descriptions (Baukastenprinzip) auf Basis des IoT-Schemas implementiert. Der WoT Template Server ist in das SENSE-WoT-Konfigurations-UI (connctd) und dem darin enthaltenen SENSE-WoT-Wizard (DFKI) integriert. Beide Dienste nutzen die definierten WoT-Properties und -Actions zur einfachen Erstellung neuer Geräte (Things). Für eine weitere Evaluierung dieser Services wurden die in SENSE entwickelten Konzepte in das Forschungsprojekt ForeSight übertragen und werden dort weitergehend erprobt.

4.2.5 Datenmodelle, semantisches Uplifting und Lowering, Mapping

Anwendungen, die Smart Home Dienste nutzen wollen, werden bei Diensten in vielen Fällen verschiedene Smart Home- oder spezifische Einzelontologien vorfinden. Werkzeuge für ein automatisiertes Mapping helfen daher sehr bei der effizienten Anwendungsprogrammierung. Ebenso können Daten und Funktionalitäten wahlweise in verschiedenen Ontologien ausgeliefert werden, was die Interoperabilität und die Akzeptanz durch externe Entwickler unterstützt.

Es wurde ein Reasoning-Service entwickelt, der direkt an die Thing Registry angeschlossen werden kann. WoT-Beschreibungen können durch das Bereitstellen eines Ontology-Alignments-Vokabulars erweitert werden. Gleiche semantische Sachverhalte können in unterschiedlichen Ontologien

ausgedrückt und über den SPARQL-Endpunkt abgefragt werden - das eigentliche Mapping. Folgende Implementierungen wurden vorgenommen:

- Interaktive Weboberfläche zum Entwickeln von Alignment-Vokabularen als Teil der Registry.
- Updaten des Vokabulars führt zum automatischen Reasoning aller Thing-Descriptions (mit SENSE WoT beschrieben)
- Exemplarische Beschreibung einiger äquivalenter Klassen zwischen SAREF und iotschema
- Rückführung des durch das Alignment-Vokabular hergeleitete Wissen in das WoT-Informationsmodell. Somit profitieren auch Entwickler, die nur auf Basis des JSON-Informationsmodell entwickeln von dem unterliegenden Reasoner auf RDF-Basis

Die Rücktransformierung von RDF in das JSON-basierte Informationsmodell ist Teil der Registry. Die Schwierigkeit liegt hier in der Wiederherstellung einer validen WoT-Struktur, da diese bei einer Umwandlung von RDF-NTriples in JSON-LD verloren geht. Exemplarisch wurde dazu JSON-LD-Framing verwendet, welches an vielen Stellen aber nicht ausreicht und somit manuell angepasst werden muss.

Folgende Mapping Methoden wurden umgesetzt

- **Programmatisch** (z.B. Code in einer Hochsprache)
    - Existiert ein theoretisches Mapping, kann dieses theoretisch auch implementiert werden
    - Das Mapping ist implizit im Source Code und nur für Entwickler nachvollziehbar
    - Bei der Umsetzung komplexer programmatischer Mappings kommt es leicht zu Fehlern
    - Je nach Codequalität ist die Wartbarkeit eingeschränkt und nur durch Experten umsetzbar
- **Mapping Frameworks**
    - Das Mapping wird strukturiert im Rahmen des Frameworks definiert
    - Je nach verwendetem Framework kann die Mapping-Vorschrift außerhalb einer konkreten Programmiersprache z.B. als XML-File definiert werden.
    - Fehler können teilweise ohne Änderungen am Source Code korrigiert werden
    - Je nach Fähigkeiten des Frameworks gibt es Limitierungen
    - Mapping Frameworks verwenden zum Teil sehr unterschiedliche Techniken und setzen daher viel Fachkenntnis voraus
    - Je nach Mapping-Technik können Performanz Probleme auftreten
- **Semantik Web Mapping / Ontology Alignment**
    - Definierte Mapping Sprachen (z.B. RML, SPARQL)
    - Hohe Komplexität (Frameworks, Spezifikationen, Formate)
    - Forschung in diesem Umfeld ist aktiv
    - Je nach Mapping-Technik können Performanz Probleme auftreten

4.3 Registry

Die Registry ist der Einstiegspunkt in die virtuelle Repräsentation eines Gebäudes/einer Wohnung und den darin verfügbaren Services. Die entwickelte Thing Registry ist ein vollständiges Directory. Sie listet alle vorhandene SENSE-WoT-Beschreibungen auf und wandelt diese automatisch (siehe 4.2.5) in RDF um. Semantische Informationen werden über einen Standard-SPARQL-Endpoint zur Verfügung gestellt. Die API der Thing Registry verfügt über eine OpenAPI-Beschreibung, um die Entwicklung zu erleichtern. Neben dem Erzeugen, Updaten und Löschen von Dingen verfügt der Service auch über eine Server-sent Events-Schnittstelle, um ein ständiges Abfragen der Schnittstellen zu verhindern und maximale Flexibilität zu ermöglichen. Durch die Beschreibung von virtuellen Dingen (Things) können auch aggregierte Daten zur Verfügung gestellt werden. Die Registry unterstützt Discovery-

Mechanismen und dient als Einstiegspunkt für Entwickler in Smart Homes. Sie bietet die Möglichkeit durch Thing Description Templates „Legacy Devices“ automatisch aufzufinden und zu beschreiben.

4.4 Digitaler Zwilling

Digitale Zwillinge der Wohnungen oder Gebäude sind zentrale Strukturierungselement von SENSE. Entwicklungsergebnisse sind u.a. ein kompletter Stack bestehend aus einer Zeitseriendatenbank (InfluxDB), einem History Service, der semantischen Annotation mit SENSE WoT, der Registry für die Verwaltung der Things sowie darauf aufbauenden Funktionen für semantische Suchen bzw. ein komplettes Agentensystem. Als Entwicklungsdatensatz diente der offene Refit-Datensatz[18]. Zur exemplarischen Umsetzung wurde ein Testaufbau bestehend aus der selbstentwickelten Registry und einer InfluxDB-Instanz erstellt und zunächst mit Daten aus dem Refit-Datensatz befüllt, die dann in simulierter Echtzeit einem konsumierenden Dienst ausgespielt und semantisch annotiert werden. Im Projektverlauf ist daraus ein kompletter History-Service entstanden, welcher semantische Annotationen und zugehörige, historische Werte(pakete) z.B. für ein Machine Learning System ausgibt.

Die Archivierung und Aggregation basiert auf der InfluxDB. Sie ist wesentlicher Teil des digitalen Zwillings. Wie oben beschrieben wurde eine komplette Kette aus semantischer Beschreibung, Datensammlung mit dem Agentensystem, Datenarchivierung und Datenbereitstellung/Aggregation aufgebaut. Die Erstellung von Zeitreihen findet automatisch durch die Verwendung von Agententechnologie statt (siehe 4.7). Agenten protokollieren alle beschriebenen Eigenschaften eines Geräts dauerhaft in fixen Intervallen. Ändert sich der Zustand eines Gerätes, wird dieser in die InfluxDB geschrieben. Über Events der Thing Registry, registriert ein Agent neue Eigenschaften/Geräte und protokolliert diese automatisch ebenso. Die Verbindung des Archivierungsdienstes mit einer Eigenschaft des Geräts erfolgt über die WoT-Beschreibung. Dadurch ist es möglich, automatisch (maschinenlesbar) Zeitreihendaten für eine bestimme Eigenschaft eines Geräts, wie beispielsweise Temperatur, Luftfeuchtigkeit, exakt abzufragen. Entwickler können über semantische Anfragen beliebige Daten aus dem Archivierungsdienst ziehen und damit ohne Umwege Machine-Learning-Modelle z.B. für die Datenaggregation entwickeln.

Daraus entwickelte sich im Kontext des Projektes das allgemeine Verständnis für die grundlegende Definition eines Digitalen Zwillings (DZ) für ein Smart Home. Die Anforderungen an den DZ wurden grundsätzlich wie folgt definiert:

- Ein *Digital Twin (DT)* ist im Allgemeinen ein digitales Abbild von physischen Objekten, Systemen oder Prozessen. Im Smart Home/Building Kontext wird ein *DT* durch die digitale maschinenlesbare Repräsentation (siehe Abbildung 10) der Gebäudeinformationen, bspw. Geräteeigenschaften und Zustandsdaten sowie deren Historie, definiert. Darüber hinaus beschreibt der *DT*, wie über entsprechende Schnittstellen auf diese Daten zugegriffen werden kann und welche IT-Security Anforderungen erfüllt werden müssen.
- Das *Thing* beschreibt ein Gerät mit seinen Eigenschaften und Funktionen, Kommunikationsschnittstellen[19] und die damit verbundenen *Security* Anforderungen. Weitergehend referenziert das Thing auf Informationen zur Verortung des Gerätes (*Locations*), zusätzliche Geräteinformationen (*Hardware*) und auf die aktuellen und historischen Zustandsdaten.

[18] https://www.refitsmarthomes.org/datasets/

[19] bspw. eine *Webservice-, Websocket-* oder eine Graphen-basierte Schnittstelle auf Basis der ***S**PARQL **P**rotocol **A**nd **R**DF **Q**uery **L**anguage (SPARQL)* für RDF-Triples

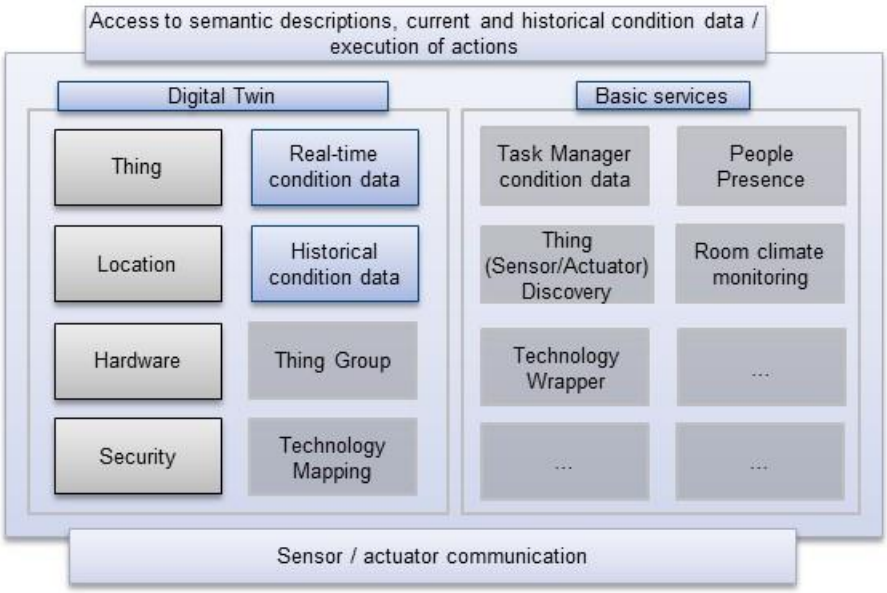

Abbildung 10 Verankerung eines Digital Twin in einem Gerät / System

Der DT kann auf unterschiedlichen Ebenen (bspw. Device, Controller, Manager, Cloud) definiert werden und sollte im Sinne einer Serviceorientierung und Skalierbarkeit weitgehend identisch aufgebaut sein. D.h., je nach den physikalischen Gegebenheiten und abhängig z.B. von Verfügbarkeits- und Laufzeitbedingungen, verwaltet ein Controller bei komplexen Netzwerken ggf. nur einen Teil eines Gebäudes oder eine Wohneinheit, der Manager ein Gebäude und die Cloud N Gebäude. Die Teilkomponenten sind dann entsprechend verlinkt und bilden das Gesamtsystem des DT. Umgekehrt bei einfachen Anwendungen z.B. im Smart Home-Bereich mit geringem Komplexitätsgrad ohne besondere Verfügbarkeits- und Laufzeitanforderungen kann der DT in einem Cloudsystem angeordnet werden. Die Skalierbarkeit stellt hier somit eine wesentliche Forderung dar.

4.5 Semantische Dienste zur erleichterten Anwendungsentwicklung

4.5.1 Dienststrukturierung

Entwickelt wurde ein Modularisierungskonzept auf der Basis von Microservices (Basisservices). Die damit entwickelten Dienste laufen in Docker Containern, die von einer konkreten Hardware und dem nativen Betriebssystem abstrahieren. Die Docker Container werden auf einer Clusterumgebung (Compute Plattform) von dem sehr weit verbreiteten Open-Source-System „Kubernetes“ (https://kubernetes.io/de/) verteilt. Die Verwendung der Container-Orchestrierung findet auf mehreren Ebenen statt:

- Orchestrierung auf der DFKI Compute-Plattform, basierend auf Kubernetes, um Ressourcen (Services) bereitzustellen, z.B. für rechenintensives Training der Modelle auf entsprechend leistungsfähiger Hardware
- Docker-Swarm-Orchestrierung auf der Wohnungs- oder Gebäudeebene mit leistungsschwacher, aber energieeffizienter Hardware, z.B. mit Intel NUCS. Dieses Setup kann beliebig erweitert werden, wenn die Rechenkapazität, z.B. bei vielen gleichzeitig laufenden Gebäudeservices, nicht ausreicht.
- Die Implementierung von feingranular skalierenden Services, wie z.B. Registry, Reasoning und Location. Das Entwicklungsziel sind möglichst universell wiederverwendbare Services, so genannte Basisservices. Basierend auf den hier gemachten Erfahrungen werden in ForeSight auch die KI-Basisservices erstellt.

Diese umgesetzte Dienststrukturierung ist somit die Basis für die unbedingt notwendige Skalierung und auch die erforderliche Energieeffizienz im Gebäude.

4.5.2 Basisdienste

Zur besseren Handhabbarkeit von SENSE WoT wurden verschiedene Basisdienste entwickelt. Dies sind:

Datenaggregations- und Archivierungsdienst: Die Archivierung und Aggregation basiert auf der InfluxDB. Sie ist wesentlicher Teil des digitalen Zwillings. Es wurde eine komplette Kette aus semantischer Beschreibung, Datensammlung mit dem Agentensystem, Datenarchivierung und Datenbereitstellung/Aggregation aufgebaut. Agenten protokollieren alle beschriebenen Eigenschaften eines Geräts dauerhaft in fixen Intervallen. Ändert sich der Zustand eines Gerätes, wird dieser in die InfluxDB geschrieben. Über Events der Thing Registry, registriert ein Agent neue Eigenschaften/Geräte und protokolliert diese automatisch. Die Verbindung des Archivierungsdienstes mit einer Eigenschaft des Geräts erfolgt über die WoT-Beschreibung. Dadurch ist es möglich, automatisch (maschinenlesbar) Zeitreihendaten für eine bestimme Eigenschaft eines Geräts, wie beispielsweise Temperatur, Luftfeuchtigkeit, exakt abzufragen.

Dienste für intelligente Steuerung im Smart Home – Machine Learning mit Smart-Home-Daten: Es wurde eine Web-Service-Hülle für das Machine Learning System Tensorflow aufgebaut. Diese Diensthülle wurde semantisch mit der SENSE WoT-Beschreibung beschrieben. Der Dienst verwendet den Archivierungsdienst für die Erzeugung von Modellen, z.B. Vorhersage der Aktivitäten in einem Gebäude in den nächsten 2 Stunden basierend auf den Werten der letzten Wochen. Die Modelle kommen trainiert von der Compute-Plattform und sind als SENSE WoT Things beschrieben und Teil der Wissensbasis für das Agentensystem AJAN.

Visualisierungsdienst: Basierend auf dem offenen Visualisierungsframework Grafana wurde eine umfassende Visualisierungs- und Datenflussumgebung aufgebaut, die es a) ermöglicht, Einzelservices graphisch zusammenzuführen und b) die Daten und Ergebnisse der beteiligten Sensoren bzw. virtuellen Sensoren anzuzeigen. Das Werkzeug wurde und wird vor allem bei der Fehleranalyse bzw. der Musterüberprüfung z.B. von Smart Plug oder Smart Meter Daten eingesetzt. Die Oberfläche ist auf allen gängigen Hardware-Plattformen lauffähig.

4.6 Aufbau und Betrieb einer Cloud-Umgebung für Smart-Living-Dienste

Für die projektbezogenen Arbeiten wurde am DFKI eine Serverumgebung aufgebaut, die neben der Datenspeicherung auch anspruchsvolle Machine Learning Aufgaben übernehmen kann. Die Umgebung wurde in SENSE umfangreich z.B. für die gezeigten Demoanwendungen genutzt. In erweiterter Form dient diese Umgebung auch in den Projekten SUITE und ForeSight für die Konzeptentwicklung und die Use Case Realisierung.

4.7 Multiagentensteuerung für Smart Home

Das DFKI hat in anderen Projektkontexten ein Agentensystem, AJAN, entwickelt. Es ist ein auf RDF basierendes Multiagentensystem, d.h. das gesamte „Weltwissen“ des Systems liegt in Form von RDF-Triples vor. Im Fall von SENSE Services sind dies iot.schema.org RDF-Triples. Die Verhaltensmodellierung erfolgt mit Behaviour Trees, die für SENSE Beispiele erstellt wurden. AJAN wurde/wird auch für die Datensammlung aus einer existierenden Smart Home Installation eingesetzt. Hierzu wurde

- die Entwicklung des Konzepts eines Monitoragenten vorgenommen, dies sind Agenten, die kontinuierlich die Eigenschaften eines IoT-Devices überwachen, neue Werte aufgreifen und übertragen und in ihr Wissen aufnehmen. Dies können z.B. aktuelle Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder registrierte Bewegungen sein. In AJAN wird damit das Weltwissen erweitert und in die Planung des Verhaltens einbezogen. Dieser Prozess erfolgt dynamisch zur Laufzeit.
- Die Basis ist die semantische Beschreibung des Geräts mit einer WoT-Thing Description

Mehrere Agenten entwickeln ein gemeinsames Wissen über den aktuellen Zustand aller vorhandenen Geräte. Dieses Wissen dient zur Umsetzung von Use Cases.

4.8 Gebäude als Service

Das Konzept von „Gebäude als Service“ soll es Anwendungsentwicklern ermöglichen, abstraktere Anfragen an ein Gebäude, d.h. an eine Einstiegsadresse (URI) zu richten. Gebäude als Service beruht auf dem abstrakten Smart-Living-Datenmodell (Abbildung 11).

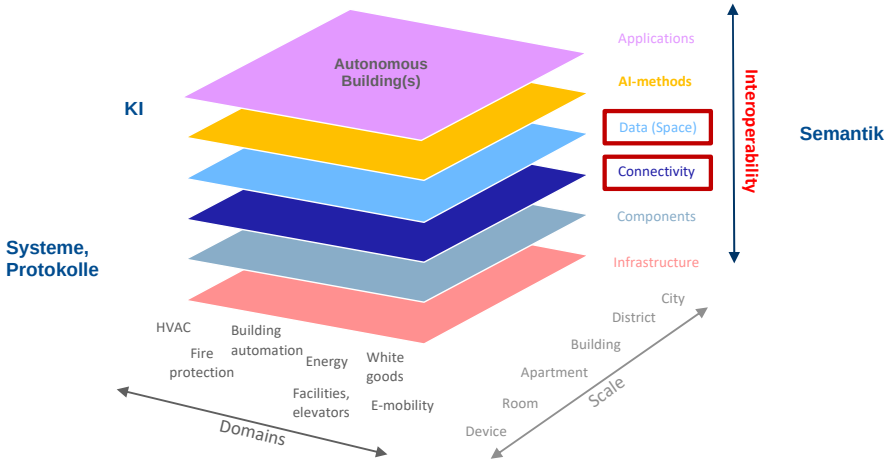

Abbildung 11 Abstraktes Smart-Living-Datenmodell

Voraussetzung ist die herstellerunabhängige Interoperabilität zwischen allen beteiligten Smart-Home-Komponenten und -Diensten sowie deren einheitliche Beschreibung als semantische Things (Abbildung 11 - Ebene Connectivity). Alle Things bilden einen Smart Home Data Space, der im Fall von SENSE in die einzelnen digitalen Zwillinge der Wohnungen bzw. Gebäude strukturiert ist. Basis für dieses Konzept ist die Registry (Abschnitt 4.3). Anfragen in den Data Space erfolgen i.d.R. über die Registry, die alle realen und virtuellen Things verwaltet und für Anfragen bereitstellt. Alle Dienste in SENSE folgen dem RESTFul-Ansatz (GET, POST, PUT, DELETE). Abfragen/Suchen auf den semantisch beschriebenen Daten erfolgen über standardisierte Schnittstellen über die Registry.

Dieses Konzept wurde in dem BMWi-Projekt ForeSight weiterentwickelt. Dort wurde der Data Space um KI-gestützte Funktionen zu einem intelligenten Data Space erweitert (Abbildung 12).

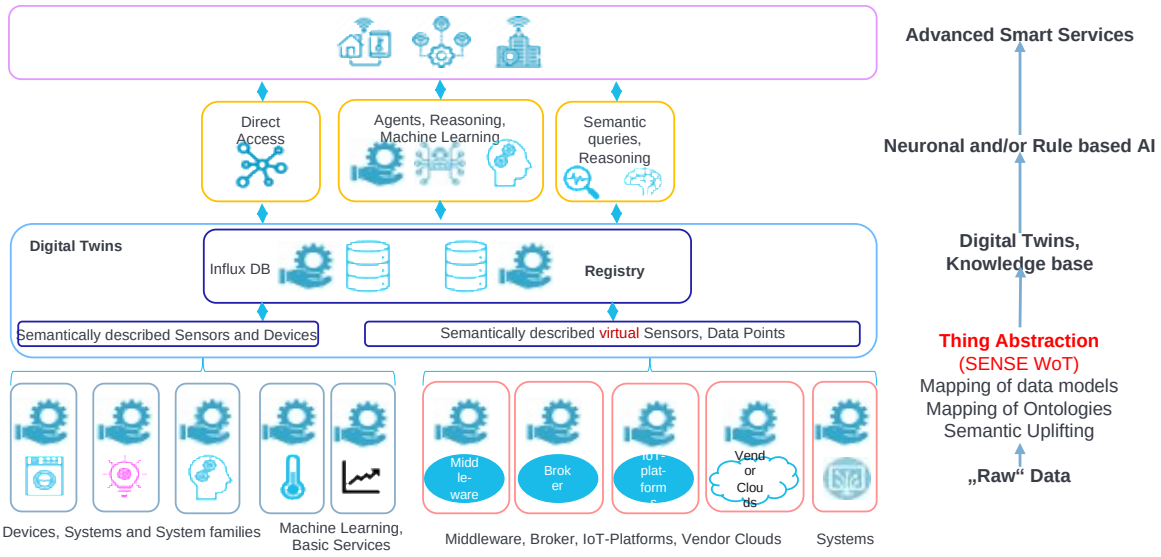

Abbildung 12 Intelligenter Data Space aus dem Projekt ForeSight

Das Konzept hat sich sowohl im Projektverlauf von SENSE als auch in ForeSight als äußerst mächtiges Werkzeug für die gezielte Suche und Interaktion mit Smart-Home-Komponenten, Systemwelten und Geräten erwiesen. Anwendungen nutzen nur mehr diesen abstrakten Layer und werden damit vollständig unabhängig von systemspezifischen Schnittstellen. Alle relevanten Eigenschaften von Things können automatisiert gesucht und bspw. für eine KI-Anwendung (Advanced Smart Service) genutzt werden.

4.9 Anwendungsbeispiele und assoziierte Projekte

SENSE hat Anwendungsbeispiele für und mit SENSE WoT aus den Bereichen Komfort, Assistenz und Energie entwickelt. Die Arbeiten sind entweder als einzelne Demonstratoren, als gemeinsame Aktivität mit den Projekten SUITE und ForeSight sowie als assoziierte Projekte durchgeführt worden. Ein wesentlicher Aspekt von SENSE waren die assoziierten, teilweise auch unterbeauftragten Projekte aus dem Bereich Smart Living, die mit Unternehmen aus der Community durchgeführt wurden. Für die Bereitstellung und Pflege von Use Case bzw. projektbezogenen Testumgebungen für die Workshops und assoziierten Projekte wurde die IoT- und Cloudplattform von CONNCTD für Developer bereitgestellt und mit den Labs bei der FH Dortmund und dem SENSE Lab in Berlin verbunden. Das SENSE Lab wird auch im Projekt ForeSight genutzt. Das Equipment und die technische Ausstattung des SENSE Lab in Berlin wurde von CONNCTD verantwortet. Für die assoziierten Projekte wurden Geräte von Herstellern und Partnern hinzugefügt.

4.9.1 Anwendungsbeispiel Energiemanagement

Das DFKI hat den Refit-Datensatz (https://www.refitsmarthomes.org/) als Testdatensatz für die Projekte SENSE und auch SUITE nutzbar gemacht. Refit enthält energierelevante Daten aus 20 Smart Homes in Großbritannien. Im Berichtszeitraum wurde das Visualisierungsfrontend Grafana (https://grafana.com/) angebunden, welches es ermöglicht, ausgewählte Daten zu analysieren und zu visualisieren.

Für eine Anbindung von Ladesäulen bzw. Ladesäuleninfrastrukturen, wurde eine erste semantische Analyse durchgeführt, wie eine auf OCPP[20] basierende Plattform in die SENSE Systemumgebung integriert werden könnte. Die Untersuchungen in Kooperation mit dem Forschungsprojekt EMEL[21] erfolgreich prototypisch umgesetzt.

4.9.2 Anwendungsbeispiel Komfort und Assistenz

Das DFKI hat in gemeinsamer Arbeit mit ForeSight eine integrierte Demo aufgebaut, die auf allen Aspekten von SENSE WoT, den oben beschriebenen Teildiensten, der Registry sowie diversen KI-Basisdiensten aufbaut und die im Rahmen der vierten ForeSight General Assembly gezeigt wurde. Am Beispiel der DFKI-Testwohnungen konnte die Demo das Zusammenspiel von Motion Sensorik, Türkontakten, Smart Meter, Smart Plugs und einem vernetzten dormakaba-Schloss in den Anwendungsfeldern Komfort und Assistenz gezeigt werden.

4.9.3 Anwendungsbeispiel Sicherheit

Diese Anwendungsbeispiele wurden mit den Partnern dormakaba und Citynode als assoziierte Projekte umgesetzt.

4.9.4 Assoziierte und unterbeauftragte Projekte

Citynode: Die Anwendungsbeispiele „Komfort“ und „Sicherheit“ sollten zusammengeführt und mit weiteren Systemen erweitert werden. Dazu ist in einem Projekt/ Unterauftrag mit Citynode die

[20] OPEN CHARGE ALLIANCE - https://www.openchargealliance.org/

[21] Emel: Energiemanagement in metropolitanen eMobility-Ladeinfrastrukturen - https://www.ruhrvalley.de/projects/26-emel

Anbindung einer Schließbox und dessen semantische Beschreibung vereinbart worden. Eine Box mit mehreren Schließfächern kann im Smart Home/Building und auch im Smart City Kontext eingesetzt werden. Zusätzlich zum Smart Home können diese Schließfächer perspektivisch auch als Stadtmöbel genutzt werden, so dass sich hier eine Synergie zwischen verschiedenen Domänen entstehen kann. Ziel ist es, Schließfächer aus der Ferne zu administrieren, zu steuern und über die im SENSE-Projekt genutzten Techniken der semantischen Anreicherung nach Web of Things Standard zu ergänzen, sowie wie das Unit-Konzept zu testen. Im Projekt sollte die WoT-Abstraktion bereits lokal auf den Geräten erfolgen, aus Performancegründen wurde der Service jedoch komplett in der Cloud durchgeführt. Zum Einsatz kam erstmalig auch ein neues Protokoll, das als Open Source Protokoll Hersteller unterstützen soll, Geräte mit wenig leistungsstarken Komponenten (CPU/Speicher) direkt mit der CONNCTD IoT Middleware zu verbinden. Die CONNCTD IoT Middleware diente in diesem Projekt als komplettes IoT Backend, damit der Hersteller Citynode keine eigenen Schnittstellen bereitstellen musste. Die Anbindung des Geräts und die Abstraktion der Eigenschaften sowie die Abbildung dieser Eigenschaften als WoT Thing Description ist als Hardware-nahes Beispiel in SENSE erfolgreich umgesetzt worden. Aus Serviceentwicklerperspektive ist das Gerät gleichartig wie ein dormakaba-Schließsystem oder ein Nuki-Türschloss über die Developer API nutzbar.

dormakaba: Zur Vorbereitung des assoziierten Projektes wurden umfassende Diskussionen von Building Informationen Modelling (BIM), Locations und SENSE WoT am Beispiel von dormakaba Zutritts- und Schließsystemen im Bereich Assistenz und Sicherheit durchgeführt. Entstanden sind die grundlegenden Konzepte für den intelligenten Türpförtner im Use Case Unattended Delivery, welcher dann (teilweise in Kombination mit dem Projekt ForeSight) technisch umgesetzt wurde.

Der Use Case „Unattended Delivery“ im SENSE-Projekt zeigt als praktische Umsetzung ein prototypisches Beispiel für das Zusammenspiel von Einzelkomponenten im Smart Home, deren Zusammenspiel keineswegs der ursprüngliche Zweck der einzelnen Komponenten war. Die Umsetzung setzt eine Zwischenschicht an Übersetzung und Steuerung voraus, die im SENSE- Projekt durch die IoT CONNCTD Plattform zur Verfügung gestellt und die konsequente Nutzung des erweiterten WoT-Models ermöglicht wird. Dazu zeigt dormakaba, mit welchen Entwicklungssprüngen zu rechnen ist, wenn die eigene technische Entwicklungswelt geöffnet wird und die technischen Silos aufgebrochen werden.

Konkret wurde beim Use Case die Idee verfolgt, mit vorhandenem Smart-Home-Equipment einen neuen Use Case abzubilden, ohne extra auf den Use Case zugeschnittene Hardware zu nutzen. Im Use Case „Unattended Delivery“ wird ein Paket angeliefert und abgelegt, obwohl keine Empfangsperson die Wohnungs-/Haustür öffnet. Dazu wird über das Drücken eines Tasters (Klingel) ein Signal ausgelöst, welches auf dem Kanal eines üblichen Messengers eine Nachricht auslöst. Über den Messenger wird das Türschloss (dormakaba) vom Endnutzer geöffnet, so dass der Paketbote die Tür öffnen kann. Der Türkontakt meldet die Türöffnung an den Endnutzer, der Paketbote kann das Paket an einem Helligkeitssensor ablegen und das Haus verlassen. Der Türkontakt meldet dem Endnutzer das Schließen der Tür. Alle genutzten einzelnen Komponenten wurden für den Use Case semantisch beschrieben. Dadurch kann sich der Serviceentwickler auf den sinnvollen Serviceablauf konzentrieren und muss nicht in die Tiefen der Komponentenanbindung eintauchen. Dazu werden die Komponenten austauschbar, ohne den Service erneut programmieren zu müssen. Im Nachgang wurde noch das Schließsystem von Citynode als Alternative in den Use Case eingebaut. Diese Modularisierung und Abstraktion führt auch dazu, den Use Case um weitere Funktionen ergänzen zu können. Beispielsweise Kamerabilder oder Temperaturauswertungen, etc. Der dormakaba-Use Case unattended delivery beweist die Möglichkeiten und die Notwendigkeit dieses übergreifenden WoT-Ansatzes.

Pxio: Entwicklung eines SENSE WoT-konformen Dienstes, der ausgewählte, relevante Funktionen des Pixio-Systems steuern kann. Der Pxio-Service kann beliebige Pixelquellen auf wiederum beliebige Darstellungsmedien (Smart TV, Tablet PC, Smartphone, jede Art von Display etc.) in beliebigen Zusammenstellungen ausliefern. Die Übertragung erfolgt ohne Videokabel und auf Basis von Ethernet

bzw. WLAN. Ziel war die Einbettung des Pxio-Services in den Anwendungsfall „Unattended delivery“, welcher von Partner IoT CONNCTD und dormakaba gemeinsam realisiert wurde. Dieser Use Case war dem Thema Komfort und Sicherheit zugeordnet.

FAU: Grundsätzlich galt es Wissen zu erzeugen, um verschiedene Abstraktionsmodelle in eine Web of Things (WoT)-Welt überführen zu können. Hierfür galt es die Grenzen der WoT-Welt zu ermitteln und die im Rahmen des SENSE-Projektes entstandenen Ergebnisse zu verifizieren und kontextuelle und semantisch angereicherte Beschreibungsmöglichkeiten für Geräte aus der Smart-Home-Domäne zu erschaffen. **openHAB** setzt als Smart-Home-Plattform bereits ein Datenmodell ein und es galt dessen Vereinbarkeit mit WoT-Ansätzen zu prüfen und insbesondere zu hinterfragen, welche Rahmenbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz in einer Cloud-Umgebung zu gewährleisten sind. Anhand eines Beispiels-Use-Cases (Zugriff auf Sensor-Daten und Aktoren) galt es die Machbarkeit zu beweisen. Hierfür sollte eine Integration mit Hilfe eines openHAB-Bindings erfolgen. Ebenso sollte die Verfügbarkeit des openHAB-Datenmodells in Richtung der Abstraktionslogik des SENSE-Projektes überführt werden, etwa die Zustandsänderungen. Das SENSE-Labor in Berlin setzt die connctd IoT-Middleware ein. Das Binding sollte hier die kommunikationstechnische Verbindung zwischen openHAB und CONNCTD IoT-Middleware dieser Middleware sicherstellen und darüber hinaus resultierende Modelle über eine GraphQL API in der Cloud persistieren. Zwischen den beiden Systemen openHAB und connctd IoT Middleware sollten angebundene Geräte semantisch beschrieben und zur Verfügung gestellt werden. Es galt hier die aktuell im SENSE-Projekt sich etablierende WoT Thing Description API zu nutzen. Diese API sollte auch für Services genutzt werden, etwa um die über das Binding angebundenen Geräte zu nutzen. Es gilt darüber hinaus einen Demo Service zu implementieren, etwa eine Visualisierung bestimmter Aktionen in Anlehnung an die Gerätezustände oder eingebundener Geräte. Es wurde ein openHAB-Addon entwickelt, welches die oben formulierten Anforderungen erfüllt. Zusätzlich wurde ein weiteres Addon realisiert, das einen Service realisiert, welcher wiederum das aus dem ersten Arbeitspaket nutzt. Das Gesamtergebnis wurde im Rahmen des SENSE-Meilensteintreffens vorgestellt (Abbildung 13).

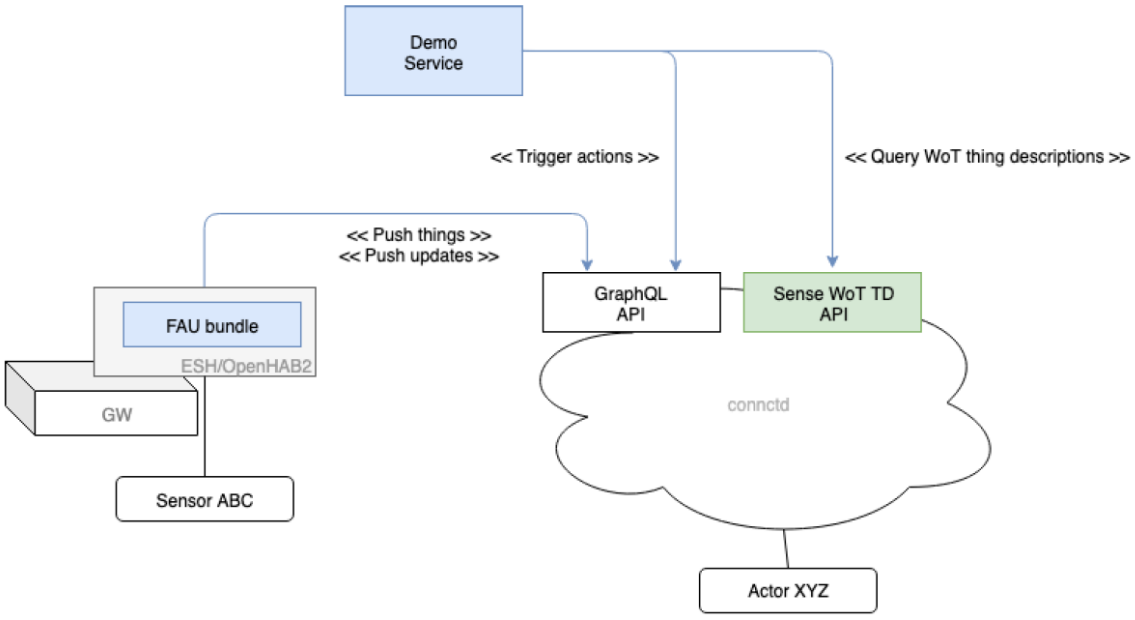

Abbildung 13 Abbildung 1 OpenHAB - SENSE WoT Architekturbild

KEO: Die Unternehmen aus der deutschen Elektroindustrie sind noch nicht vollumfänglich im Bereich Internet of Things vertreten. Um eine beispielhafte Implementation eines für sich abgeschlossenen und lokal interoperablen Services zu erstellen, hat das SENSE-Konsortium einen Unterauftrag an die KEO GmbH zur prototypischen Anbindung des EEBUS/Spine-Standards vergeben. In diesem Unterauftrag wurde ein WoT Thing Directory Service gebaut, der auf einem EEBUS Gateway installiert

wurde. Dieser Service liefert Thing Descriptions aus, die Geräte beschreiben, die über das Gateway angebunden sind (CEM und Smart Meter). Auf der anderen Seite, bietet der Service über den in der Cloud befindlichen WoT Thing Directory Service Thing Descriptions an, die Lampen und Rauchmelder beschreiben (Abbildung 14). Im weiteren Verlauf des Projektes wurde ein Dienst entwickelt, der diese verschiedenen Gerätebeschreibungen nutzt, um diverse Regeln umzusetzen. Beispiele:

- Ein unabhängiges Brandmeldesystem löst einen Alarm aus, der in einer per WoT beschriebenen Umgebung an ein ebenfalls unabhängiges EEBUS-EMS übergeben wird. Als Reaktion auf den Alarm werden EEBUS Events ausgelöst und die Stromzufuhr zu einer Ladesäule unterbrochen.

- Das EEBUS-System arbeitet bidirektional und stellt Stromverbrauch (Nachfrage) und Stromeinspeisung (Überschuss) fest. Diese EEBUS Daten werden in WoT Thing Descriptions bereitgestellt und von der Regelmaschine interpretiert, um unabhängig installierte Geräte/Lampen farblich zu steuern.

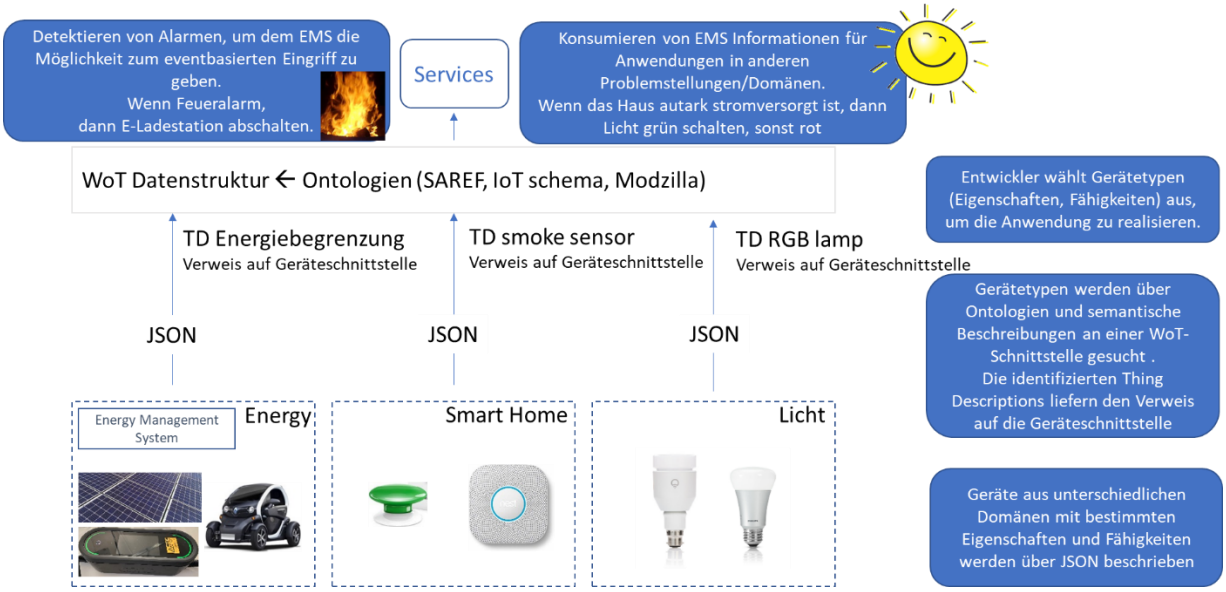

Abbildung 14 Szenario EEBUS – SENSE WoT

Diese von außen betrachteten trivialen Use Cases lösen eine von vielen Fachexperten jeweils betonte Problemstellung auf. Unabhängige Systeme, teilweise sogar zertifizierte oder regulierte Produkte/Lösungen können dennoch Bestandteil einer interoperablen Welt werden, ohne dass sich deren Struktur oder Technologie ändern muss. Dies ist ein Beispiel für die eingangs beschriebene Interoperabilität auf einer abstrakten Ebene, die den Herstellern unterhalb dieser Ebene größtmögliche Freiheiten lässt, eigene Funktionalitäten, Regularien, etc. beizubehalten.

In SENSE wurde eine prototypische Anbindung des EEBUS/SPINE-Standards bzw. der darauf basierenden SAREF4Ener-Ontologie an SENSE WoT vorgenommen. Diese Arbeiten sind eine Querbeziehung zu dem EU-Projekt Interconnect, welches den SAREF4Ener-Standard für die Domäne Energie weiterentwickelt. Diese Aktivität war dem Themenfeld Energie zugeordnet.

ABB: Mit dem assoziierten Projektpartner ABB wurden Konzepte für die Nutzung von SENSE WoT im Edge Bereich (ABB Smart Home Gateway) entwickelt und auch prototypisch implementiert. Der Versuchsaufbau sah wie folgt aus (Abbildung 15).

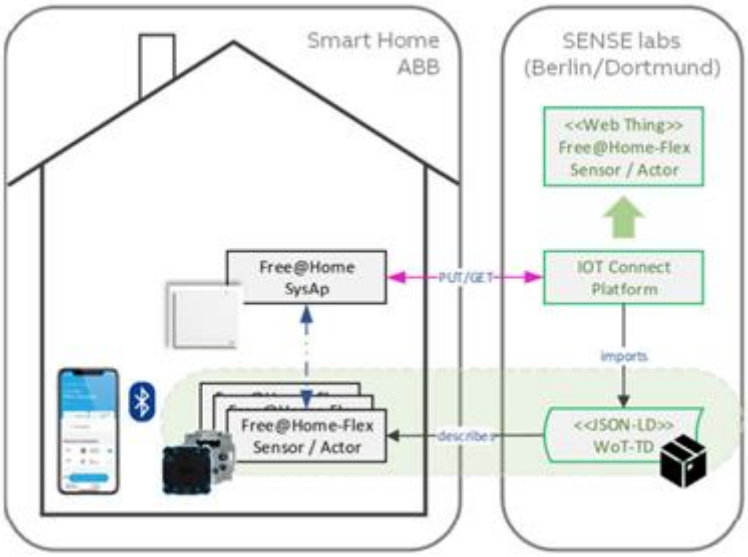

Abbildung 15 ABB SENSE Demonstrator

Use Case: SENSE WoT-TD als Ansatz zur interoperablen Gerätebeschreibung

Hierbei wurde das Potential von SENSE WoT als Beschreibungssprache für ABB Smart Home Geräte evaluier, die über das ABB Free@Home Gateway. Eine potenzielle Anwendung stellt hier die Weitergabe von interoperablen Gerätezustandsdaten dar, zur weiteren Verwendung in nachgelagerten Services und die verbundene Unterstützung der herstellerübergreifenden Demonstration in den SENSE Laboren.

In Kooperation mit ABB und dem SENSE Projektteam wurden SENSE WoT–TDs für das ABB Free@Home Gateway erstellt, um Erfahrung mit der Modellierung von semantischen Beschreibungen auf Basis der WoT-TD zu sammeln. Anschliessend erfolgte eine prototypische Implementierung der Free@Home/SENSE-WoT-Schnittstelle und die Integration in die SENSE Labortestumgebung (Anbindung an den IKT-Do Smart Building Server im Semantic Lab in Dortmund und der IoT connctd Cloud in Berlin). Die Demo wurde erfolgreich im Rahmen der SENSE Abschlussveranstaltung präsentiert.

Miele: Mit dem assoziierten Projektpartner Miele wurden weitergehende Konzepte für die Nutzung von SENSE WoT in der Miele Service Cloud erarbeitet und die Durchführung eines ersten Proof of Concepts. Der Miele HTTP Service implementiert dynamische Datenstrukturen, daher ist eine SENSE WoT Integration komplexer (SENSE WoT folgt den REST Paradigmen). Hier sind über die Projektlaufzeit weitergehende Konzepte für die Nutzung von SENSE WoT für derartige dynamische Datenmodellstrukturen erforderlich.

Fachverband Licht des ZVEI: Mit dem Fachverband Licht des ZVEI wurden die Möglichkeiten zur semantischen Beschreibung (SENSE-WoT) für professionelle Beleuchtungssysteme im Sinne des „human centric lighting“ und dessen Anforderungen im Rahmen von Sitzungen des Gremiums vorgestellt und diskutiert. Daraus entstand das gemeinsame Forschungsprojekt IoL[22], in dem u.a. das SENSE WoT Modell weitergehend in dieser Dömäne evaluiert wird.

4.10 Testwohnungen

Im Projektverlauf und in Kombination mit den Projekten SUITE und ForeSight hat sich die Notwendigkeit ergeben, drei Testwohnungen von DFKI-Mitarbeitern mit Smart-Home-Sensorik

[22] Internet of Light (IoL): https://www.fh-dortmund.de/projekte/internet-of-light.php

auszustatten. In allen Fällen wurde eine Basisstation von hom.ee eingesetzt, die Sensoren aus den Protokollfamilien Zigbee, z-Wave und ENOCEAN sowie Wifi-Geräte übersetzen und über ein Web-Interface an einen externen Service senden kann. Verbaut wurden eine Netatmo, Multisensoren für Bewegung, Temperatur, Feuchtigkeit, Helligkeit etc., Tür- und Fensterkontakte sowie ein dormakaba-Schließsystem. Die immer noch laufende Datenerfassung und deren Beschreibung erfolgt durchgängig unter Verwendung von SENSE WoT und ist eine wertvolle Grundlage für weiterführende KI-Methoden.

4.11 SENSE-Demonstratoren

Zum Projektende und auch aus aktueller Lage begründet, wurde der SENSE-Demonstrator als Use Case zum Thema **Raumluftanalyse** umgesetzt (Abbildung 16). IoT CONNCTD hat dazu ein eigenes IoT-Device auf Basis eines ESP entworfen, der flexibel als Anzeigeinstrument mit/ohne unterschiedliche Sensoren gebaut wurde. In der Referenzinstallation wurden Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit, CO_2, Partikel unterschiedlicher Größen gemessen, daraus virtuelle Sensoren (Taupunkt) rechnerisch abgeleitet und als Things verfügbar gemacht nach den Prinzipien von SENSE-WoT. Die Ergebnisse wurden unter https://connctd.com/airquality veröffentlicht und nach dem Projekt direkt zur Anschlussverwertung herangezogen.

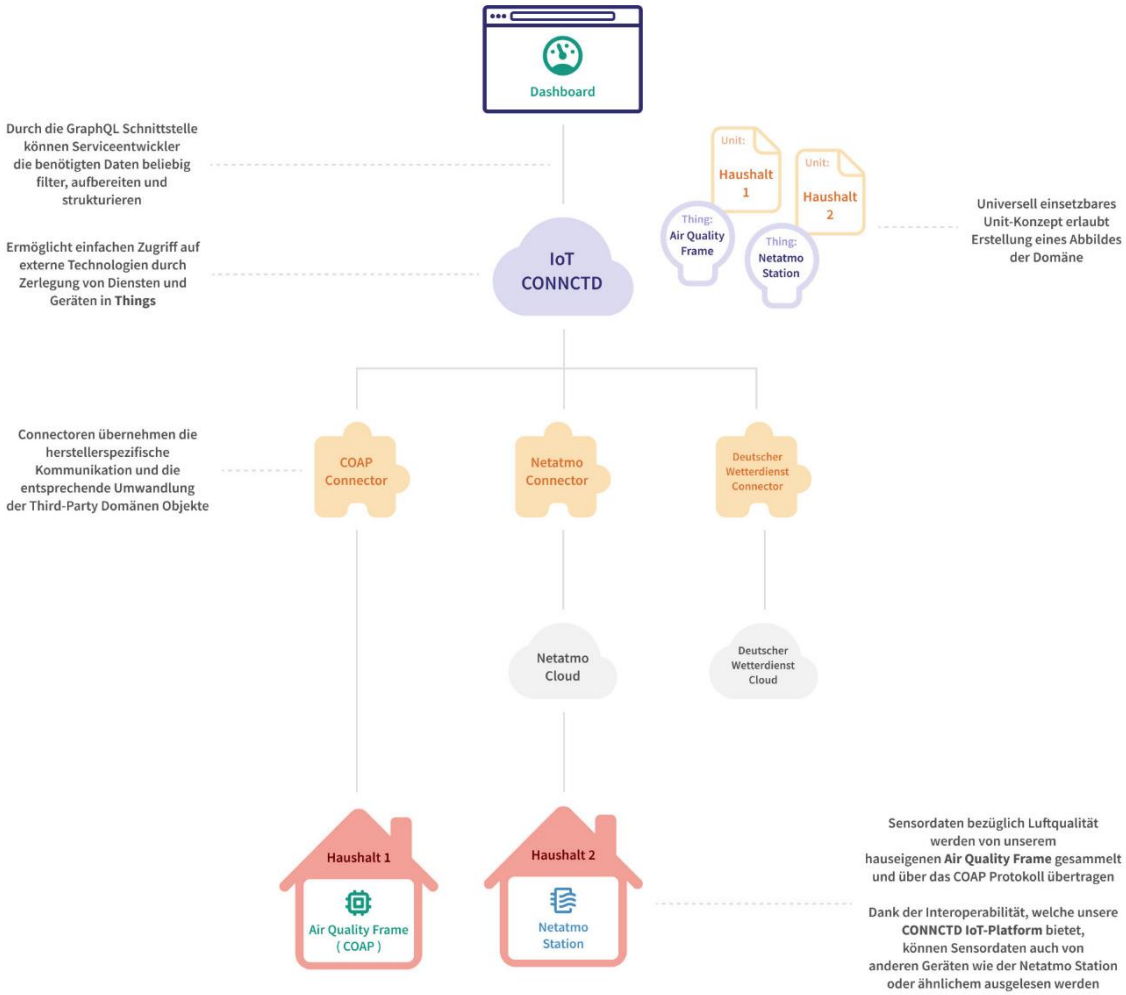

Abbildung 16 Prinzip der Raumluftanalyse

Das Projekt zeigt, dass der Service verschiedene Messquellen über die CONNCTD IoT-Plattform und die Thing-Descriptions heranzuziehen kann, um Datenmonitoring, Analysen und Prognosen durchzuführen und auch das dynamische Steuern von Geräten zu implantieren.

Das IKT-Do hat den **Cyber-physical-Plattform Demonstrator** im Semantic Lab in Dortmund, auf Basis der SENSE WoT Konzepte, weiterentwickelt mit dem Fokus auf dem Digitalen Zwilling - Zustandssystem. Um den Vorgaben der neuen WoT TD Spezifikation23 und den zu evaluierenden Ontologien zu erfüllen, ist ein SENSE *WoT Framework* entwickelt worden. Auf Basis dieses Frameworks erfolgten weitere prototypische Umsetzungen der SENSE *WoT TD* konformen Schnittstelle und des *Digital Twin* in der IKT-Do *Microservice*-Umgebung. Dieses umfasst folgende Applikationen:

1. *Device Data* zu *WoT Konverter*
2. *RDF-Triplestore* als Speicher des *Digital Twin*
3. *WoT-TD* Webservice

BOT[24] (Building Topology Ontology) Webservice: Neben der prototypischen Weiterentwicklung der Systemkomponenten[25] 1-3 wurde, in einer zweiten Entwicklungsiteration ein Konzept für die Nutzung des *BOT* Modells - für die Verortung von Things innerhalb einer Location – erstellt und in einer ersten Version prototypisch entwickelt. Im Rahmen des Demonstrators wurde auf Basis des *BOT Modells* eine einfache Wohneinheit inkl. *WoT TDs* beschrieben. Die BOT Elemente werden als *RDF-Triples* in einen *Eclipse rdf4j Triplestore*[26] abgelegt. Dieser *Triplestore* (Abbildung 17) befindet sich in der *Microservice*-Umgebung in einem eigenen *Docker-Container* und kann über das *BOT-REST-API* adressiert werden. Zur logischen Trennung verschiedener Datensätze können unterschiedliche *Repositories* für den *Triplestore* erstellt werden. Diese werden über einen eindeutigen *Identifier* adressiert. Die Anbindung an den *Triplestore* wird durch das *prototypisch implementierte BOT-Framework* und der *RDFBeans-Library* realisiert. Der sogenannte *RDFBeanManager* baut eine *RepositoryConnection* auf und stellt ein *CRUD-Interface (**C**reate **R**ead **U**pdate **D**elete)* zur Verfügung. Der *Triplestore* enthält nach der erfolgreichen Konvertierung der WoT TDs und der konfigurierten *BOT Descriptions* alle Daten des *Digital Twin* als *RDF Triples*[27][28]*.* Der Datensatz umfasst die *WoT TD* Gerätebeschreibungen, die *Location-View (BOT)* und einen *Hardware-View*. Sollen gezielt bestimmte Information aus dem *Triplestore* abgefragt werden, kann das von *rdf4j* bereitgestellte *SPARQL* Interface verwendet werden. Die Daten können so jederzeit in standardisierter und maschinenlesbarer Form abgerufen und weiterverarbeitet werden. Eine mögliche Weiterverarbeitung ist beispielsweise die Verwendung in einem höherwertigen Service.

In weiteren iterative Entwicklungsschritten wurde ein *SENSE WoT Template Server* als Microservice (Abbildung 17) (Digital Twin) für die Erstellung von Thing Descriptions (Baukastenprinzip) auf Basis des IoT-Schemas implementiert. Der WoT Template Server ist in das SENSE-WoT-Konfigurations-UI (connctd) und dem darin enthaltenen SENSE-WoT-Wizard (DFKI) integriert.

[23] W3C, „Web of Things (WoT) Thing Description“, 9 April 2020. [Online]. Available: https://www.w3.org/TR/wot-thing-description/. [Zugriff am 08 03 2022].
[24] Building Topology Ontology - https://w3c-lbd-cg.github.io/bot/
[25] IKT-Do SENSE Zwischenbericht 2019 (detaillierte Beschreibung der Komponenten)
[26] Eclipse rdf4j - https://rdf4j.eclipse.org/
[27] Eclipse-Foundation, „Eclipse rdf4j, Scalable RDF for Java,“ [Online]. Available: https://rdf4j.org/. [Zugriff am 08 03 2022].
[28] RDFBeans, „RDFBeans, Object-RDF mapping framework for Java,“ [Online]. Available: https://rdfbeans.github.io/. [Zugriff am 25 09 2019].

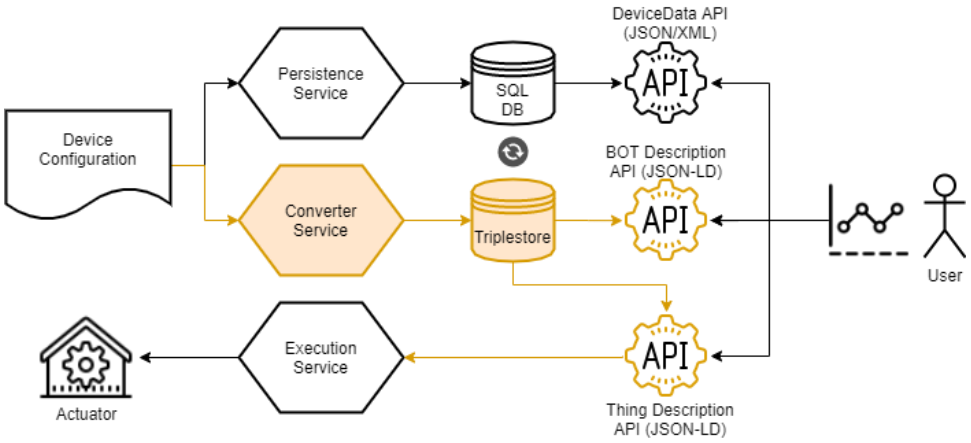

Abbildung 17 Konzeptübersicht CPS (Microservices)[29]

4.12 Semantic Building Labor

Zentrales Element von SENSE war das sogenannte Semantic Building Labor (auch als SENSE Lab bezeichnet) in Berlin. Für das Labor wurden zu Projektbeginn die folgenden Aufgaben und Eigenschaften definiert:

1. Es handelt sich um eine durch das Konsortium technisch und organisatorisch betreute, vorwettbewerbliche Arbeits- und Erprobungsumgebung.
2. Das Labor-Konzept umfasst ein völlig neues Zusammenarbeitsformat, in dessen Zentrum eine enge Kooperation zwischen dem Konsortium und assoziierten Unternehmen steht.
3. Das Labor ist ein neutraler Ort zum gemeinsamen Testen komplexerer exemplarischer Use Cases und gewerkeübergreifender, datenbasierter Services mit verschiedenen Hard- und Software-Konstellationen.
4. Darüber hinaus dient das Labor als Meeting-Ort und als Basis für das zukünftige Community Building rund um das Thema Smart Living.
5. Im Mittelpunkt der Laborarbeiten stehen vier gesellschaftlich hochrelevante Themenbereiche: 1) Assistenz, 2) Energiemanagement, 3) Komfort und 4) Sicherheit.

Für assoziierte Partner handelte es sich bei dem Lab um ein grundsätzlich sehr attraktives Angebot, da eine Mitarbeit im Lab niederschwellig möglich war und umfangreichen Mehrwerten vergleichsweise geringe Aufwände entgegenstanden:

Mehrwerte für Unternehmen	**Aufwände für Unternehmen**
✓ Mitbenutzung des Semantic Building Lab inkl. aller Laboreinrichtungen ✓ Personelle Betreuung durch Technologie- und Service-Experten sowie renommierte Forschungseinrichtungen ✓ Gewinnung von Basiswissen für die eigene Entwicklung innovativer Produkte und Dienste rund um das vernetzte Gebäude ✓ Direkter Wissenstransfer durch neues Zusammenarbeitsformat	○ Aktive Mitarbeit im Semantic Building Lab und in den relevanten Workshops ○ Bereitstellung von Personal (z.B. Experten, Entwickler) ○ Einbringung bzw. Bereitstellung von Produkten, Diensten, Software-Komponenten, dokumentierten Schnittstellen usw. ○ Mitwirkung an den Anforderungen für mindestens ein Anwendungsszenario

[29] Kernkomponenten: Converter-Service, Triplestore und WoT TD / BOT Webservice

✓ Projektteilnahme auch ohne gewerkeübergreifende Systemkenntnisse möglich	

Tabelle 2 Mehrwerte und Aufwand für Unternehmen im Semantic Building Lab.

Standort und Ausstattung: Das Semantic Building Labor befindet sich aktuell in einem Co-Working-Space in der Schwedenstraße in Berlin. Auf ca. 65 m^2 Laborfläche (Abbildung 18) stehen dort für die Projektarbeit u.a. folgende Ausstattungen zur Verfügung:

- Vier flexible Labortische, die einzeln als „Inseln“ verwendet oder bei Bedarf zu übergreifenden Installationen zusammengefügt werden können,
- IT-Ausstattung wie Laptops und Tablets,
- IoT-Demonstrator-Tisch „Semantische Interoperabilität“,
- Modulare Demo- und Präsentationswand mit Komponenten aus dem Smart-Home-Bereich,
- Webcam, Monitore,
- diverse Werkzeuge, Netzteile und Elektroinstallationsmaterial und
- diverse Büroausstattung.

Neben der eigentlichen Laborumgebung stehen vor Ort zudem (geteilte) Meeting-Räume und eine Community Area zur Verfügung. Der technische Betrieb des Labs erfolgt durch den Partner IoT connctd und in Zusammenarbeit mit dem Partner FE/ZVEI, der insbesondere für die Förderung des übergreifenden Wissenstransfers rund um das Lab verantwortlich zeichnet.

Abbildung 18 Gestaltung und Ausstattung des Semantic Building Lab, Demo-Wand, Demo-Tisch.

Die offizielle Eröffnung des Labors fand am 27.06.2019 mit mehr als 70 Teilnehmenden statt, die bereits an diesem Tag erste Demonstrationen sehen konnten (Abbildung 19).

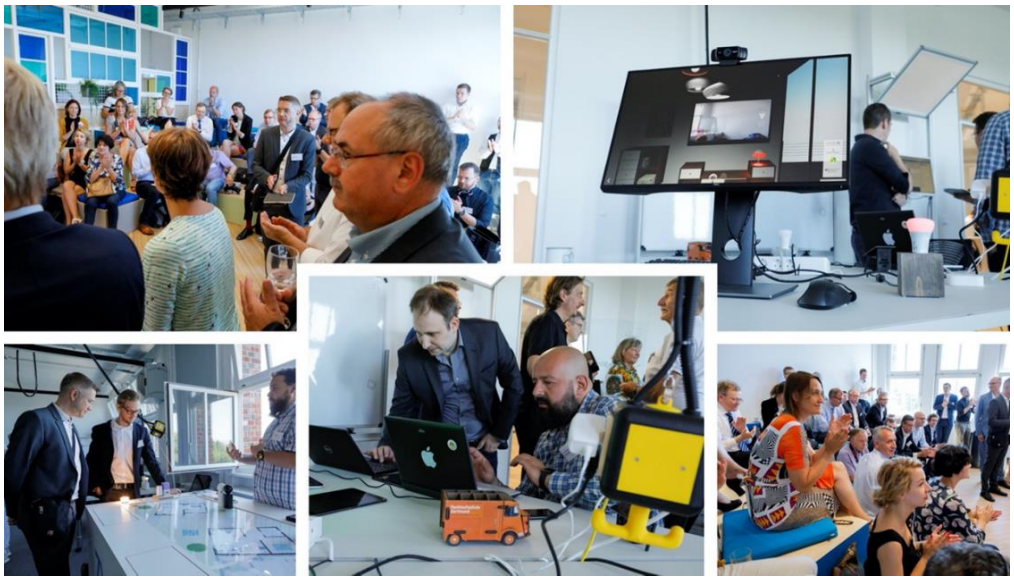

Abbildung 19 Eröffnung des Semantic Building Labors am 27.06.2019.

Labor-Betrieb, Umgang mit Corona-Pandemie: Nach einer ersten erfolgreichen Betriebsphase des Labs standen die weiteren Arbeiten ab Frühjahr 2020 unter dem Eindruck der beginnenden Corona-Pandemie, die das ursprünglich geplante Zusammenwirken vor Ort wesentlich einschränkte. Das Labor wurde allerdings auch während der Pandemie ausgebaut und durchgängig betrieben. Zur Bewältigung der Auswirkungen der Pandemie wurden zusätzliche Maßnahmen ergriffen, um das Labor zu „virtualisieren“ und für die Remote-Nutzung vorzubereiten. Im Ergebnis sind der Standort und alle dort verfügbaren IoT-Geräte für Dritte remote bzw. virtuell nutzbar. Sie können von den Projektpartnern z.B. gesteuert und per Sensoren überwacht werden. Als Hilfe wurden Kameras aufgestellt, um die Geräte-Demowand und den „connctd playground“ zusätzlich visuell überprüfen zu können. Die Nutzung des Labs über die IoT-Plattform von IoT connctd und über digital unterstützte Zugriffe auf die vor Ort aufgebauten Geräte hat im Projektablauf auch dazu beitragen, dass Unternehmen am Projekt beteiligt werden konnten, die bei Fokussierung auf eine Arbeit vor Ort nicht bereit gewesen wären, diesen Organisationsaufwand auf sich zu nehmen, z.B. das Startup Citynode aus Kiel. Ab Mitte des Projekts wurde die Verknüpfung des Projekts mit dem KI-Leuchtturmprojekt ForeSight etabliert, das zu Projektbeginn noch nicht bekannt bzw. geplant war. Die Interaktionen zwischen der CONNCTD IoT-Plattform und der ForeSight-Plattform mittels SENSE-WoT wurden ergänzend berücksichtigt und etabliert. In branchen- und segmentspezifischen Tests von Services und der Entwicklung von Tech-Konnektoren wurden die Arbeiten zu Basis-Services und vor allem zu Konnektoren umgesetzt und den Projektpartnern im Labor zur Verfügung gestellt. Die Umsetzung von Technologie-Konnektoren zur Anbindung herstellerspezifischer Geräte erfolgte teilweise in Zusammenarbeit mit den Herstellern, weil deren Domänenwissen zur Abbildung der semantischen Informationen notwendig war.

Kommunikation zum Labor: Die Aktivitäten rund um das Semantic Building Labor wurden vom Partner FE/ZVEI kommunikativ kontinuierlich begleitet. Genutzt wurden u.a. reichweitenstarke Kanäle wie Website-Artikel, Presseinformationen sowie Beiträge auf Social-Media-Plattformen und im ZVEI-Jahresrückblick „Spotlights“.

Abbildung 20 Kanalübergreifende Berichterstattung über SENSE und das Semantic Building Labor

Darüber hinaus widmete sich eine Folge des ZVEI-YouTube-Kanals „Watts On – Themen, die elektrifizieren“ den Themen Smart Home und Smart Living, wobei insbesondere auch über das SENSE-Projekt sowie über das Semantic Building Labor berichtet wurde.[30] Das Konsortium lieferte für die Produktion des Videos, das bislang mehr als 37.000 Aufrufe (Stand 02/2022) verzeichnen konnte, wesentlichen Input.

Abbildung 21 Video für den ZVEI-YouTube-Kanal „Watts On“.

Existierende Ansätze für Organisationsformen: Teil der Projektarbeiten in SENSE war eine Bestandsaufnahme zu bereits existierenden Laborkonzepten (auch aus anderen Domänen) und deren Organisationsformen. Diese Labore wurden entsprechend ihrer jeweiligen Charakteristika bzw. Vor- und Nachteile betrachtet und eingeordnet, um damit zusätzlichen Input für die weitere Ausgestaltung des Semantic Building Lab zu gewinnen. Eine kompakte Übersicht zu ausgewählten betrachteten Laboren findet sich in Tabelle 3**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**.

Die Recherche bestätigte grundsätzlich die zu Projektbeginn identifizierte Ausgangssituation, dass bereits existierende Labore im Bereich Smart Home / Building / Living alles in allem weiterhin entweder hersteller-, herstellergruppen- bzw. systemgebunden sind, gänzlich oder sehr überwiegend für die akademische Forschung ausgelegt und organisatorisch dann entsprechend im Hochschulbereich

[30] Das Video ist abrufbar unter: https://youtu.be/Vwremn-QTgs.

verortet sind oder – trotz einiger Elemente wie Projektaktivitäten und Events – überwiegend Showroom-Charakter haben.

Labor und Standort	Themenbereich	Akademische Forschung & Lehre	Vorwettb. Gemeinschaftsforschung	Technische Erprobungen	Geschäftsmodelle / Marktanalysen	Vernetzung / Community	Wissens- & Technologietransfer
Ambient Assisted Living Testbed, Berlin	Smart Living	●	●	●			
Connected Living Showrooms, diverse	Smart Living		●	●	●	●	●
Smart Living Labor, Wien	Smart Living	●		●			
Labor für Smart home / Smart building, Dortmund	Smart Living	●	●	●			
Living Lab, Nürnberg	Smart Living	●	●	●			
Living Lab, Darmstadt	Smart Living	●	●	●			
Zentrum Industrie 4.0, Potsdam	Industrie 4.0	●	●	●			●
KI-Reallabor, Lemgo	Industrie 4.0	●	●	●	●		●
Smart Electronic Factory, Limburg	Industrie 4.0	●		●		●	●
Labs Network Industrie 4.0, diverse	Industrie 4.0			●	●	●	●
Lufthansa Digital Lab, Norderstedt	Industrie 4.0				●		
FESTO Mobiles Trainingslabor, diverse	Diverse	●		●			
High Competence Network e.V., Wismar	Umwelt, Logistik, ICT, Sensorik		●	●	●	●	●

Tabelle 3 Übersicht ausgewählter betrachteter Laborformen und -konzepte.

Außerhalb der Domäne Smart Living spielen beispielsweise im Bereich Industrie 4.0 Themen rund um Interoperabilitätskonzepte und neue digitale Geschäftsmodelle eine ähnlich herausgehobene Rolle. Deshalb wurden auch hier einige bereits existierende Labore exemplarisch betrachtet. Es finden sich diverse Parallelen zum Bereich Smart Living. Zahlreiche Labore sind an Hochschulen bzw. Forschungsinstitute angedockt und dienen nahezu ausschließlich Forschungszwecken. Darüber hinaus gibt es von einzelnen Unternehmen betriebene Labore, die z.B. Startups für probeweise Kollaborationen einladen, dabei aber stets exklusiv auf das eigene Geschäftsmodell abzielen und dementsprechend keinen offenen Community-Charakter verfolgen. Einzelne Standorte haben zudem explizit bzw. gewollt eine ausschließlich regionale Reichweite und Wirkung.

Die Recherche hat insgesamt ergeben, dass es keinen neutralen und herstellerunabhängigen Ort gibt, der die wesentlichen Bausteine für eine effektive, reichweiten- und transferstarke vorwettbewerbliche Zusammenarbeit unter einem Dach vereint – darunter insbesondere das risikolose Testen und die Evaluation von exemplarischen Anwendungsszenarien für neueste Smart-Living-Technologien, eine offene Umgebung sowohl für technische Workshops als auch Vernetzungs-, Fachgruppen- und

Gremien-Meetings sowie einen Ort, der durch seine Betreuung und Organisation als Anlaufstelle bzw. Ausgangspunkt für eine vielfältige Community wahrgenommen wird, die leistungsfähig genug ist, um technische und organisatorische Herausforderungen von übergeordneter Branchenbedeutung gemeinsam zu bewältigen.

Ansätze zur Verstetigung des Labs: Die Arbeiten an möglichen Verstetigungs- bzw. Betriebskonzepten für das Semantic Building Labor, die ursprünglich zum Projektende abgeschlossen sein sollten, haben sich außerplanmäßig verzögert. Hauptgrund war die aufgrund der pandemischen Lage zeitweilig sehr eingeschränkte physische Nutzung des Labs und damit einhergehend ein gewisser Mangel an Vor-Ort-Aktivitäten, auf deren Grundlage Erfahrungen mit bzw. Feedback von Unternehmen zum Zusammenarbeitsmodell rund um das Lab gesammelt werden sollten. Zwar gab es diverse erfolgreiche Zusammenarbeitsaktivitäten mit Unternehmen im Lab vor Ort und im Rahmen virtueller Formate. Der ursprüngliche Plan, über einen Zeitraum von ca. zwei- bis zweieinhalb Jahren ein robustes Stimmungsbild zu besonders wahrgenommenen Mehrwerten und Akzeptanz des Labs zu entwerfen, musste pandemiebedingt jedoch angepasst werden.

Nichtsdestotrotz konnten unter der Bezeichnung „ENTRY“ zwischenzeitlich wesentliche Teile eines Verstetigungskonzepts entworfen werden, das neben einer potenziellen Governance-Struktur, Nutzungsszenarien, Transferangeboten und Vernetzungsmöglichkeiten mit weiteren Projekten und Initiativen u.a. auch die übergreifende Ausweitung des Themenkontexts (z.B. in Richtung Energie, Mobilität) betrachtet. Das Konzept soll 2022 – insbesondere auch unter Einbeziehung aktueller Entwicklungen und Anforderungen rund um das Projekt ForeSight und dessen Community, rund um Gaia-X usw. sowie in enger Abstimmung mit der ZVEI-Plattform Gebäude – aktualisiert und angepasst werden. Damit soll den derzeitigen bzw. zwischenzeitlich ggf. veränderten Bedarfen der Unternehmen und der sonstigen relevanten Akteure und Stakeholder noch mehr Rechnung getragen werden.

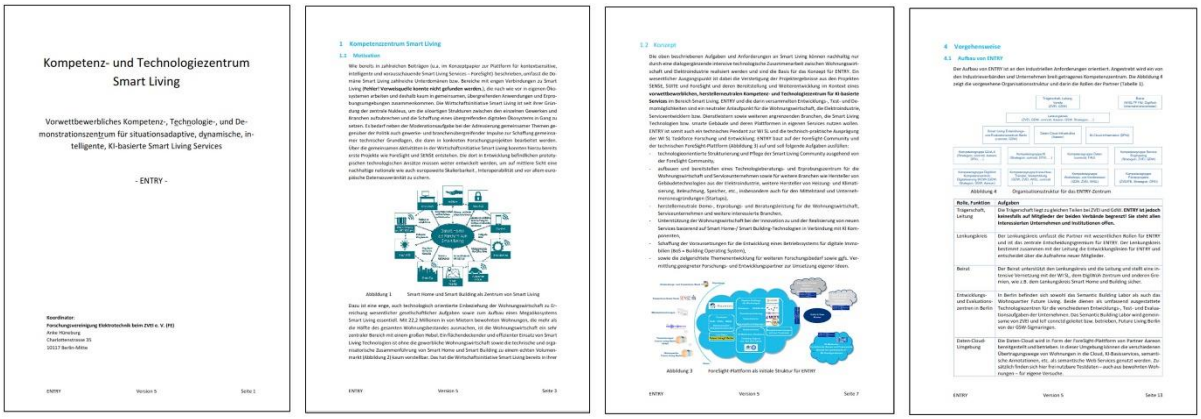

Abbildung 22 Auszüge aus dem Verstetigungskonzept „ENTRY“.

Vorläufiges Resümee: Die bisher gesammelten Erfahrungswerte mit dem Semantic Building Labor im Zeitraum 2019 bis 2021 lassen sich aus Sicht des Konsortiums wie folgt zusammenfassen:

↑	Labor als Umgebung für Demo-Workshops, Trainings usw.	Das Labor in seiner Rolle als qualitativ hochwertige, interaktive, technologiefokussierte Umgebung für fachspezifische Workshops, Trainings usw. (gerichtet an Unternehmen aller Größenklassen, insb. KMU) hat sehr gut funktioniert und wurde bis zum Beginn der Pandemie von den Partnerunternehmen sehr gut angenommen.

	Labor als Meeting- und Ankerpunkt für die deutsche Smart-Living-Community	Das Labor als Meeting- und Ankerpunkt für die deutsche Smart-Living-Community hat bis zum Beginn der Pandemie ebenso gut funktioniert. Trotz der inzwischen umfangreichen virtuellen Vernetzungsmöglichkeiten darf die Bedeutung eines physischen Treffpunkts für die Community nicht unterschätzt werden. Dieser Ansatz sollte auch nach Projektende weiterverfolgt werden.
	Labor als Test- und Erprobungsumgebung für weitere Forschungsprojekte	Das Lab konnte bereits in das KI-Plattformprojekt ForeSight eingebracht werden und ist dort Bestandteil der ersten Stufe des insgesamt dreistufigen Erprobungsmechanismus (1. Laborumgebungen für risikofreies Testen, 2. Testwohnungen mit eingeschränkten Echtdaten, 3. bewohnte Wohnungen mit Echtdaten). Zudem wurde es bei der Planung weiterer Projekte berücksichtigt, z.B. beim Gaia-X-Antrag „Smart Power Space“, bei dem alle SENSE-Konsortialpartner beteiligt waren. Grundsätzlich stellt ein Lab wie das SENSE Lab für Forschungsprojekte sowohl wegen des technischen Angebots als auch wegen der Community-Relevanz einen attraktiven Mehrwert dar.
	Labor als Leuchtturm-Element rund um zentrale Zukunftsthemen wie digitale Ökosysteme / Gaia-X, Energieeffizienz, Assistenz, Sicherheit usw.	Auch nach Projektende wird grundsätzlich ein Bedarf für Aktivitäten und Konzepte rund um ein entsprechendes Labor gesehen, denn die gesellschaftlichen Bedarfe und Anforderungen etwa im Bereich der Energieeffizienz, der Betreuung einer zunehmend älter werdenden Bevölkerung oder dem Betrieb mehr oder weniger hoch automatisierter Gebäude stellt die Gebäudebetreiber zukünftig vor große Herausforderungen. Das herstellerneutrale und vorwettbewerbliche Labor kann darüber hinaus zum Leuchtturm für Gaia-X-basierte Gebäude-Data-Spaces werden und perspektivisch anschaulich den Weg hin zu (teil-) autonomen Gebäuden aufzeigen.
	Labor als Entwicklungsumgebung für externe Unternehmen	Das Labor in seiner Rolle als vorwettbewerbliche Entwicklungsumgebung für externe Unternehmen hat bislang nicht funktioniert, obwohl es auch dafür eine gewisse Basisausstattung hat. Der Hauptgrund dafür ist aus Sicht des Konsortiums, dass die Unternehmen die für diesen Zweck notwendige Bereitstellung von Personal nicht ermöglichen konnten. Zu groß sind die Engpässe durch fehlendes Fachpersonal. Es ist nicht absehbar, dass sich an dieser Situation mittelfristig etwas ändern wird. Die Berücksichtigung bzw. das Gewicht der Funktion einer Entwicklungsumgebung wäre bei einer Fortsetzung der Lab-Aktivitäten deshalb kritisch zu prüfen.

	Labor als Showroom	Es besteht u.a. aufgrund diverser bereits existierender Angebote und insbesondere auch beschränkter Mehrwerte kein Bedarf, das Lab als mehr oder weniger reinen bzw. auch nur teilweisen „Showroom“ für Smart-Living-Technologien zu betreiben.

Tabelle 4 Vorläufiges Resümee zum Semantic Building Labor.

Es gilt nun, die gut funktionierenden und akzeptierten Aufgaben und Konzepte rund um das Labor aufzugreifen und für eine Fortsetzung insbesondere nach Überwindung der pandemischen Ausnahmephase weiterzuentwickeln.

5 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

5.1 Wissenschaftlicher Nutzen und Verwertung

Zum Ende der Projektlaufzeit von SENSE ist Gaia-X und das Konzept semantisch beschriebener Datenräume bzw. Datenökosysteme in verschiedensten Domänen breit aufgestellt worden. Die Gaia-X-Technologien sind bezogen auf die Semantik zu weiten Teilen identisch, so dass eine unmittelbare Integration von SENSE WoT Things in einem Gaia-X Data Space möglich ist. Dies ergibt potenziell sehr große Verwertungs- und Anschlussmöglichkeiten, denn Gaia-X definiert lediglich eine Semantik für die Beschreibung von Cloud- Ressourcen, nicht jedoch deren (Daten-) Inhalte. SENSE WoT hingegen ist ein domänenspezifischer semantischer Standard für die Beschreibung der Inhalte eines Gaia-X Smart Living Data Space! Somit wird die Anschlussfähigkeit der entwickelten Konzepte aus SENSE als äußerst hoch eingeschätzt. Entsprechende Gaia-X-Leuchtturmprojekte mit Smart-Living-Bezug werden von den Konsortialpartnern aus SENSE angestrebt und aktiv vorbereitet.

5.2 Wirtschaftlicher Nutzen und Verwertung

Im Projektverlauf wurde die Tauglichkeit des gewählten Lösungsansatzes eindrücklich bewiesen. Plattformbasierte Entwicklungen von Services haben einen deutlichen Vorteil gegenüber vertikalen Silos, insbesondere dann, wenn verschiedene Gewerke interagieren sollen oder Services auf immer wieder unterschiedliche Installationsumgebungen treffen und trotzdem skalierbar betrieben werden sollen. Die Referenzanwendungen haben das deutlich gezeigt. Dateninteroperabilität mittels semantischer IoT-Middleware hat einen klaren Fokus. Sie bietet Nutzen und Mehrwert für Hersteller und Service-Entwickler gleichermaßen. Die wesentlichen Vorteile der unabhängig betriebenen semantischen IoT-Middleware lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Schaffung eines Neutralitätspunkts zwischen Herstellern, Service-Providern und Kunden, so dass eine Flexibilität und auch eine Unabhängigkeit der Kunden gegenüber Anbietern erreicht wird.

- Entkopplung von Hardware und Service. Hardware – eine wesentliche Kernkompetenz deutscher Hersteller – bleibt ein relevanter und entscheidender Faktor im Internet der Dinge, aber die Dinge werden den Services verständlich aufbereitet zur Verfügung gestellt. Hersteller mit innovativen Produkten bleiben relevante Marktteilnehmer. Neu ist indes die Chance, auf digitalen Marktplätzen die Verfügbarkeit von installierten Systemen für Serviceentwickler nutzbar zu machen und damit zusätzliche Wertschöpfung generieren zu können.

- Erhöhung der Entwicklungsgeschwindigkeit der Services durch gut dokumentierte und vereinheitlichte Schnittstellen, sodass noch schnellere Umsetzungen von Kundenanforderungen sowie in skalierbaren Szenarien möglich werden.

- Effizienz im Betrieb durch klare Fokussierung im Vergleich zu Hersteller-eigenen IoT-Plattformen.

- Integrationsfähigkeit der interoperablen und offenen semantischen IoT-Plattform

Diese Mehrwerte können allerdings erst dann eine wirtschaftlich besonders große Wirkung entfalten, wenn die Marktteilnehmer ihre Angebote und Kooperationen weiterentwickeln und insbesondere auch geeignete digitale Ökosysteme entstehen, in denen die Marktteilnehmer aktiv partizipieren und multilateral Daten teilen. Erst dadurch können neue digitale oder hybride Angebote mit hoher Wertschöpfung tatsächlich auch skalierbar vermarktet werden. In der Verwertungsperspektive bedeutet dies, dass Hersteller mit mehreren Produktlinien die Projektergebnisse für den vereinheitlichten Betrieb nutzen können. Smart-Home-Systeme werden interoperabel, können in Smart-Building-Systeme eingebunden werden und gleichzeitig Bestandteile von Smart-City-Szenarien werden. Die parallele Nutzung für unterschiedliche Anwendungsbereiche (Home Automation, Security, Health, Energy, Entertainment, Mobility, Logistik) ist einer der nächsten großen Schritte.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten und die erreichten Ergebnisse haben auf verschiedenen Ebenen wesentliche Impulse für

- den Aufbau einer Smart Living Community,
- die generelle Einschätzung/Wertschätzung von Interoperabilität,
- die Konzeptentwicklung von Gebäude als interoperabler, semantischer Service,
- die Neudefinition bzw. Erweiterung des Begriffs Smart Living,
- sowie die Erweiterung der Smart-Home-Anwendungen von reinen Komfort- und Sicherheitsanwendungen hin zu intelligenten Gebäuden als Assistenzumgebungen und Gebäuden als intelligente Teilnehmer von Energienetzen

gesetzt. Die Projekteergebnisse, die Neuinterpretation von Interoperabilität und die erreichte Sichtbarkeit des Themas Interoperabilität sowie die gelegten Grundlagen für einen breiten KI-Einsatz im Bereich Smart Living sind aus Sicht des Konsortiums wesentliche Impulse für zukünftige Entwicklungen. SENSE war Ideengeber für die Schwesterprojekte „SUITE“ und die KI-Plattform „ForeSight“ sowie für die Arbeitsgruppe Smart Living in Gaia-X. Ebenso haben die Ergebnisse aus SENSE die Wirtschaftsinitiative Smart Living und hier vor allem die Taskforce Forschung und Entwicklung, bereichert. Die assoziierten Partner haben umfassende Einblicke in semantische Technologien, Ontologien und damit mögliche, neue Anwendungsfelder erhalten und mindestens ansatzweise erproben können. Zusammen mit den Aktivtäten des ZVEI als großer Industrieverband wurden die Projektergebnisse sehr breit bekannt und verfügbar gemacht. Aus Sicht des Konsortiums wurden die aufgewendeten Fördermittel zielgerichtet und sehr effizient in sinnvolle Projektergebnisse investiert. Kein Einzelunternehmen hätte die geleisteten Arbeiten allein durchführen und in der Breite erproben und verbreiten können.

7 Fortschritte bei anderen Stellen

Gaia-X: Die für SENSE wichtigste externe Entwicklung ist die europäische Cloud- bzw. Standardisierungsinitiative Gaia-X. Gaia-X führt auf der Cloud-Ebene u.a. semantische Technologien u.a. für die semantische Beschreibung von Datenräumen, Zugriffsberechtigungen und den erwartbaren Inhalten eines Datenraumes ein. Ebenso soll eine Interoperabilität zwischen verschiedenen Datenräumen sichergestellt werden. Ein weiteres zentrales Element sind Kataloge, welche Daten und Datenräume leichter auffindbar machen. Die Kataloge sind technisch sehr ähnlich oder identisch mit der Registry aus SENSE bzw. ForeSight. Gaia-X gibt jedoch keine Antworten auf die Frage, wie Daten, Ressourcen und Funktionen innerhalb eines Datenraumes semantisch beschrieben werden können, welche Standardontologien verwendet und ob überhaupt semantische Beschreibungen eingesetzt werden. Aus heutiger Sicht (Gaia-X ist zum Abgabezeitpunkt dieses Schlussberichtes noch in der technischen Entwicklung) sind daher die Entwicklungen in SENSE für die

Domäne Smart Living eine sehr gute Ergänzung und ein Anknüpfungspunkt zwischen der Domäne Smart Living und Gaia-X. SENSE WoT kann zur Blaupause für die Domäne werden.

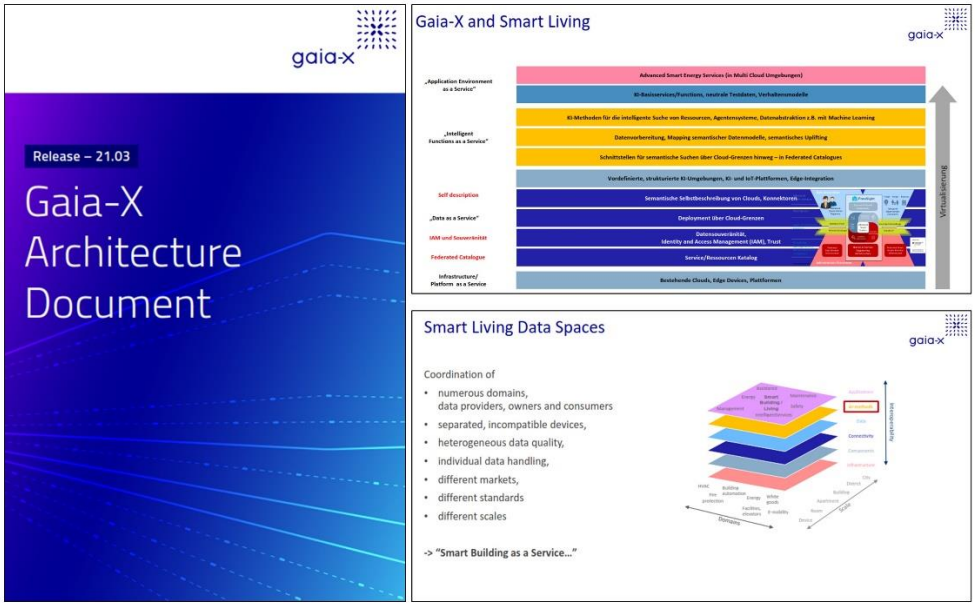

Abbildung 23 Gaia-X und die Domäne Smart Living

Matter: Wie oben beschrieben, ist Matter ein neuer Versuch auf vergleichsweise niedriger Protokollebene Interoperabilität zwischen Geräten unterschiedlicher Hersteller zu garantieren. Durch die in Matter organisierten Partner (vor allem die großen Hyperscaler) kann dieses Vorhaben gelingen. Auf SENSE und Gaia-X hat diese Entwicklung jedoch keinen Einfluss. Vielmehr vereinfacht Matter potenziell die Erstellung von Thing Descriptions und vereinfacht ggfs. die Umsetzung einer konkreten Schnittstelle.

Streaming-Plattform: Im Projektverlauf sind Streaming-Plattformen, z.B. Apache kafka[31], und Broker-artige Systeme aufgekommen, die in der Lage sind, viele IoT-Geräte aus unterschiedlichen Systemfamilien an einen Broker anzuschließen. Auch eine implizite Semantik kann an den Schnittstellen extrahiert werden. Wie bei praktisch allen Broker-Systemen erscheint die Skalierung ein Problem. Der Broker ist eine zentrale Instanz an der alles zusammenläuft. SENSE folgt dagegen dem Lonked Data Prinzip, welche genau das Gegenteil erreichen will – nämlich keine zentrale Instanz, sondern eine lose Sammlung eigenständiger und unabhängiger Dienste, die beliebig verbunden werden können. Auch wenn Broker für viele Anwendungen eine gute Wahl sind, ist Linked Data aus Sicht des Konsortiums und im Hinblick auf die Flexibilität und Skalierbarkeit die bessere Wahl. In vielen Anwendungsfällen haben jedoch beide Ansätze jeweils ihre Vorteile.

Interconnect: Im Verlauf des SENSE Projektes hat das W3 Konsortium die "Web of Things Architecture", die "Web of Things (WoT) Thing Description" und auch die „ThingDescription (TD) Ontology" als Standard/Draft verabschiedet. Diese Standards wurden im Rahmen des SENSE Projektes evaluiert und über den Standard hinaus weiterentwickelt. Zudem wurden weitere Spezifikationen im Umfeld der TDs entwickelt, die aber in der Projektlaufzeit von SENSE nicht mehr evaluiert werden konnten - aber nach ersten Untersuchungen vom SENSE Konsortium als sehr interessant eingestuft werden:

[31] https://kafka.apache.org

- Web of Things (WoT) Discovery[32]
- Thing Description (TD) Ontology[33]

Auch in anderen Gremien werden weiterführende Ontologien für Smart Home, Smart Building und Smart Grid entwickelt:

- KNX IoT Information Model (KNX Ontology)
- Matter[34] (Interoperabilität im Smart Home)
- SAREF[35] (Smart - Home, -Building Ontology mit zusätzlichem Fokus auf das Energiemanagement)

8 Veröffentlichungen

- Alberternst, S.; Anisimov, A.; Antakli, A.; Duppe, B.; Hoffmann, H.; Meiser, M.; Muaz, M.; Spieldenner, D.; Zinnikus, I. Orchestrating Heterogeneous Devices and AI Services as Virtual Sensors for Secure Cloud-Based IoT Applications. Sensors 2021, 21, 7509. https://doi.org/10.3390/s21227509
- Duppe, B.; Meiser, M.; Anisimov, A.; Antakli, A.; Muaz, M.; Zinnikus, I. Combining Machine Learning With Inductive Logic Learning To Detect Deviations From Daily Routines In Ambient Intelligent Environments. In IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI-IAT '21), 2021, Essendon, Australia. https://doi.org/10.1145/3486622.3493942
- S. Alberternst, et al., "From Things into Clouds - and back," in 2021 IEEE/ACM 21st International Symposium on Cluster, Cloud and Internet Computing (CCGrid), Melbourne, Australia, 2021 pp. 668-675. doi: 10.1109/CCGrid51090.2021.00080
- I. Kunold, H. Wöhrle, M. Kuller, N. Karaoglan, F. Kohlmorgen, J. Bauer, „Semantic Interoperability in Cyber-Physical Systems", The 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications 18-21 September, 2019, Metz, France
- Kunold, H. Wöhrle, M. Kuller, N. Karaoglan, F. Kohlmorgen, M. Niemeyer, „Conceptual design of a digital twin based on semantic web technologies in the smart home context", The 3th IEEE International Conference AND workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering, 18-19 November, 2020, Budapest, Hungary
- F. Schlenke, F. Kohlmorgen, J. Bauer, M. Kuller, N. Karaoglan and H. Wöhrle, "Towards activity recognition in smart homes using multimodal data," *2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, Budapest, Hungary, 2021, pp. 25-30.
  doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667878
  keywords: {Performance evaluation;Power engineering;Conferences;Smart homes;Machine learning;Activity recognition;Predictive models;IoT;Machine Learning;Human Activity Recognition;Edge Computing},
  URL: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9667878&isnumber=9667546

[32] https://www.w3.org/TR/wot-discovery/
[33] https://www.w3.org/2019/wot/td

[34] https://csa-iot.org/all-solutions/matter/
[35] https://saref.etsi.org/