



BIM-BASIERTES PLANUNGSTOOL ZUR DIGITALISIERUNG VON ENERGIEMONITORING-KONZEPTEN – BIM4EMK

Alexander Miehlisch, Nicolas Pauen, Jérôme Frisch, Christoph van Treeck

Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen E3D RWTH Aachen, Deutschland,

E-Mail: miehlisch@e3d.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Die Digitalisierung ist ein zentrales Umsetzungselement zur Erreichung der Ziele der Energiewende. Besonders im Bereich der Gebäudeautomation und des Energiemonitorings werden Planungsdaten wie Energieflussschemas, Monitoringsteckbriefe sowie Zählerkonzepte, gemäß VDI 6041 noch dokumentenbasiert erfasst, aufbereitet und ausgetauscht. Semantic Web Technologien (SWT) und Linked Data bieten die Möglichkeit diese Informationen maschinenlesbar abzubilden und über verschiedene Domänen hinweg zu verknüpfen. Hierzu sind jedoch entsprechende Methoden und Tools notwendig, welche eine effiziente Arbeit auf Basis der verlinkten Daten ermöglichen. In diesem Beitrag wird daher der erste Schritt zur praxisnahen Anwendbarkeit eines Tools zur Visualisierung von SWT-basierten Daten zu technischen Systemen vorgestellt und prototypisch implementiert. Das Tool wird anschließend anhand eines Anwendungsfalls im Bereich der Digitalisierung eines Monitoringkonzeptes auf reale Projektdaten angewendet.

Abstract

Digitization is a central implementation tool for achieving the goals of the energy transition. Especially in the field of building automation and energy monitoring, planning data such as energy flow diagrams, monitoring profiles as well as meter concepts in accordance to VDI 6041 are still designed, processed and exchanged on a document basis. Semantic Web Technologies (SWT) and Linked Data offer the possibility to represent this information in a machine-readable way and to link it across different domains. Nevertheless, this requires appropriate methods and tools that enable efficient work based on SWT. This paper presents a prototypically implemented tool for visualizing SWT-based data for practical manners. It is implemented for the use case of digitalizing monitoring concepts and is applied to real project data.

Einleitung

Über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks und dessen technische Anlagen sind eine Vielzahl an Akteuren mit unterschiedlichen Anforderungen beteiligt. Faktoren wie Kollaboration, genutzte Softwareanwendungen sowie verschiedene Informationsbedarfe und praktische Ziele führen zu einer hohen Komplexität. Für den Umgang mit dieser Komplexität müssen im Lebenszyklus große Datenmengen verarbeitet werden. Diese werden durch unterschiedliche Dateiformate und -qualitäten abgebildet und zwischen den Akteuren ausgetauscht. Mit der Einführung von Building Information Modeling (BIM) wurden weitreichende Möglichkeiten geschaffen, diese Daten in digitalen, strukturierten und maschinenlesbaren Repräsentationen zu prozessieren, auszutauschen und damit den Anforderungen der Architecture, Engineering, Construction und Operations Industrie (AECO) in Form integraler Prozessketten gerecht zu werden.

Allerdings können nicht alle relevanten Aspekte von technischen Systemen in standardisierten Datenmodellen im Kontext BIM abgebildet werden. Die Nutzung dokumentenbasierter Planungsunterlagen ist daher in vielen Gewerken weiterhin gängige Praxis. So wird hinsichtlich des technischen Monitorings im normativen Umfeld eine dokumentengestützte Planung und Dokumentation weiterhin vorgesehen. Die Erstellung von Mess- und Zählerkonzepten, Checklisten sowie Monitoringsteckbriefen nach VDI 6041 sind Beispiele für derartige dokumentenbasierte Informationen, welche parallel zu BIM-Modellen erstellt werden. Für eine nachhaltige Gebäudelandschaft sind derartige Dokumentationen bedeutend und eng an die ebenso zu erstellenden Energiekonzepte geknüpft (Bohne, D., 2019). Dokumente dieser Art können in einem herstellerneutralen BIM-Austauschformat wie den Industry Foundation Classes (IFC) via *IfcExternalReference* zwar referenziert werden, jedoch sind die darin enthaltenen Informationen nicht auf der Datenebene mit dem Austauschformat selbst verknüpft und daher in ihrer Aussagekraft begrenzt. Die weitere Nutzung der Informationen aus diesen

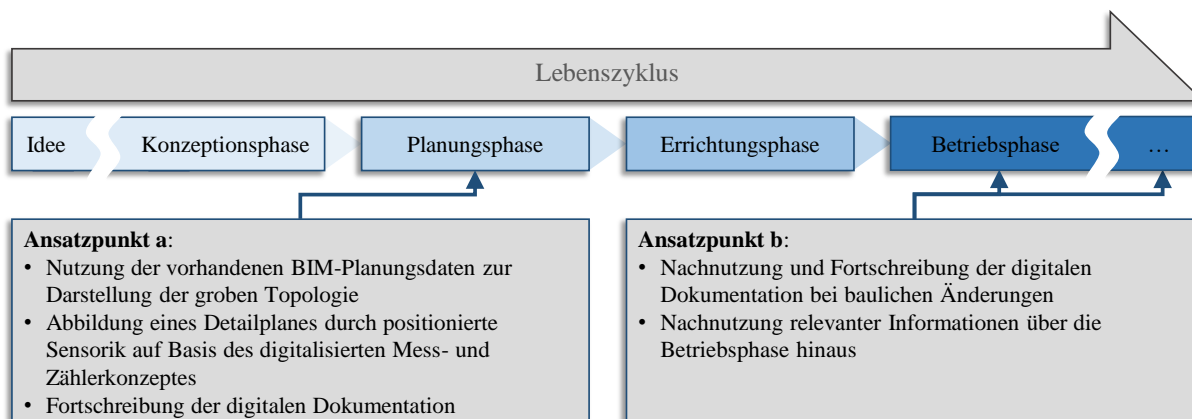


Abbildung 1: Ansatzpunkte für BIM4EMK im Lebenszyklus

referenzierten Dokumenten unterliegt einem manuellen, nicht direkt automatisierbaren Aufwand.

Um den Anforderungen einer integralen Planung und Nachnutzung gerecht zu werden, muss von parallelen Arbeitsschritten einer Dokumenterzeugung hin zu einer vernetzten, konsistenten Prozesskette übergegangen werden. Dies erfordert die Verknüpfung von Informationen auf Datenebene anstatt einer reinen Referenzierung von Dateiformaten. Eine Möglichkeit dazu ist die Nutzung von Semantic Web Technologien (SWT) (Rasmussen, M. H. et al., 2017) und die Festlegung eines gemeinsamen Vokabulars in Ontologien, welche als formale, explizite Spezifikationen einer gemeinsamen Konzeptualisierung definiert sind (Ehrig, M. & Studer, R. 2006). Es existieren jedoch wenige Tools und Methoden, um effizient und praxistauglich auf Basis solcher Ontologien zu arbeiten.

In diesem Beitrag wird daher das kommandozeilenbasierte Tool BIM4EMK vorgestellt, welches die visuelle Darstellung von hierarchischen, topologischen und funktionalen Aspekten von technischen Systemen ermöglicht. Die Datenhaltung erfolgt dabei unter Verwendung bestehender Ontologien als Resource Description Framework (RDF) Repräsentation. Das Tool baut auf dem Ergebnis der in (Pauen et al., 2020) vorgestellten Methodik auf und nutzt dafür insbesondere die darin beschriebene TUBES System Ontology (TSO) (Pauen et al., 2021). Dies gewährleistet eine zentrale Erweiterbarkeit, Verknüpfbarkeit und Nachnutzbarkeit in allen Lebenszyklusphasen und Gewerken sofern ein BIM-Modell vorliegt. Das Tool und die hinterlegten Methoden werden für den Anwendungsfall der digitalen Visualisierung eines Energiemonitoring-Konzeptes angewendet.

Entsprechende generalisierte Ansatzpunkte für die Anwendung des Tools sind in Abbildung 1 dargestellt. In Bezug zu einer integralen Prozesskette erfolgt bereits in der Idee- und Konzeptionsphase die Erstellung von BIM-Planungsdaten des Bauwerks in Form von BIM-Modellen. Das in (Pauen et al., 2020)

beschriebene Tool zur Umwandlung von BIM-Modellen in eine TSO-basierte Repräsentation als Graph und zur Anreicherung dieses Graphen mit Informationen zu funktionalen Zusammenhängen kann zu jedem Zeitpunkt im Lebenszyklus auf bestehende BIM-Modelle angewendet werden und stellt damit den Startpunkt des in dieser Veröffentlichung vorgestellten Tools dar. Sofern ein Graph zu einem beliebigen Zeitpunkt im Lebenszyklus erzeugt werden kann, kann mit Hilfe von BIM4EMK ein Konzeptplan der positionierten Sensorik erstellt werden, was einem Mess- und Zählerkonzept entspricht.

Stand der Technik

Semantic Web und TSO

Im Kontext der AECO-Industrie hat die Nutzung von SWT in den letzten Jahren stetig zugenommen (Pauwels, P. et al., 2017). Aktuelle Veröffentlichungen, wie (Gonzales et al. 2020) und (Pitori et al., 2021), geben einen Überblick über Ontologien im Bereich von Beobachtungen und Auslösungen sowie Anwendungsfällen im Bereich der Energietechnik in Bauwerken. TSO (Pauen et al., 2021) ist eine aktuelle Ontologie mit dem Ziel verknüpfte technische Systeme in der AECO-Industrie, deren hierarchische Untergliederung, strukturelle und funktionale Zusammenhänge sowie die Beziehungen zu räumlichen Entitäten explizit zu definieren. Die Ontologien Semantic Sensor Network Ontology (SSN) und Sensor, Observation, Sample and Actuator (SOSA) enthalten Konzepte zu Sensoren und Aktoren mit entsprechenden Beobachtungen, Eigenschaften und Prozeduren (SSN/SOSA). Zur Verbesserung der Nutzbarkeit ist die Ontologie horizontal sowie vertikal modularisiert. SSN importiert dabei die weniger komplexe Kern-Ontologie SOSA und erweitert diese (Haller et al. 2018). SSN/SOSA ist des Weiteren eine Empfehlung des World Wide Web Consortium (W3C).

Technisches Monitoring

Technisches Monitoring umfasst die drei Anwendungsgebiete des Anlagenmonitorings, Gebäude- und Behaglichkeitsmonitorings sowie des Energiemonitorings (VDI 6041). Das Energiemonitoring sollte dabei unabhängig von spezifischen Nutzungsansprüchen eines Bauwerks sein und primäre Informationen zu energierelevanten Bedarfsparametern liefern (AMEV 2020). Die Dokumentation dieses Aspektes des technischen Monitorings ist dadurch im Sinne der Nachhaltigkeit unabdingbar für den Nachweis ökonomischer und ökologischer Ziele (DIN 18205).

Die zur Dokumentation des Monitorings zugehörigen Mess- und Zählerkonzepte können bereits in einem groben Detailgrad in der Konzeptphase eines Bauwerks erstellt werden. Im Rahmen der darauf folgenden HOAI-Leistungsphasen 1 bis 3 werden Lastenhefte, technische Zusammenhänge sowie letztlich die Mess- und Zählerkonzepte selbst erarbeitet oder über den weiteren Lebenszyklus fortgeschrieben und angepasst (VDI 6041).

Mess- und Zählerkonzepte nach VDI 6041 beinhalten jegliche Verbraucher, energieumwandelnde Anlagen sowie die Quellen der Massen- und Energieströme. Diese Bestandteile werden in einem freien zweidimensionalen Raum miteinander vernetzt, sodass daraus die Information der Verschaltung abgelesen werden kann. Innerhalb der Verschaltung sind die Messstellen markiert. In (van Treeck et al. 2016) wird diese Darstellungsweise um weitere Details angereichert. Hier werden zusätzlich verschiedene Speicherebenen sowie beschreibende Kategorien der Anlagentechnik aufgezeigt. Beide Darstellungsweisen lassen den Energiefluss und jegliche Umwandlungsschritte sowie Messstellen erkennen.

Bestehende Ontologie-Tools

Es existiert eine Vielzahl an Tools zur Erstellung, Bearbeitung und Visualisierung von Ontologien von denen einige direkt durch das W3C vorgeschlagen werden. Die Funktionsumfänge dieser Tools belaufen sich auf die visuelle Repräsentation von Graphen als solche in Form von Knoten-Kanten-Modellen. Zu diesem Zeitpunkt ist den Autoren kein Tool bekannt, welches neben der Bearbeitung und Visualisierung von Graphen in Form von Knoten-Kanten-Modellen die Repräsentation von Zählerkonzepten ermöglicht, sodass diese ohne weitere Software und ohne weiteren manuellen Aufwand zur Erstellung von monitoringrelevanten Dokumenten genutzt werden können. In der folgenden Tabelle 1 wird ein vergleichender Überblick über eine Auswahl, vom W3C vorgeschlagener Tools und deren Funktionsumfängen hinsichtlich der Vorgaben für Mess- und Zählerkonzepte aus VDI 6041 gegeben. Die Abstufungen '+', 'O' und '-' zeigen an, ob die Kategorie zutrifft, teilweise zutrifft oder nicht

zutrifft. Das Kriterium 'Darstellung' (Darst.) bezeichnet die Möglichkeit einer abstrahierten Darstellungsweise von Struktur bzw. Topologie und funktionalem Zusammenhang als Cluster. Diese Darstellungsweise ist notwendig, um die räumliche Zuordnung ohne Verlust von Informationen zur Funktion aufzuzeigen. Das Kriterium 'Kollaborativ' (Koll.) bezeichnet die Möglichkeit des kollaborativen Arbeitens an einer Datenbasis und dessen Auswirkung auf aufbauende Prozesse. Das Kriterium 'BIM-Anbindung' (BIM-A) bewertet die unmittelbare Nutzung von BIM-Austauschformaten zur visuellen Repräsentation.

Die Tools *Protégé*, *WebProtégé*, *NeON Toolkit*, *OWLGrED* sowie *WebVOWL* wurden auf Eignung für den beschriebenen Anwendungsfall untersucht. Das erste Kriterium des Vergleichs stellt die Darstellung von Topologie und Hierarchie dar. Da unter den aufgeführten Tools nur *OWLGrED* eine Filterung nach Entitäten ermöglicht, nicht jedoch die Abstraktion der Topologie als Cluster, wurde diese hier mit 'O' bewertet (OWLGrED 2022). Jegliche andere Tools fokussieren sich auf die reine Darstellung der erzeugten Ontologie als Knoten-Kantenmodell ohne die Möglichkeit einer abstrahierten und differenzierten Darstellungsweise. In der Kategorie 'Kollaborativ' sind lediglich *Protégé* und *WebProtégé* zur kollaborativen Arbeit an einer Datenbasis in der Lage (WebProtégé 2022, Protégé 2022). Für das letzte Kriterium wurde durch die vorhandene Ontologie ifcOWL eine teilweise Übereinstimmung mit allen Tools gefunden. Es ist nicht möglich über einen Import ontologiebasiert direkt mit dem BIM-Austauschformat IFC zu interagieren oder dieses darzustellen (Protégé 2022, WebProtégé 2022, NeON Toolkit 2022, OWLGrED 2022, WebVOWL 2022). Für diesen Schritt muss das IFC EXPRESS-Schema erst in die Ontologie ifcOWL konvertiert werden (Building Smart International).

Tabelle 1: Vergleich bestehender Ontologie-Tools

	DARST.	KOLL.	BIM-A
PROTÉGÉ	-	+	O
WEB-PROTÉGÉ	-	+	O
NEON TOOLKIT	-	-	O
OWLGRED	O	-	O
WEBVOWL	-	-	O

Die untersuchten Ontologie-Tools ermöglichen eine Erstellung und Visualisierung von Ontologien. Sie ermöglichen jedoch nur eingeschränkt die Erzeugung nutzbarer Dokumente zur Dokumentation von Energiemonitorings im Rahmen einer integralen und

BIM-basierten Prozesskette. Aus diesem Grund muss eine Möglichkeit geschaffen werden, mit Hilfe robuster Ontologien und der Nutzung einer dynamischen Datenbasis die Erzeugung von Planungsdokumenten integral zu gestalten. Das im Folgenden vorgestellte Tool knüpft an den gezeigten Faktoren an und ermöglicht einen integralen Prozess auf Basis von IFC4 von der Planung bis zur Dokumentation des Monitorings.

BIM4EMK

BIM4EMK ist ein Kommandozeilen-basiertes Python-Tool zur Erzeugung von Mess- bzw. Zählerkonzepten zu Dokumentationszwecken nach VDI 6041 aus dem BIM-Austauschformat IFC. Das Tool ermöglicht die visuelle Darstellung von Anlagen- und Zählerschemata für Gebäude, welche sich in einer beliebigen Phase im Lebenszyklus befinden und bereits ein BIM-Modell besitzen, welches in dem Format IFC4 vorliegen muss. Zur Nutzung dieses Tools ist die bereits einleitend beschriebene Toolkette von (Pauen et al. 2020) notwendig, um die Informationen aus einem BIM-Austauschformat in einen Graph umzuwandeln. Die gesamte Toolkette zur Ausführung bis zum fertigen Monitoringkonzept ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Anwendung des entwickelten Tools wird im Folgenden anhand der hydraulischen Verschaltung eines Trinkwasserprüfstandes vorgestellt.

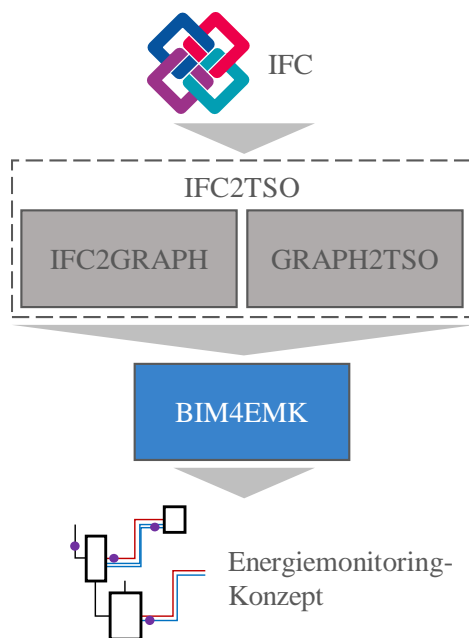


Abbildung 2: Toolkette von der Datenbasis zum Monitoringkonzept

Ein durch IFC2TSO erzeugter Graph liegt als lokale Datei im Resource Description Framework-Format (RDF) vor und wird in dieser Form direkt durch das in dieser Veröffentlichung vorgestellte Tool BIM4EMK weiterverarbeitet. Die Vorbereitung und Vorverarbeitung des Graphen erfolgt mit Hilfe der

Python-Bibliothek *rdflib* (RDFlib). Der Graph wird in der Initialisierung eingelesen und nach vorkonfigurierten Definitionen durchsucht. Die Vorkonfiguration ist notwendig, um diejenigen IFC-Klassen aus dem Graph zu extrahieren, die zur Beschreibung des Energiemonitorings notwendig sind. Da innerhalb des Graphen weiterhin bekannte IFC -Namespaces genutzt werden, können so unmittelbar die IFC-Klassen *IfcEnergyConversionDevice*, *IfcFlowStorageDevice*, *IfcFlowTerminal* sowie *IfcSanitaryTerminal* ausgelesen werden. Für die spätere Visualisierung bilden diese IFC-Klassen die wesentlichen baulichen Elemente für die praktische Anwendung des erzeugten Dokuments. Zum Auslesen wird die Eigenschaft des RDF-Datenformates genutzt, nach beliebigen Verbänden von sogenannten Triples: Subjekt – Prädikat – Objekt suchen zu können. Zur Ermittlung der spezifischen IFC-Klassen im Graph wird daher eine Suche nach Subjekten mit dem Prädikat *rdf:type* der vorkonfigurierten Klassen als Objekte durchgeführt. In einem nächsten Schritt werden jegliche so gefundenen Subjekte auf ihre Zugehörigkeit zu vorhandenen Zonen und Etagen mit Hilfe dem in der TSO definierten Prädikat: *tso:locatedIn* sowie dem in der BOT definierten Prädikat: *bot:hasSpace* untersucht. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass beiden Ontologien kongruent in der Beschreibung von Zonen, Etagen und weiteren Attributen sind. Es liegen nun Informationen zum Vorhandensein der Subjekte sowie deren Zugehörigkeit zu einer Zone und Etage vor.

Für ein Monitoringkonzept ist weiterhin die physikalische Verbindung zwischen diesen Subjekten entscheidend für das Verständnis der Anlagentechnik. In dem Tool wird auf Basis aller gefundener Subjekte die hydraulische Verbindung entlang der Pfade mit Hilfe einer Tiefensuche (Depth-First-Search – DFS) ermittelt. Der Pfad wird über den in der TSO definierten funktionalen Zusammenhang sämtlicher dazwischenliegender Bauteile bestimmt. TSO bietet durch die Definition des Prädikates: *tso:suppliesFluid* und *tso:fluidSuppliedBy* die Möglichkeit der Ermittlung von Verbindung und Fließrichtung massführender Leitungen. Aus dem Graph werden dazu jegliche Triples mit den genannten Prädikaten in eine Adjazenzmatrix überführt und die Tiefensuche anhand dieser durchgeführt. An dieser Stelle kann bereits eine erste Visualisierung der Anlagentechnik erstellt werden, wie in Abbildung 3 dargestellt ist. Entsprechende Etagen und Zonen sind abgebildet, sodass jede Anlage und jedes einer IFC-Klasse zugeordnete Element in der zugehörigen Zone und Etage angeordnet ist. Die in blau dargestellten, gerichteten Verbindungen entsprechen jeweils der Pfad- also der Fließrichtung, welche sich an den Prädikaten *tso:suppliesFluid* und *tso:fluidSuppliedBy* orientiert.

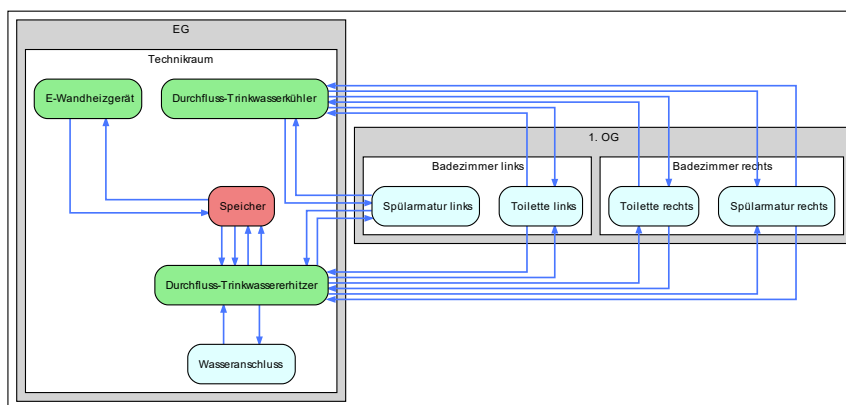


Abbildung 3: Identifizierte Anlagentechnik ohne Sensorik

Für die Erzeugung des Monitoringkonzeptes wird das Element jedes Pfades auf Zugehörigkeit zur IFC-Klasse *IfcSensor* untersucht. Dies geschieht in mehreren Schritten, da Sensoren sowohl als separates Bauteil (z.B. Durchflussvolumenstrommesser) oder als Bauteilverbund (z.B. Einschraubtemperaturfühler in T-Stück) vorliegen können. Ein Bauteilverbund, welcher zu einem Sensor im Pfad führt, wird durch den funktionalen Zusammenhang des in der TSO definierten Prädikates *tso:connects* ermittelt. Auch für jeden so ermittelten Sensor entlang des Pfades werden die jeweilige Zone sowie Etage ermittelt. Das Endresultat ist in der folgenden Abbildung 4 zu sehen. Sind in dem eingelesenen Modell keine Sensoren vorhanden, so wird nur die Anlagenverschaltung entsprechend Abbildung 3 visualisiert. Abbildung 4 ist zu entnehmen, dass die topologischen Zusammenhänge nicht als Knoten-Kanten-Modell visualisiert werden, sondern in Form von Clustern und Subclustern. Entsprechend der Hierarchie in dem BIM-Austauschformat IFC bilden Etagen in dieser Darstellung Cluster mit Zonen als Subcluster. Die Anlagentechnik und dessen hydraulische Verbindung sind selbst als Knoten und Kanten dargestellt. Die Visualisierung wird mit der Python-Bibliothek *graphviz* (GraphViz) umgesetzt.

Die Nutzung des Tools zur Darstellung und Visualisierung von Konzepten für Energiemonitorings kann im Vergleich zur manuellen Erstellung eines Sensorplans dynamisch erfolgen. Zu einem beliebigen Zeitpunkt im Lebenszyklus lässt sich das aktuelle Monitoringkonzept direkt aus der BIM-Datenbasis auslesen und darstellen. Insbesondere für die Nachnutzung ist dieses Vorgehen von großer

Bedeutung, da weder spezielle Software genutzt, noch Verständnis über das Konzept von Ontologien vorhanden sein muss, um derartige Pläne erstellen und nutzen zu können.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Veröffentlichung wurde ein BIM- und SWT-basierter Workflow zur Erstellung von Dokumentations- und Planungsunterlagen von und für Monitoringkonzepte dargestellt. Der Workflow ist konsistent zu einem integralen Planungsprozess, da zu dessen Ausführung nur eine einzige Datenbasis in Form des BIM-Austauschformates IFC4 notwendig ist. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde die Übersetzung einer IFC-Datei in Form eines Graphen mit Hilfe von TSO genutzt, um die für das Energiemonitoring notwendige Dokumentation zur Nachnutzung und Planung ohne weiteren manuellen Aufwand digital zu realisieren. Dies wurde anhand realer Projektdaten eines Trinkwasserprüfstandes und dessen hydraulischer Verschaltung durchgeführt.

Momentane Entwicklungen befassen sich unter anderem mit der Umsetzung und Erweiterung dieses und der vorangegangenen Tools als webbasierte Applikation. Weitere Entwicklungen befassen sich mit einer erweiterten visuellen Darstellung mit entsprechender Symbolik aus dem Bereich der Rohrleitungs- und Instrumentenfließschemata (R&I). TSO-basierte Graphen werden dabei in ihren funktionalen, hierarchischen und topologischen Aspekten so dargestellt, dass diese in der Praxis anwenderfreundlicher genutzt werden können.

Die Nutzung von Ontologien zur Erzeugung von

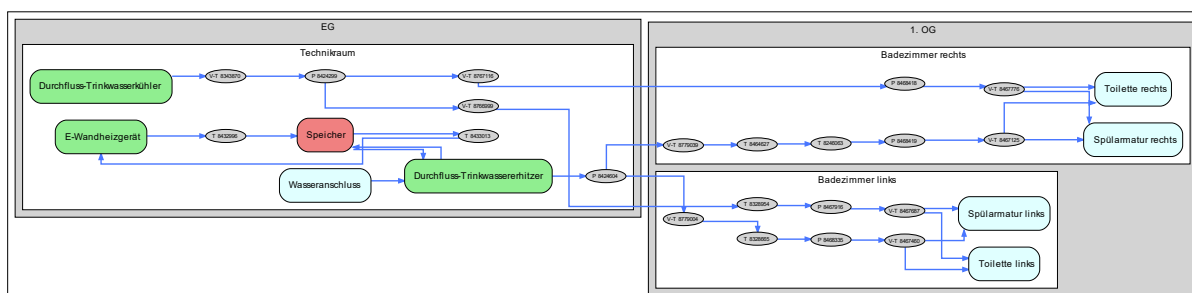


Abbildung 4: Monitoringkonzept der sanitären Anlagentechnik

Plänen für die Dokumentation von Energiemonitoringkonzepten ist lediglich ein Aspekt der Nutzungsweise. In diesem ersten praktischen Ansatz konnte gezeigt werden, dass Verschaltungen und Sensorplatzierungen mit erweiterten, visualisierten Informationen automatisiert dargestellt werden können. Durch die vorliegenden Informationen als Graph sind jedoch weitere Darstellungsweisen verschiedener Szenarien und für verschiedene praktische Anwendungszwecke möglich. So lassen sich auch Energieflussschemas und beliebige Bilanzgrenzen darstellen.

Literatur

Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV) 2020. Technisches Monitoring, Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung, Empfehlung Nr. 158

Bohne, D. 2019. Technischer Ausbau von Gebäuden und nachhaltige Gebäudetechnik, 11., aktualisierte Auflage. Springer Vieweg.

Building Smart International
<https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-formats/ifcowl/>, Zugriff 2022

DIN 18205 DIN e.V. 18205:2016-11 2016. Bedarfsplanung im Bauwesen

Ehrig, M., Studer, R. 2006. Wissensvernetzung durch Ontologien. In: Pellegrini, T., Blumauer, A. (eds) Semantic Web, Springer, Berlin, Heidelberg.

Esnaola-Gonzalez, I. and Bermudez, J. and Fernandez, I. and Arnaiz, A. 2020. Ontologies for observations and actuations in buildings: A survey, Semantic Web, vol. 11

GraphViz python module.
<https://github.com/xflr6/graphviz>

Haller, A., Janowicz, K., Cox, S., Lefrançois, M., Taylor, K., et al. 2018. The Modular SSN Ontology: A Joint W3C and OGC Standard Specifying the Semantics of Sensors, Observations, Sampling, and Actuation. Semantic Web – Interoperability, Usability, Applicability, IOS Press, In press. hal-01885335

NeON Toolkit http://neon-toolkit.org/wiki/Documentation_and_Support.html, Zugriff 2022

OWLGrED. Graphical Ontology Editor for OWL
<http://owlgred.lumii.lv/>, Zugriff 2022

Pauen, N., Schlütter, D., Frisch, J. and van Treeck, C. 2021. TUBES System Ontology: Digitalization of building service systems, Proceedings of the

9th Linked Data in Architecture and Construction Workshop

Pauen, N., Schlütter, D., Siwiecki, J., Frisch, J. and van Treeck, C. 2020. Integrated representation of building service systems: topology extraction and TUBES ontology, Bauphysik, vol. 42

Pauwels, P., Zhang, S., Lee, Y.-C. 2017, Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview, Automation in Construction, vol. 73

Pritoni, M. and Paine, D. and Fierro, G. and Mosiman, C. and Poplawski, M. and Saha, A. and Bender, J. and Granderson, J. 2021. Metadata Schemas and Ontologies for Building Energy Applications: A Critical Review and Use Case Analysis, Energies, vol. 14

Protégé. <http://protegeproject.github.io/protege/>, Zugriff 2022

Rasmussen, M. H., Lefrançois, M., Schneider, G.F., Pauwels, P. 2021. BOT: The building topology ontology of the W3C linked building data group, Semantic Web, vol. 12

RDFLib python module.
<https://github.com/RDFLib/rdfliib>

SSN/SOSA W3C Recommendation
<https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/>, Zugriff 2022

van Treeck, C., Elixmann, R., Rudat, K., Hiller, S., Herkel, S., Berger, M. 2016. Gebäude. Technik. Digital. Building Information Modeling: BIM – Recht – Trinkwasser – Energiekonzepte – Brandschutz. Springer Vieweg.

VDI 6041 VDI e.V. 2017. Facility-Management, Technisches Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen

WebProtégé.
<https://protegewiki.stanford.edu/wiki/WebProtege>, Zugriff 2022

WebVOWL. Webbased Visualization of Ontologies
<http://vowl.visualdataweb.org/webvowl.html>, Zugriff 2022

World Wide Web Consortium W3C.
https://www.w3.org/wiki/Ontology_editors, Zugriff 2022