

# Verlinkung und Harmonisierung von industriellen IoT-Daten für Visualisierung und Simulation

## *Harmonizing and Linking Industrial IoT Datastreams to Foster Geo-Visualization and Simulation*

Manfred Mittlböck<sup>1</sup>, Caroline Atzl<sup>1</sup>, Michael Andorfer<sup>1</sup>, Bernd Lackner<sup>2</sup>,  
Gerald Griesebner<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RSA Forschungsgesellschaft mbH, Salzburg · manfred.mittlboeck@researchstudio.at

<sup>2</sup>Universität Salzburg

**Zusammenfassung:** Dieser Beitrag beschreibt Ergebnisse aus dem WISS 2025 Forschungsprojekt „aWHEREness:lab“ und zeigt mit einer Verlinkung und Harmonisierung von industriellen IoT-Daten neue Möglichkeiten für die Verarbeitung und Verwertung dieser Daten im Kontext der digitalen Transformation der Industrie 4.0 auf. Die Verknüpfung von IoT-Daten der physischen Welt aus Operation Technology (OT) mit digitalen Daten von Organisationen und Unternehmen über Web-Service-Schnittstellen ermöglichen den Aufbau einer digital vernetzten und intelligenten Umgebung. Dies zielt auf den Aufbau von digitalen Zwillingen der Umgebung für die darin agierenden digitalen Zwillinge von Maschinen und anderen ‚Assets‘. Damit werden neue Möglichkeiten der Visualisierung in naher Echtzeit und der zeitlich dynamischen Simulation in GIS im Sinne der Geo-IoT (Geo Internet of Things) eröffnet.

**Schlüsselwörter:** GIS, Sensoren, IoT, Digital Twin, SensorThings, 4D

**Abstract:** *This article presents results of the WISS 2025 research project “aWHEREness:lab” with regard to linking and harmonizing industrial IoT data that opens up new possibilities for the processing and exploiting these data. Overall, the linking of IoT data of the physical world from operation technology (OT) with digital data of organizations and companies through web service interfaces enables the construction of a digitally networked and intelligent environment. The construction of digital twins of the environment that integrate digital twins of machines open up new possibilities for near-real-time visualizations as well as for temporally dynamic simulations using GIS in the sense of GeoIoT.*

**Keywords:** *GIS, sensors, IoT, Digital Twin, SensorThings, 4D*

## 1 Einleitung

Einhergehend mit der operativen Digitalisierung von Arbeits- und Logistikprozessen gewinnt die durchgängige Integration von aktuellen IT-Daten und Sensordatenströmen an Bedeutung. Dieser Beitrag widmet sich der Übersetzung des konzeptuellen Schemas für die Kodierung von Beobachtungen und Sensormessungen nach (ISO 19156:2011) für die geo-semantische Erweiterung von IoT-Daten aus unterschiedlichen Branchen im Industriebereich, wie z. B. dem Forstwesen und der Werkstückbearbeitung. Die Kombination und Nutzung semantischer Webtechnologien in den Sensornetzwerken (Bröring, et al., 2011) ermöglicht es dabei, die unterschiedlichen IoT-Messdaten mit einer zusätzlichen Beschreibung mit Zusatzinformationen zu ergänzen und bei Bedarf um die räumliche Komponente zu erweitern (Geo-IoT), sodass diese auch über ihren originären Anwendungsbereich hinweg in der GIS-Welt als Verbindung zur physischen Welt Verwendung finden können (Kim, 2017).

Ausgehend von einer Analyse relevanter Industrie-IoT-Standards war es Ziel im Rahmen des WISS 2025-Forschungsprojektes „aWHEREness:lab“ eine kompakte Form der Beschreibung von IoT-Messungen, kombiniert mit den dafür wesentlichen inhaltlichen Beschreibungen des Sensorsystems, den Messqualitäten und der räumlichen Verortung, zu erstellen und anhand unterschiedlicher Use Cases im Industriekontext hinsichtlich seiner übergreifenden Verwertbarkeit zu validieren. Für Messdaten aus diesen Umgebungen haben wir im Rahmen des „aWHEREness:lab“-Projektes ein effizientes erweitertes Konzept zur harmonisierten Abbildung von IoT-Umweltdaten und Prozessdaten konzipiert und anhand mehrerer Fallbeispiele, von denen zwei in diesem Beitrag näher erläutert werden, hinsichtlich der Domänenübertragbarkeit, umgesetzt und validiert. Die dafür notwendige inhaltliche Beschreibung umfasst z. B. die Beschreibung der IoT-Sensoreinheiten in Anlagenumgebungen, die Messinformation selbst, die Abbildung von Qualitätsinformationen sowie deren stationäre oder mobile räumliche Verortung.

Mit einer harmonisierten Kodierung dieser Informationen werden viele neue Möglichkeiten für die übergreifende und weiterführende Verarbeitung und Verwertung dieser Messdaten über ihren eigentlichen Anwendungszweck hinaus eröffnet. Die Verlinkung unterschiedlicher Daten der physischen Welt aus Operation Technology (OT) mit digitalen Daten von Unternehmen über standardisierte Schnittstellen ermöglichen den Aufbau einer digital vernetzten und intelligenten Umgebung, also den Aufbau eines digitalen Zwillings der Umgebung bzw. einem Environmental Twin (Russom, 2020). Der Stellenwert digitaler Zwillinge der Umwelt zeigt sich besonders gut am Vorhaben des deutschen Bundesamtes für Kartographie, bis 2024 für ganz Deutschland einen „Digitalen Zwilling“ mit allen relevanten Geobjekten zu erstellen. Geplante Anwendungsbereiche sind dabei Simulationen der Umwelt, Sicherheit, Verkehr und Raumplanung (BKG, 2022).

## 2 Stand der Technik

Das Architekturmodell RAMI (Reference Architectural Model Industrie) 4.0 ist Beispiel für eine Standardisierung im Kontext Industrie 4.0. Genormt in Deutschland als DIN Spec 91345 führt es die wesentlichen Aspekte der Fertigung in einem dreidimensionalen Schichten- und Lebenszyklusmodell zusammen und unterstützt so ein gemeinsames Verständnis von Industrie 4.0 (Fraile, Sanchis, Poler, & Ortiz, 2019). Dabei ist es notwendig, dass wesentliche Assets mit Merkmalen, Nutzungszweck und Funktionen formal beschrieben und maschinenlesbar bereitgestellt werden. Es gilt also Assets mit ihren Zuständen an bestimmten Orten und Zeiten (*WO* und *WANN*) während des gesamten Lebenszyklus zu beschreiben. Die standardisierte und sichere Vernetzung von IoT-Sensoren und Aktuatoren in Maschinen und Produktionssystemen aus verschiedenen Branchen ist also eine zentrale Herausforderung im Kontext der Industrie 4.0. Hermann et al. (2015) definieren IoT dabei als: *„Industrie 4.0 is a collective term for technologies and concepts of value chain organization. Within the modular structured Smart Factories of Industrie 4.0, CPS monitor physical processes, create a virtual copy of the physical world and make decentralized decisions“*. Smarte Industriekomplexe stehen damit im Zentrum des digitalen Wandels der Industrie und wir sind der Überzeugung, dass digitale Abbilder der physischen Umwelt dabei unterstützen, diese Prozesse besser einzuordnen und zu verstehen.

Im Folgenden wird eine Reihe von Standards kompakt zusammengefasst beschrieben, die für die harmonisierte Vernetzung der in den im Zuge dieses Beitrags vorgestellten Use Cases (siehe Kapitel 4) verwendeten IoT-Sensoren und Aktuatoren von wesentlicher Bedeutung waren.

## 2.1 IEC TR 62541-1:2020 OPC Unified Architecture

Um den Informationsaustausch zwischen verschiedenen IoT-Sensoren und Aktuatoren in standardisierter Form flexibel und skalierbar zu ermöglichen, wurde von der OPC Foundation mit der IEC 62541 der Open Platform Communication Unified Architecture (OPC UA) ein serviceorientierter, plattformunabhängiger Standard für den Datenaustausch konzipiert, der den Informationsaustausch zwischen verschiedenen industriellen IoT-Sensoren und Aktuatoren harmonisiert. Diese serviceorientierte Architektur zeichnet sich besonders durch die folgenden Merkmale aus (PLCopen and OPC Foundation, 2018):

- Die **Skalierbarkeit und Plattformunabhängigkeit** ermöglichen die Integration in Hochleistungsrechnern, auch in immer kleiner werdenden Geräten und Sensoren.
- Der **flexible Adressraum** ermöglicht einen objektorientierten und standardisierten Austausch von Variablen und Methoden.
- Die Verwendung von **geläufigen Protokollen und Kodierungen** garantiert die Konnektivität bei Embedded- und Enterprise-Anwendungen
- Ein **Sicherheitsmodell** für den sicheren und authentifizierten Austausch von Daten.
- Daten können über das **Internet** ausgetauscht werden.

Für den Datenaustausch über OPC UA stehen dabei zwei Methoden zur Verfügung. Der sichere und bestätigte Austausch der Informationen über das klassische Client-Server-Modell mittels eines dedizierten Servers und der Austausch über eine Broadcast-Verteilung mittels des Publisher-Subscriber-Modells (Bakakeu, Brossog, Bär, & Schäfer, 2019).

## 2.2 MQTT – Message Queuing Telemetry Transport

MQTT<sup>1</sup> (Message Queuing Telemetry Transport) wurde 1999 zur M2M-(Maschine zu Maschine)-Kommunikation im Zuge eines gemeinsamen Projekts von IBM und Arcom Control Systems entwickelt. Als Publish/Subscribe-Übertragungsprotokoll für Sensormessungen stehen dabei folgende Eigenschaften im Mittelpunkt (MQTT.org, 2020):

- Einfache Implementierung zum Vernetzen von Geräten mit geringen Ressourcen.
- Unterschiedliche Servicequalitäten, um auch in instabilen Netzen die Übertragung zu gewährleisten.

Im Jahr 2010 wurde das Protokoll in Version 3.1 unter einer freien Lizenz und 2014 der Version 3.1.1<sup>2</sup> als ISO/IEC 20922:2016 (ISO, 2016a) veröffentlicht. 2019 wurde Version MQTT 5 mit Fokus auf die Verbesserung der Skalierbarkeit, der Fehlerausgabe und der Formalisierung von Discovery und Ergebnisbereitstellung veröffentlicht (Brickenstein Hofschien, 2019).

---

<sup>1</sup> <https://mqtt.org/>

<sup>2</sup> <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/csprd02/mqtt-v3.1.1-csprd02.html>

### 2.3 AEMP 2.0/ISO 15143-3

Mit dem AEMP (Association of Equipment Management Professionals) Telematics Standard (ISO/TS 15143-3:2016) wurde ein Datenschema definiert, mit welchem ein direkter Datenaustausch zwischen Gerätehersteller (Original Equipment Manufacturer – OEM) und Gerätebesitzer in Form eines standardisierten Formates möglich ist. Der Standard ISO/TS 15143-3:2016 gilt für „mobile Erdbaugeräte“ gemäß ISO 6165 und für „mobile Maschinen des Straßenbaus“. Der Standard AEMP 2.0 / ISO 15143-3 wurde 2016 verabschiedet (Konradin Mediengruppe, 2019). Aktuelle Lösungen erfüllen diesen bereits, so zum Beispiel Caterpillar VisionLink (AEMP 1.2/2.0)<sup>3</sup>, Liebherr LiDAT (AEMP Webservice Schnittstelle über Webservice API)<sup>4</sup> und John Deere JDLink (Machine Data API).

### 2.4 OGC SWE & SensorThings API

Die vom Open Geospatial Consortium (OGC) ins Leben gerufene Sensor Web Enablement (SWE)-Initiative definiert ein Set an Standards und eine High Level Architecture (Reed, Botts, Percivall, & Davidson, 2013). Dies umfasst die Modelle, Kodierungen und Dienste der SWE-Architektur, die den Aufbau und die Implementierung interoperabler und skalierbarer Dienste sowie softwareorientierter heterogener Sensorsysteme und Client-Anwendungen ermöglichen (Reed, Botts, Percivall, & Davidson, 2013).

Übergeordnetes Ziel von SWE und seiner Standards ist es, alle Arten von Sensoren, Instrumenten und bildgebenden Geräten, die über das Web und/oder das Internet zugänglich sind, mit ihren Messwerten und Beobachtungen zugänglich und gegebenenfalls steuerbar zu machen. Die dafür notwendigen Softwaremodule sind mit einer Service-orientierten Architektur (SOA) verbunden und interagieren über standardisierte Internetprotokolle und XML-Schnittstellen miteinander. Damit eignen sich die Standards sehr gut als Anknüpfungspunkt für Integrationsbestrebungen und interoperable Öffnung räumlicher Beobachtungen hin zu anderen Anwendungsdomänen. Ergänzend wurde die OGC SensorThings API (OGC, 2021) konzipiert, um eine offene und einheitliche Möglichkeit zu schaffen, IoT-Geräte auf Basis ihrer Position im Raum über eine ‚stateless‘ REST-basierte Schnittstelle zu verbinden. Inhaltlich baut der offene Standard auf bewährten Standards, wie dem OGC/ISO Observation and Measurement Datenmodell OGC 10-004r3 und ISO 19156:2011 (Cox, 2011) sowie Standards der Sensor Web Initiative (Percivall, Reed, & Davidson, 2017) auf und bietet vergleichbare Erweiterungsöglichkeiten.

## 3 Methodik und Workflow

Eine wesentliche Aufgabe im Projekt „aWHEREness:lab“ war es, eine gemeinsame inhaltliche Darstellung von industriellen IoT-Sensormessungen unterschiedlicher Anwendungsdomänen zu konzipieren und diese für eine gemeinsame Visualisierung und Weiterverwendung zu öffnen (z. B. Forstwesen, Maschinenbau [u. a. Krane]). Hierzu wurde, basierend auf der in Kapitel 2 vorgestellten relevanten Standards der Industrie und von Umweltmessungen eine inhaltliche Abbildung von Sensormessungen und wichtiger Metainformationen entwickelt.

<sup>3</sup> <https://www.myvisionlink.com/de/unsere-anwendungen/administrator/>

<sup>4</sup> <https://www.liebherr.com/shared/media/construction-machinery/earthmoving/lidat/liebherr-broschuere-lidat-earthmoving-de.pdf>

Dies umfasste zudem die inhaltliche Erweiterung (z. B. um Qualitätsparameter von Sensormessungen) von Objekten in Anlagenumgebungen sowie deren räumliche Verortung durch die Erweiterung um die Komponente der Position.

### 3.1 Definition eines kompakten IoT-Informationsmodells

Die Kombination und Nutzung semantischer Webtechnologien in Sensornetzwerken ermöglicht es, die Messdaten mit Zusatzinformationen zu ergänzen und zu erweitern, sodass diese auch über ihren originären Anwendungsbereich hinweg Verwendung finden können. Um diese Werte auch für andere Anwendungen zu öffnen, ist es vielfach hilfreich, die Messwerte mit zusätzlichen ortsbezogenen Informationen „*WANN & WO*“ (Raum & Zeit) kontextneutral zu erweitern. Das gilt für die räumliche Erweiterung von per se nicht-räumlichen Datenbeständen (z. B. von Maschinendaten) als auch für Informationen zu dem „*WER/WAS/WARUM*“ hinsichtlich Messsensoren und für die Qualität der Sensoren. Um gleichzeitig auch die Kompaktheit jeder zu übermittelnden Nachricht bestmöglich zu gewährleisten, bieten neben dedizierten XML-Schema-Ansätzen wie OGC SOS 2.0, moderne REST-basierte Ansätze wie die SensorThings API (siehe Kapitel 2.4) mit JSON-LD (W3C, 2020) eine sehr effiziente Kodierungsmöglichkeit, diese Anforderungen abzubilden. Darauf aufbauend können 4D-GI-Systeme z. B. in Form interaktiver Web-Karten auch aktuelle Zustandsinformationen von Maschinen in intuitiver Form visualisieren und lagegenau kommunizieren. Für das Projekt „aWHEREness:lab“ wird dabei bewusst in einem ersten Schritt vornehmlich auf den Austausch von Sensormessungen Bezug genommen (read-only). Grundsätzlich kann dieser Ansatz auch auf Steuerung von Aktuatoren übertragen werden (read-write). Diese Erweiterung benötigte jedoch auch eine gezielte zusätzliche Betrachtung der IoT-Security, die aufgrund des Umfangs in diesem Projekt nicht betrachtet werden konnte.

In einer Kombination aus OGC SOS, SensorThings API und OPC UA (siehe Kapitel 2) wurde für das „aWHEREness:lab“ Projekt, aufbauend auf Arbeiten des Projektes SCA-DA::GIS (Mittlböck, Vockner, Lukic, & Kranzer, 2013) eine vereinfachte JSON-Kodierung (IETF, 2017) für die Übermittlung der IoT-Messdaten und deren wesentlichen Zusatzparameter konzipiert, die eine harmonisierte Kommunikation der Messdaten aus verschiedenen Industriedomänen, abgestimmt auf die in Kapitel 2 vorgestellten Domänenstandards, ermöglicht. Im Rahmen des Projektes wurden die Parameter der absoluten und relativen Positionierung von SCADA Sensormesswerten in Raum und Zeit adaptiert und um Metainformationen wie Herkunft, Qualität, Gültigkeit etc. erweitert. Diese inhaltlichen und räumlichen Ergänzungen und Erweiterungen von Prozessmesswerten (Mittlböck, Vockner, Lukic, & Kranzer, 2013) wurden in den verschiedenen Use Cases von „aWHEREness:lab“ verwendet und hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit untersucht. Die Inhalte der *Industrial Measurements* wurden dafür in die generalisierten Teilbereiche Metadaten zum Sensordienst (a), beschreibende Information zum Sensorsystem (b) und der Beschreibung der Messwerte der Ergänzung der Positionsinformation (c) gegliedert und inhaltlich angelehnt an die OGC SensorThings API (siehe Tabelle 1) als (Geo)JSON-Struktur implementiert und im Rahmen der Use Cases validiert.

**Tabelle 1:** Beschreibung einer Sensormessung als hierarchische Tabelle (als JSON-Objekt abbildbar, angelehnt an die OGC SensorThings API)

<<observation>>			
procedureURI			URI des Sensorsystems
phenomenonTimeUTC			Zeitpunkt der Messung (Nach ISO 8601 in tausendstel Sekunden (z. B. 2021-09-01T00:00:00.000Z))
resultTimeUTC			Aktuelle Zeit (Messzeit + Übertragungszeit) in tausendstel Sekunden
sampledFOI			Das Feature of Interest, für das eine Messung erfolgt
sampledFOI_uri			Das Feature of Interest, für das eine Messung erfolgt – URI
samplingFOI_uri			Das Feature of Interest, mit dem eine Messung erfolgt – URI
keywords			Schlagwörter
observationType			Messtyp nach ISO 1956 (Wenn möglich als Measurement auszuführen) z. B. <a href="http://www.opengis.net/def/observation-Type/OGC-OM/2.0/OM_Measurement">http://www.opengis.net/def/observation-Type/OGC-OM/2.0/OM_Measurement</a>
<<sensor>>			
	Name		Sensorname
	description		Sensorbeschreibung
	<<properties>>		<<Sensoreigenschaften>>
		sensor_id	Eindeutige Sensorkennung
		sensor_manufacturer	Sensor Hersteller
		sensor_system	Sensor System
		type	Sensor Typ (aus Codeliste)
		group	Sensorgruppe
		tenant	Verwalter des Sensorsystems
		tenant_uri	Verwalter des Sensorsystems URI
		tenant_contact	Verwalter des Sensorsystems E-Mail
		encodingType	Beschreibung des Sensors Dokumentationsverweis – Typ
		metadata	Beschreibung des Sensors Dokumentationsverweis

**Tabelle 1** (Fortsetzung)

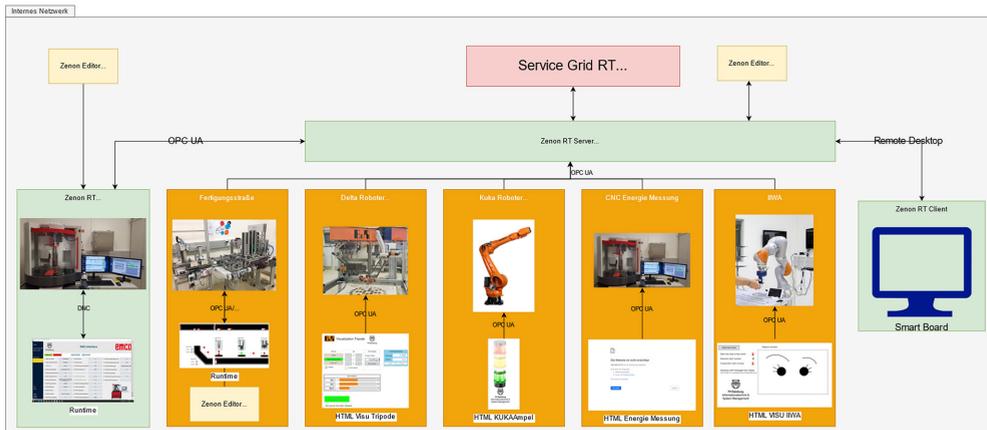
	<<location>>		<<Verortung>>
		type	Typ (codeliste: [stationary], [mobile], [remote])
		coordinates	Koordinaten (nach EPSG: 4326 – Longitude (Dezimalgrad), Latitude (Dezimalgrad), Altitude (Meter – Mean Seal Level, EGM2008))
		description	Beschreibung der initialen Position des Sensorsystems
		URI	URI der initialen Position des Sensorsystems
		major	Gebäudebezeichnung
		Floor	Stockwerksnummer. Beispiele: 0 = Erdgeschoss, 1 = 1. Stock, -1 = Untergeschoss
		minor	Raumbezeichnung
	<<phenomenon>>		<<Messphänomene>>
		definitionURI	Definition mit als UR (z. B. <a href="http://qudt.org/vocab/quantitykind/CelsiusTemperature">http://qudt.org/vocab/quantitykind/CelsiusTemperature</a> )
		title	Name des Phänomens
		UOMcode	Kurzbezeichnung des Phänomens
		UOMuri	URI zur Definition des Phänomens
		time	Zeitpunkt der Messung (Nach ISO 8601 in tausendstel Sekunden)
		result	Messwert

## 4 Implementierung und Validierung

Für die Validierung der Verlinkung und Harmonisierung von industriellen IoT-Daten wurden mehrere Prototypen entwickelt, wovon zwei in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt werden.

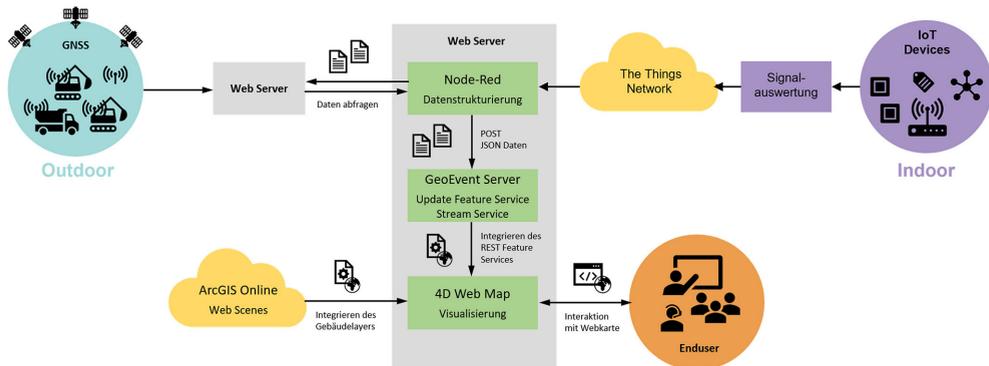
### 4.1 Kombination von IoT-Werkzeug-, Maschinen- und Gebäudedaten

Die Maschinen im Smart Factory Lab des „aWHEREness:lab“ Projektpartners FH Salzburg sind miteinander verbunden und in einer eigenen SCADA Engine visualisiert. Die Architektur setzt sich aus einer Fertigungsstraße, Delta Roboter, Kuka Roboter, CNC Energie Messung und IIWA Roboter zusammen (vgl. Abb. 1).



**Abb. 1:** Architektur zur Erstellung des Prototyps im Smart Factory Lab der FH Salzburg

In dieser Prototypisierung werden in definierten Intervallen die OPC UA IoT-Daten der Maschinen ausgelesen und können so in Verbindung mit weiteren IoT-Gebäude-/Rauminformationsdaten gebracht werden. Dazu erfolgt die Strukturierung der Daten in eine harmonisierte und standardisierte Form [(Geo)JSON] mit der Implementierung eines Extract-Transform-Load (ETL) Workflows mittels dem Open-Source-Softwareframework Node-RED<sup>5</sup> (vgl. Abbildung 2). In Node-RED lassen sich s. g. „Nodes“ kombinieren, um Daten aus verschiedenen Quellen abzufragen, zu transformieren, zu strukturieren, zu verlinken, zu speichern und an unterschiedliche Schnittstellen weiterzuleiten. Im konkreten Fall werden die IoT-Daten in dem entwickelten Node-RED Flow über einem HTTP Request – *pull* mit einer Frequenz von einer Minute – von den Sensor Services (OPC UA und Home Automation [Homeatic]) in das definierte (Geo-)JSON-Format transformiert. Mit eigenen JavaScript-Codeerweiterungen werden die notwendigen semantischen Erweiterungen und Geocodierungen (bei stationären Sensoren) auf Basis der Geräte-ID ergänzt und für die Weiterverarbeitung einem Webservice über MQTT und/oder dem WebSockets Protokoll nach dem Push-Prinzip weitergeleitet.



**Abb. 2:** Workflow zur Zusammenführung von IoT-Daten in eine Webkarte

<sup>5</sup> <https://nodered.org/>

Mit diesem Workflow lassen sich die räumlich-zeitlich harmonisierten IoT-Daten z. B. in einer 4D-Webview gemeinsam in einem Map-Dashboard visualisieren und mit einem weiteren Transformer standardisiert nach OGC SensorThings API Service (z. B. Frost Server<sup>6</sup>) für weitere Analysen archivieren. Zusätzlich werden Gebäude- und Umgebungsdaten als Web Services über ArcGIS Online bereitgestellt und gemeinsam mit den Sensordaten in der 4D-Webkarte integriert.

## 4.2 Simulation der Be-/Entladung eines Holz-LKWs mit einem digitalen Ladekran-Zwilling

Als weiterer Prototyp wurde die Simulation der digitalen Abbildung eines Ladekrans gewählt. Die dafür notwendigen Kran-Telemetriedaten wurden in einer .csv-Datei mit Zeitstempel bereitgestellt und entsprechend geosemantisch, mit Sensorinformationen und der Ausgangsposition des Kranes angereichert und in die im Zuge dieses Projektes definierte JSON-Struktur transformiert. Die Anreicherung erfolgte in diesem Fall mittels eines SAFE FME Spatial ETL<sup>7</sup> Workflows, wobei hier für die 4D-Visualisierung zusätzlich ein 4D-Esri-Multipatch (Esri, 2008) für die digitale Abbildung eines Kranes generiert wurde. Für diese Multipatch-Berechnungen (Auflösung 1 Hz) wurde aus den verschiedenen mit IoT gemessenen Winkeln der Krankomponenten mit trigonometrischen Funktionen die raumzeitliche Positionen von Kranarm und Krankopf ermittelt. Nachfolgend wurde aus den ermittelten Punkten im Raum 3D-Linien erzeugt, welche abschließend nach Zeitstempel geordnet in einem „time-enabled“ Datensatz gespeichert bzw. als Feature Service veröffentlicht wurden und so die Simulation des Kranes selbst als Digitalen Zwilling ermöglichen. Der 4D-Kransimulations-Demonstrator für „aWHEREness:lab“ wurde als clientseitige 4D-Webkarte (ArcGIS API for JavaScript 4.19) mit Zeitanimation umgesetzt. Dieser Prototyp beinhaltet die digita-



**Abb. 3:** Prototypische 4D-Krandatensimulation als interaktive Webkarte mit Zeitschieberegler (nach zweitem Ladevorgang mit GNSS-Krandaten und Kran-Telemetriedaten im Vergleich)

<sup>6</sup> <https://www.iosb.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/frostserver.html>

<sup>7</sup> <https://www.safe.com/fme/key-capabilities/spatial-ctl/>

len, aufbereiteten Telemetriedaten und zusätzlich aufgenommene GNSS-Sensordaten des Kranes. Mit einem Zeitschieberegler kann damit die exakte Position des Kranes simuliert werden. Der LKW und die Umgebung wurden als 3D-Mesh-Modell aus Drohnenbefliegungen berechnet und in die 4D-Darstellung integriert.

### 4.3 Zusammenfassung

Zur Validierung der Datenstruktur wurden mehrere Demonstratoren entwickelt von denen zwei (vgl. Kapitel 4.1 und 4.2) näher vorgestellt wurden. Die Industrie-IoT-Messdaten konnten in den verschiedenen Use Cases des Projektes inhaltlich aussagekräftig für die raumzeitliche Visualisierung und Simulation angereichert, sowie für die weiterführende Verwertung standardisiert nach OGC SensorThings API (mit leichtem Informationsverlust) archiviert werden. Die harmonisierten IoT-Messdaten konnten mit entsprechenden Transformationsmodellen und -workflows mit einer bewussten Vermengung von Open Source und kommerziellen Werkzeugen in 4D-Web-Maps integriert werden. Die, an die OGC SensorThings API angelehnte GeoJSON Kodierung (vgl. Tabelle 1) ist sehr gut für die einfache Integration in ebenfalls prototypisierte 4D-Web-Maps geeignet und kann aufgrund ihrer einfachen Struktur sehr leicht für weiterführende Verarbeitungen verwendet werden.

## 5 Diskussion

Ziel der Forschungsarbeiten war es aufzuzeigen, dass mit einer gezielt gewählten geosemantischen Erweiterung und harmonisierten Kodierung von industriellen IoT-Daten und deren raumzeitlicher Verlinkung ein Brückenschlag der realen Welt zur digitalen 4D-GIS-Kommunikation in naher Echtzeit und zu weiterführenden Verwendung in Analyse- und Simulationswerkzeugen erreicht werden kann. Die Validierung erfolgte anhand beispielhafter Prototypisierungen, von denen zwei – Verlinkung von industriellen IoT-Daten mit Gebäude- und Umgebungsdaten (SCADA zu GIS) und die Verwertung als digitaler Kranzwilling in einer Simulation – vorgestellt wurden. Diese vielversprechenden Ergebnisse und zeigen neue Anwendungsfelder für die Geoinformatik im Kontext Industrie 4.0 auf, da es gelang, erfolgreich Sensormessungen aus unterschiedlichen industriellen IoT-Anwendungsdomänen, basierend auf verschiedenen Industriestandards in Anlehnung an die OGC SensorThings API aus der Umweltdomäne zusammenzuführen und gemeinsam, ohne zusätzlichen Transformationsaufwand zu verarbeiten. Erleichtert wurde dies dadurch, dass die untersuchten IoT-Industriestandards vornehmlich die Übertragungsprotokolle und Wege, aber kaum die Struktur bzw. die Inhalte selbst standardisieren. Konzepte wie SA-OPC-UA (Katti, Ruskowski, Plociennik, & Schweitzer, 2018), zeigen jedoch bereits klar die Notwendigkeit der Integration von Semantik für Maschinendaten im Industriekontext auf. Räumliche und semantische Erweiterungen der industriellen IoT-Daten unterstützen eine intuitive 4D-Visualisierung, liefern eine kompakte Beschreibung von Messsystem, Messung und quantitativen Qualitätsparametern und öffnen damit zusätzliche Möglichkeiten für die übergreifende Verwendung dieser IoT-Messdaten. Wie in RAMI 4.0 als zentrale Herausforderung formuliert, können die Zustände der wesentlichen Assets in Industrie 4.0 an bestimmten Orten und Zeiten während des gesamten Lebenszyklus mit der in diesem Beitrag vorgestellten GeoJSON-Kodierung beschrieben werden.

## Danksagung

Die in diesem Beitrag präsentierten Inhalte wurden im Rahmen des WISS 2025 Projektes „aWHEREness:lab“ erarbeitet. Besonderer Dank gilt unseren Industrie-Projektpartnern für das laufende Feedback, die Möglichkeit der Datenaufnahmen des Industrieareals und der Bereitstellung ihrer eigenen Datenbestände.

## Literatur

- Bakakeu, R. J., Brossog, M., Bär, S., & Schäfer, F. (2019). *Automated Reasoning and Knowledge Inference on OPC UA Information Models*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Romuald-Bakakeu/publication/332849543\\_Automated\\_Reasoning\\_and\\_Knowledge\\_Inference\\_on\\_OPC\\_UA\\_Information\\_Models/links/5ccc9dd392851c4eab80fd40/Automated-Reasoning-and-Knowledge-Inference-on-OPC-UA-Information-Models.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Romuald-Bakakeu/publication/332849543_Automated_Reasoning_and_Knowledge_Inference_on_OPC_UA_Information_Models/links/5ccc9dd392851c4eab80fd40/Automated-Reasoning-and-Knowledge-Inference-on-OPC-UA-Information-Models.pdf).
- BKG (2022). *Wir geben Orientierung – Deutschland in 3D – der „Digitale Zwilling“*. Retrieved from [https://www.bkg.bund.de/SharedDocs/Downloads/BKG/DE/Downloads-DE-Flyer/BKG-Imagebroschuere.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](https://www.bkg.bund.de/SharedDocs/Downloads/BKG/DE/Downloads-DE-Flyer/BKG-Imagebroschuere.pdf?__blob=publicationFile&v=11).
- Brickenstein Hofschen, M. (1. 10 2019). *Meet the New MQTT 5 Protocol – MQTT 5 Essentials Part 1*. Retrieved from <https://www.hivemq.com/blog/mqtt5-essentials-part1-introduction-to-mqtt-5/>.
- Bröring, A., Echteroff, J., Jirka, S., Simonis, I., Everding, T., Stasch, C., ... & Lemmens, R. (2011). New Generation Sensor Web Enablement. *Sensors*, 2652–2699.
- Cox, S. (2011). *ISO 19156:2011 – Geographic information – Observations and measurements*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/262936936\\_ISO\\_191562011\\_-\\_Geographic\\_information\\_-\\_Observations\\_and\\_measurements](https://www.researchgate.net/publication/262936936_ISO_191562011_-_Geographic_information_-_Observations_and_measurements).
- Esri (2008). *The Multipatch Geometry Type – An ESRI White Paper*. Retrieved from [https://downloads.esri.com/support/whitepapers/ao\\_/J9749\\_MultiPatch\\_Geometry\\_Type.pdf](https://downloads.esri.com/support/whitepapers/ao_/J9749_MultiPatch_Geometry_Type.pdf).
- Fraile, F., Sanchis, R., Poler, R., & Ortiz, A. (2019). Reference Models for Digital Manufacturing Platforms. *Applied Sciences*, 25. doi:<https://doi.org/10.3390/app920443>.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. *Working Paper*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Mario-Hermann-2/publication/307864150\\_Design\\_Principles\\_for\\_Industrie\\_40\\_Scenarios\\_A\\_Literature\\_Review/links/57cfd2fb08aed6789701cbeb/Design-Principles-for-Industrie-40-Scenarios-A-Literature-Review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mario-Hermann-2/publication/307864150_Design_Principles_for_Industrie_40_Scenarios_A_Literature_Review/links/57cfd2fb08aed6789701cbeb/Design-Principles-for-Industrie-40-Scenarios-A-Literature-Review.pdf).
- IETF (2017). *The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format*. Retrieved from <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8259#section-4>.
- ISO (2016a). *ISO/IEC 20922:2016 – Information technology – Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1*.
- ISO/TS 15143-3:2016 (2016). *Earth-moving machinery and mobile road construction machinery – Worksite data exchange – Part 3: Telematics data*. Technical Committee ISO/TC 127/SC 3. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/67556.html>.

- Katti, B., Ruskowski, M., Plociennik, C., & Schweitzer, M. (2018). SA-OPC-UA: Introducing Semantics to OPC-UA Application Methods. *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 1189–1196).
- Kim, M. (2017). Research issues and challenges related to Geo-IoT platform. *Spatial Information Research*, 26(1), 113–126.
- Konradin Mediengruppe (2019). *Digitalisierung in der Baubranche*. Retrieved from <https://industrie.de/top-list/digitalisierung-in-der-baubranche/>.
- Mittlböck, M., Vockner, B., Lukic, S., & Kranzer, S. (2013). Smart Environmental Monitoring – standardisierte Kopplung von SCADA- und GIS-Systemen. In: J. Strobl, T. Blaschke, G. Griesebner & B. Zagel (Eds.), *Angewandte Geoinformatik* (pp. 261–266). Berlin/Offenbach: Wichmann.
- MQTT.org (2020). *MQTT: The Standard for IoT Messaging*. Retrieved from <https://www.mqtt.org>.
- OGC 12-006 (2012). OGC® Sensor Observation Service Interface Standard. In: Bröring, A., Stasch, C. & Echterhoff, J. (Eds.): *OpenGIS® Implementation Standard, Version 2.0*. OGC 12-006. Retrieved from <https://www.ogc.org/standards/sos>.
- OGC (2021). *OGC SensorThings API Part 1: Sensing Version 1.1*. Retrieved from <https://www.ogc.org>: <https://docs.ogc.org/is/18-088/18-088.pdf>.
- Percivall, G., Reed, C., & Davidson, J. (2017). *OGC Sensor Web Enablement: Overview And High Level Architecture*. Open Geospatial Consortium.
- PLCopen and OPC Foundation (2018). *OPC UA Information Model 1.01*. Retrieved from [https://plcopen.org/system/files/downloads/plcopen\\_opcua\\_information\\_model\\_for\\_iec\\_61131-3\\_version\\_1.01.09.pdf](https://plcopen.org/system/files/downloads/plcopen_opcua_information_model_for_iec_61131-3_version_1.01.09.pdf).
- Reed, C., Botts, M., Percivall, G., & Davidson, J. (2013). *OGC® Sensor Web Enablement: Overview And High Level Architecture*.
- Russom, M. (2020). *Connecting urban environments with IoT and Digital Twins*. Retrieved from <https://azure.microsoft.com/pt-pt/blog/connecting-urban-environments-with-iot-and-digital-twins/>.
- W3C (16.07.2020). *JSON-LD 1.1 – A JSON-based Serialization for Linked Data*. Retrieved from <https://www.w3.org/TR/json-ld11/>.