

Maschinenlesbare RDF Ontologien und Vokabulare aus dem Bereich der industriellen Fertigung

Konrad Abicht
k.abicht@gmail.com

11.06.2024

Zusammenfassung

Einleitung: Aktuell gibt es keine geprüfte Liste mit maschinenlesbaren, öffentlich-zugänglichen RDF-Ontologien und -Vokabularen mit Bezug zum Themengebiet der industriellen Fertigung. Ähnliche Arbeiten, wie IndustryPortal, sind teilweise Community-getrieben und besitzen keine Prüfung der Metadaten, wodurch es zu Widersprüchen zwischen den Angaben auf dem Portal und in den RDF-Daten kommt. Eine solche Liste wird benötigt, um den Zugang zu den Ontologien zu erleichtern, damit interessierte Personen und Institutionen sich nicht erst die im Internet verstreuten Fakten zusammen suchen müssen.

Methodik: Es wurde im Zeitraum vom **01.11.2023 - 03.04.2024** eine Internet- und Literaturrecherche durchgeführt und eine Liste mit allen thematisch passenden und referenzierten Ontologien und Vokabularen im Form einer CSV-Datei erstellt (stark vereinfachte Variante im Anhang). Zu jeder Ontologie wurden eine Reihe von Metadaten erfasst (z.B. Name, Kurzbeschreibung, Projektseite, Version, letzte Änderung und Lizenz). Es wurden alle Ontologien ignoriert, zu denen es zwar wissenschaftliche Publikationen gibt, jedoch keine öffentlich zugänglichen RDF-Daten. Weitere Auswertungen sind am Ende der Publikation zu finden.

Resultate: Im Rahmen der Recherche wurden **217** Ontologien bzw. Vokabulare für den Themenbereich industrielle Fertigung (und angrenzende Themengebiete) gefunden. Nur **50** Ontologien besitzen vollständige Metadaten, bei dem Rest (N=167) konnte mindestens ein Metadatum nicht ermittelt werden. **180** Ontologien stehen unter einer freien bzw. Open Source Lizenz zur Verfügung. Eine dereferenzierbare Ontologie URI konnte bei **178** Ontologien nachgewiesen werden.

Diskussion: Die Untersuchung wurde lediglich über einen Zeitraum von 5 Monaten durchgeführt. Weiterhin wurde der thematische Fokus industrielle Fertigung in einem weiten Sinne betrachtet, wodurch möglicherweise auch thematisch nicht passende Ontologien einbezogen wurden. Es gab zudem auch Fehler beim Auslesen mancher RDF-Dateien, wodurch eine manuelle Auswertung nötig war.

Fazit: Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit ist eine händisch geprüfte Liste von Ontologien, die frei zugänglich sind und damit potenziell in eigenen Projekten zum Einsatz kommen könnten. Daneben gibt es eine Auswertung zu den Rechercheergebnissen, wodurch Rückschlüsse zum Zustand der betrachteten Ontologien gezogen werden können. Aufgrund der frei zugänglichen Forschungsdaten können nachfolgende Untersuchungen leichter durchgeführt werden.

Alle erstellten Forschungsdaten stehen unter der Lizenz Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY 4.0) in dem folgenden Github-Repository für die Öffentlichkeit zur freien Verwendung zur Verfügung:

<https://github.com/k00ni/manufacturing-industry-ontology-list>

1 Einleitung

Die Metadaten zu formalen Ontologien und Vokabularen sind aktuell weit verstreut im Internet. Aus diesem Grund ist eine umfassende Recherche nach Ontologien für ein konkretes Themengebiet oft mühsam und zeitraubend. Man muss für einen vollständigen Blick neben Seiten mit Spezifikationen und wissenschaftlichen Publikationen auch verschiedene Ontologie-Portale konsultieren. Für den durchschnittliche Domain Experten stellt das eine hohe Hürde da, weil häufig nicht das Hintergrundwissen in den Formalen Ontologien und Semantic Web Technologien vorhanden ist [9].

Es fehlt an Brücken zwischen den Formalen Ontologien, OWL-Ontologien und den verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen. Diese Arbeit soll eine solche Brücke für die Bereiche OWL-Ontologien und industrielle Fertigung beisteuern. Im Rahmen einer Internet- und Literaturrecherche wurden alle auffindbaren, öffentlich zugänglichen¹ und in RDF vorliegenden Ontologien (und Vokabulare) aus dem Themengebiet der industriellen Fertigung gesammelt. Das Ziel war die Erstellung einer Liste, bestehend aus maschinenlesbaren Ontologien, die eine automatisierte Verarbeitung des modellierten Wissens erlauben (z.B. Training einer KI oder OWL Reasoning). Interessenten können somit thematisch passende Ontologien aus der Liste auswählen, sich die RDF-Daten herunterladen und z.B. mit eigenen Axiomen ergänzen. Bis zu diesem Zeitpunkt waren solche Testbeds/Experimente nur sehr begrenzt und mit hohem technischen Aufwand möglich.

Die Arbeit ist wie folgt strukturiert: Kapitel 2 fasst das notwendige Vorwissen des Lesers zusammen. In Kapitel 3 werden verwandte Arbeiten und Projekte vorgestellt. Die Methodik wird im Detail in Kapitel 4 vorgestellt. In Kapitel 5 erfolgt die Auswertung der Rechercheergebnisse. In Kapitel 6 folgt eine kurze Diskussion und Kapitel 7 schließt mit einem Fazit und Ausblick ab.

2 Fachlicher Hintergrund

In diesem Kapitel werden die notwendige Vorkenntnisse für diese Arbeit kurz zusammengefasst.

2.1 Konzepte und Technologien des Semantic Web

Das Resource Description Framework (RDF)² ist ein Model für Datenaustausch im Internet. RDF erweitert die Link-basierte Struktur des Internets. In diesem Zusammenhang spielen URLs, URIs und IRIs eine wichtige Rolle. URL steht für Uniform Resource Locator und gibt eine Adresse einer Resource im Internet an. Jede URL kann als Uniform Resource Identifier (URI) angesehen werden. Man nutzt URIs zur Identifikation von abstrakten oder physischen Ressourcen. URIs dürfen nur aus ASCII-Zeichen bestehen, weshalb man irgendwann Internationalized Resource Identifiers (IRI) eingeführt hat. Der Begriff Dereferenzierbarkeit spielt im Rahmen dieser Arbeit eine wichtige Rolle. Eine URL (URI, IRI) wird dereferenzierbar genannt, wenn man sie aufrufen kann und eine valide Antwort erhält (z.B. RDF-Daten für eine gegebene Ontologie IRI). Die Web Ontology Language (OWL) baut auf RDF auf und ist eine Spezifikation des W3C, um Ontologien formal beschrieben und verteilen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit wird sich auf Ontologien im Dateiformat RDF/Turtle bzw. RDF/XML fokussiert.

2.2 Ontologien und Kontrollierte Vokabulare

Im Rahmen dieser Arbeit lag der Fokus auf maschinenlesbaren RDF Ontologien und Vokabularen. Maschinenlesbarkeit ist gegeben, wenn die Ontologie in Textform (z.B. Textdatei in einer RDF-Notation) vorliegt und die Datei über eine URL abgerufen werden kann. Die Ontologie muss zudem ein Vokabular zur Beschreibung des Fachgebietes bereitstellen und eine logische Theorie (z.B. in Form von Axiomen, Regeln, Hierarchien) über das Fachgebiet zugrunde legen, die auf das Vokabular zurückgreift. In der Praxis sind die Ontologien bei diesem Punkt manchmal lückenhaft, weshalb die Theorie nur in Ansätzen erkennbar sein muss.

Diese Kriterien basieren größtenteils auf den Ausführungen von Fabian Neuhaus aus [7], mit ein paar Ergänzungen. **Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Ontologie auch für Vokabulare genutzt, außer es wird explizit darauf hingewiesen.** Der Grund für diese Festlegung sind die

¹RDF-Dokument ist über eine URL abrufbar.

²<https://www.w3.org/RDF/>

Rechercheergebnisse, die zeigen, dass manche Autoren ihre eigenen Arbeiten sowohl als Ontologie als auch Vokabular bezeichnen. Zum Beispiel bezeichnet Martin Hepp GoodRelations als standardisiertes Vokabular für Produkte, Preise und Unternehmensdaten, nutzt jedoch Ontologie als Quasi-Synonym, siehe das folgende Zitat: "*GoodRelations is a standardized vocabulary (also known as "schema", "data dictionary", or "ontology") for product, price, store, and company data that can [...]*"³.

2.2.1 Ontologiearten

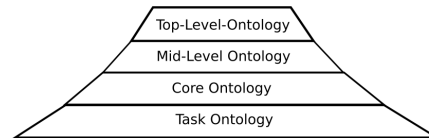


Figure 1: Ontology Types

Die Rechercheergebnisse zeigten, dass die Ontologie-Autoren ihre Arbeiten überwiegend nach der etablierten Vierteilung einordnen. Zuerst kommen die **Top-Level Ontologien** (Synonyme: Upper Ontology, Foundational Ontology). Sie beinhaltet fachgebiets-unabhängige Inhalte (Begriffe, Relationen, Axiome etc.) zur Beschreibung eines Ausschnitts der Realität. Zu den bekanntesten gehören Suggested Upper Merged Ontology (SUMO), Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering (DOLCE) und Basic Formal Ontology (BFO). Es folgt die Ebene der **Mid-Level Ontologie**, welche die Inhalte der Top-Level Ontologie ergänzt bzw. verändert. Sie besitzen einen geringen thematischen Bezug und dienen als inhaltliche Brücke zwischen einer Top-Level Ontologie und ihr direkt untergeordneten Kern- bzw. Task-Ontologien. Danach folgt die Ebene der **Kern Ontologie** (Synonyme: Core Ontology, Domain Ontology). Ihr Inhalt bezieht sich stärker auf ein Fachgebiet oder sie ergänzt die Inhalte anderer Ontologien. Unter den Kern-Ontologien folgt die **Task-Ontologie** (Synonyme: Application Ontology). Sie nutzt in der Regel die Inhalte von Ontologien höherer Ebenen und stellt eigene Inhalte für einen konkreten Anwendungsfall bereit.

Als Nutzer der hier vorgestellten Ontologien sollte man wissen, auf welcher Ebene sich eine Ontologie befindet. Das impliziert die inhaltliche Ausprägung und etwaige Abhängigkeiten, die bei der späteren Verarbeitung eine Rolle spielen. So übernimmt eine Kern Ontologie die Theorie einer Top-Level Ontologie (inkl. aller Implikationen), was bei Nichtbeachtung später z.B. zu Widersprüchen mit eigenen Axiomen führen kann.

2.2.2 Ontology Design Pattern (ODP)

Ontology Design Pattern (ODP) sind kleine unabhängige Ontologien, die einen sehr begrenzten Themenbereich modellieren und dabei einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit und Kombinierbarkeit mit anderen ODPs und Modellierungsansätzen besitzen [4]. Es besteht keine Beschränkung für deren Aufbau, Struktur und Ausrichtung. Die ODPs lassen sich auch in die vorgestellte Vierteilung der Ontologien entsprechend einordnen.

2.3 Lizenzinformationen

Zu jeder Ontologie wurde die zugehörige Lizenz recherchiert. Sie bestimmt die rechtlichen Rahmenbedingungen unter denen eine Ontologie benutzt werden darf. Man sollte als Leser ein grobes Verständnis über die Inhalte freier Lizenzen wie den Creative Commons Lizenzen haben.

3 Verwandte Arbeiten

Es konnten keine Vorarbeiten gefunden werden, bei denen eine geprüfte Liste an Ontologien aus dem Themenbereich der industriellen Fertigung bzw. der Industrie im Allgemeinen erstellt wurde. Jedoch gibt es ein paar Onlinedienste und wissenschaftliche Publikationen, die ähnliche Anstrengungen betreffen.

³Quelle: <https://www.heppnetz.de/ontologies/goodrelations/v1.html>

3.1 IndustryPortal

IndustryPortal [1] (<https://industryportal.enit.fr/ontologies>) ist eine Open Source Plattform für die Entwicklung, Publikation und Pflege von Ontologien aus dem Themenbereich Industrie, welche im Rahmen des OntoCommons-Projektes⁴ entwickelt wurde. Auf der Plattform können registrierte Benutzer u.a. neue Ontologien eintragen und bestehende Metadaten verändern⁵. Es wurden keine Angaben gefunden, die auf eine Überprüfung solcher Einreichungen hinweisen.

Die Hauptunterschiede zwischen IndustryPortal und dieser Arbeit liegen in der Methodik und dem Datenumfang. Es konnte mehrfach nachgewiesen werden, dass Metadaten in IndustryPortal in manchen Fällen unvollständig sind bzw. im Widerspruch zu den RDF-Daten stehen. Als Beispiel ist die Ontologie mit dem Namen "Industry 4.0 Knowledge Graph"⁶ zu nennen. Dieser Name weicht von dem ab, der in den RDF-Daten verwendet wird: "Industrial IoT Architecture Ontology" (dcterms:title als Property). Es enthält zum aktuellen Zeitpunkt⁷ 109 Ontologien für den Themenbereich Industrie im weitesten Sinne. Im Rahmen dieser Arbeit wurden jedoch über 217 Ontologie allein im erweiterten Themenbereich industrielle Fertigung ermittelt. Am 03.04.2024 wurde festgestellt, dass bei manchen Ontologien die hinterlegten RDF-Daten von RDF/XML in Turtle geändert wurden⁸. Der Download-Link trägt den Titel "OWL" und sagt daher nichts über die RDF-Notation aus. Jedoch irritiert es und stört Implementierungen, wenn hinterlegte Verlinkungen über die Zeit die Syntax der Daten ändern.

Trotz dieser Beobachtungen ist IndustryPortal eine wertvolle Quelle, denn sie stellen kostenfrei eine Infrastruktur bereit, die eine langfristige Verbesserung der Ontologien und zugehörigen Metadaten erlaubt.

3.2 OntoCommons Ontology Catalogue

Der OntoCommons Ontology Catalogue⁹ wurde im Rahmen des OntoCommons-Projektes erstellt und wird scheinbar weiterhin gepflegt. Jeder kann über ein Online-Formular¹⁰ Ontologien für die Liste vorschlagen. Aktuell¹¹ enthält die Liste nur 37 Ontologien, die sich fokussieren auf die Themenbereiche industrielle Fertigung, Materialien und Bauwesen. Der Umfang und die Qualität der Metadaten je Ontologie schwanken ebenfalls. Bei manchen Ontologien ist kein Link auf die RDF-Daten angegeben, womit sich die Frage stellt, warum diese überhaupt erwähnt werden¹².

3.3 Wissenschaftliche Publikationen

Ontologies for Industry 4.0 Aufgrund der hohen thematischen Übereinstimmung wurde die Publikation [5] aufgenommen. Die Autoren geben zuerst eine kurze Einführung in die Themengebiete Industrie 4.0, Factory 4.0 und Smart Manufacturing und zählen danach relevante Herausforderungen in diesem Zusammenhang auf, z.B. Mensch-Maschine-Kommunikation oder Datenanalyse. Später im Papier werden zu diesen Themenbereichen passend die folgenden 4 Ontologien vorgestellt:

1. **CORA:** Core Ontology for Robotics and Automation
2. **ROA:** The Ontology for Autonomous Robotics¹³
3. **ORArch:** Ontology for Robotic Architecture
4. **O4I4:** Ontology for Industry 4.0

Leider gaben die Autoren keine Links auf die zugehörigen RDF-Daten an, wodurch die Ontologien eigentlich nicht im Scope dieser Arbeit sind. Jedoch konnte im Rahmen der Recherche ein Link auf die RDF-Daten der CORA Ontologie ermittelt werden¹⁴.

⁴<https://ontocommons.eu/>

⁵<https://industryportal.github.io/>

⁶<https://industryportal.enit.fr/ontologies/I40KG>

⁷28.03.2024

⁸z.B. <https://industryportal.enit.fr/ontologies/OMPD-CMT0>, siehe OWL-Download-Link

⁹<https://data.ontocommons.linkeddata.es/index>

¹⁰<https://ontocommons.eu/node/146>

¹¹28.03.2024

¹²Beispiel "MPFQ Ontology (Material-Process-Function-Quality)":

[https://data.ontocommons.linkeddata.es/vocabulary/MpfqOntology\(material-process-function-quality\)](https://data.ontocommons.linkeddata.es/vocabulary/MpfqOntology(material-process-function-quality))

¹³In der zugehörigen Publikation[8] kürzen die Autoren die Ontologie jedoch mit ORA ab.

¹⁴<https://github.com/srfiorini/IEEE1872-owl>

Where to Publish and Find Ontologies? A Survey of Ontology Libraries Die Autoren des Papiers [2] geben einen Überblick über Ontologie-Bibliotheken (inkludiert auch Ontology Directory, Ontology Repository, Ontology Archive). Diese Publikation ist relevant, weil sie weiterhin nutzbare Ontologie-Bibliotheken auflistet. Neben Metadaten wie Name, Lizenz und die neuste Version, werden häufig auch die zugehörigen RDF Daten bereitgestellt. Die folgenden Portale wurden erwähnt und werden nach eigener Prüfung weiterhin als nutzbar angesehen:

1. BioPortal (<https://bioportal.bioontology.org/>, Themengebiete: Biomedizin)
2. OBO Foundry (<https://obofoundry.org/>, Themengebiete: Biologie und Biomedizin)
3. oeGOV (<http://www.oegov.us/>, Themengebiet: e-Government)
4. Ontology Lookup Service (<https://www.ebi.ac.uk/ols4>, Themengebiete: Biomedizin)
5. Ontology Design Patterns (http://ontologydesignpatterns.org/wiki/Main_Page, viele Themengebiete, siehe auch <http://ontologydesignpatterns.org/wiki/Community:Domain>)
6. ONKI ontology server (<https://onki.fi/en/>, verschiedene Themengebiete)

Für diese Arbeit sind Ontologie-Bibliotheken, wie hier aufgelistet, unerlässlich. Sie decken zwar nur ein begrenztes Themengebiet ab, bieten in der Regel aber leichte Zugänglichkeit (z.B. mit Suchfunktion und Listen). Meine Rechercheergebnisse bestätigen die Beobachtungen der Autoren, nämlich dass es oft unvollständige Angaben zur Weiterverwendung und Lizenzierung von Ontologien gibt.

4 Methodik

Es wurde eine Literatur- und Internetrecherche im Zeitraum **01.11.2023 - 03.04.2024** durchgeführt und die passenden Ontologien in einer CSV-Datei gesammelt. Es wurde das CSV-Format gewählt, weil CSV-Dateien einfach zu parsen sind und in jeder gängigen Programmier- und Skriptsprache unterstützt werden. Aufgrund des beschränkten Platzes wurde im Anhang lediglich eine stark gekürzte Variante der Ontologie-Liste eingefügt. Sie enthält zu jeder Ontologie den Namen und die zugehörige Projektseite bzw. RDF-Daten. Die vollständige Fassung entnehmen Sie bitte dem eingangs erwähnten Github-Repository. Bei der gesamten Recherche waren nur deutsch- und englischsprachige Inhalte von Interesse.

4.1 Forschungsfragen

Die folgenden Forschungsfragen wurden bei der Erstellung der Liste zugrunde gelegt:

1. Welche Ontologien für das Fachgebiet industrielle Fertigung (im weitesten Sinne) gibt es?
2. Welche dieser Ontologien werden aktiv betreut bzw. wann war die letzte dokumentierte Aktivität im Projekt?
3. Welche lizenzrechtlichen Regelungen muss man beim Einsatz einer Ontologie beachten?

4.2 Thematische Abgrenzung

Die industrielle Fertigung ist thematisch sehr breit aufgestellt und viele Themenbereiche, wie Fertigungsverfahren, Mess- und Prüftechnik und Automatisierung spielen dabei eine wichtige Rolle. Zusätzlich gibt es eine Reihe von Trends, welche häufig interdisziplinär aufgestellt sind und vollkommen neue Themengebiete einbringen (z.B. Big Data beim Smart Manufacturing). Es war nicht einfach bei dieser Ausgangslage eine thematische Abgrenzung zu erstellen. Ich entschied mich, relevante Schlüsselwörter für die Suche zu erarbeiten, weil sich Ontologien häufig in Onlinediensten befinden, die eine Schlüsselwort-basierte Suche besitzen. Im Folgenden die finale Liste an Schlüsselwörtern:

Sie repräsentieren zentrale Konzepte der industriellen Fertigung sowie angrenzenden Themengebieten / Trends. Es wurde hier ein Mittelweg zwischen thematischer Genauigkeit und Handhabbarkeit angestrebt. Die meisten Onlinedienste besaßen an sich schon wenige Ontologien, weshalb die Suche mit weiteren Schlüsselwörtern oft nicht nötig war, um den gesamten Bestand zu sichten.

building	defect	digital twin	factory
industry	machine	manufacturing	product
sensor	supply chain		

4.3 Recherchequellen

Die Ontologieentwicklung hat starke wissenschaftliche Wurzeln, daher wurde mit der Sichtung der wissenschaftlichen Publikationen begonnen, die eine Ontologie und ihre Inhalte näher vorstellen. **Google Scholar**¹⁵ kam bei der Recherche zum Einsatz. Für die Internetsuche wurde **Google Search** verwendet.

4.3.1 Dezidierte Onlinedienste

Die folgende Liste enthält alle Onlinedienste, die im Rahmen der Recherche genutzt wurden:

1. **AURORAL Ontologien** (<https://auroral.iot.linkeddata.es/index.html>) - Liste von Ontologien, die für das AURORAL Projekt (<https://www.auroral.eu/#/>) entwickelt wurden. Es enthält u.a. Ontologien zum Thema Ladestationen und Energiekonsum.
2. Projektseite der **Basic Formal Ontology** (kurz BFO, <https://basic-formal-ontology.org/users.html>) - Liste von Ontologie-Projekten, die die BFO nutzen.
3. **BioPortal** - Ontologie-Portal mit über 1094 Ontologien, vordergründig aus dem biomedizinischen Themenbereich¹⁶.
4. **Basic Register of Thesauri, Ontologies & Classifications** (kurz BARTOC, <https://bartoc.org>) - Eine Webseite mit angebundener Suchmaschine, die Knowledge Organization Systems, Vokabulare und Ontologien auflistet. Es wurden ausschließlich OWL Ontologien verwendet. Einträge, die nicht in Deutsch oder Englisch vorlagen wurden automatisch übersetzt und geprüft.
5. **EU Vocabularies** (<https://op.europa.eu/en/web/eu-vocabularies/controlled-vocabularies>) - Eine Webseite u.a. mit Ontologien und Vokabularen, bereitgestellt von der Europäischen Union (bzw. einer ihr unterstellten Institution).
6. **Github** (<https://www.github.com>) - Ein Onlinedienst zur Softwareentwicklung, der jedoch sehr häufig als Ort für Ontologie-Projekte genutzt wird.
7. **IndustryPortal** (<https://industryportal.enit.fr/>) - Ontologie-Portal mit über 109 Ontologien¹⁷ aus der Industrie und angrenzenden Themenbereichen.
8. **Linked Open Vocabularies** (<https://lov.linkeddata.es/dataset/lov/>) - Ein kuratierter Katalog von Vokabularen und Ontologien zur Beschreibung von Daten im Internet.
9. **OntoCommons Ontology Catalogue** (<https://data.ontocommons.linkeddata.es/index>) - Manuell kuratierte Liste mit Ontologien aus den Themenbereichen Industrie, Produktion, Materialwissenschaften, Bauwirtschaften und weiteren.
10. **ShowVoc** (<https://showvoc.op.europa.eu/>) - Ein Portal mit einer Liste von Ontologien, Vokabularen und anderen. Es wurden nur die Ontologien ausgewertet.

Es wurden die Suchergebnisse für jedes Schlüsselwort näher untersucht, insofern sie von einer Ontologie handelten. Für den Fall, dass es neben Ontologien und Vokabularen noch andere Typen gab, so wurden diese Typen ignoriert.

¹⁵<https://scholar.google.com/>

¹⁶Geprüft am 26.03.2024

¹⁷Geprüft am 26.03.2024.

4.3.2 Auswertung von Namespaces und owl:import

In Ontologien kommen häufig Namensräume und owl:import-Anweisungen zum Einsatz. Namensräume dienen dazu häufig genutzte URLs abzukürzen. Bei owl:import-Anweisungen signalisiert man, dass die Ontologie auf Inhalte einer referenzierten Ontologie angewiesen ist bzw. diese die Ontologie erweitern. In der Praxis gibt es verschiedene Auslegungen und Implementierungen¹⁸. Im Rahmen dieser Untersuchung wird von der Annahme ausgegangen, dass Ontologie-Autoren mit der Nutzung von Namespaces und owl:import signalisieren, dass die Inhalte der referenzierten Ontologie auf irgendeine Weise inhaltlich relevant sind.

Aus diesem Grund wurden beide ebenfalls ausgewertet. Referenzierte Ontologien wurden nach den gleichen Kriterien geprüft und entsprechend eingeordnet.

4.4 Auswahlkriterien für eine Ontologie

Eine Ontologie musste für die Aufnahme die folgenden Mindestkriterien erfüllen:

1. Die Ontologie liegt als Textdatei¹⁹ in einer RDF-Notation (RDF/XML oder RDF/Turtle) vor und kann über eine URL heruntergeladen werden.
2. Die Ontologie stellt ein Vokabular zur Beschreibung des Fachgebietes bereit und es liegt eine logische Theorie (z.B. in Form von Axiomen, Regeln, Hierarchien) über das Fachgebiet zugrunde, die auf das Vokabular zurückgreift.
3. Die Inhalte der Ontologie haben einen direkten thematischen Bezug zu den aufgelisteten Schlüsselwörtern bzw. den damit zusammenhängenden Themen.
4. In den RDF-Daten ist mindestens eine Instanz von owl:Ontology zu finden oder mindestens eine Klasse bzw. Property definiert.

Es wurden alle Ontologien (nebst zugehöriger wissenschaftlicher Publikationen) ignoriert, bei denen keine RDF-Daten vorlagen. Ohne die zugehörigen RDF-Daten kann nicht sichergestellt werden, dass eine Ontologie vollständig vorliegt. Davon abgeleitete Arbeiten könnten später zu unerwarteten Fehlern und Widersprüchen führen.

4.5 Erfasste Metadaten zu einer Ontologie

Bei jeder Ontologie wurden die folgenden Metadaten erfasst:

- **Name der Ontologie** - Der Name der Ontologie, der in den RDF-Daten bzw. der zugehörigen Dokumentation zu finden ist.
- **Manufacturing Industry related** - In der Spalte steht "yes", wenn die Ontologie einen direkten thematischen Bezug hat. Alle Ontologien ohne thematischen Bezug, die jedoch referenziert wurden, erhalten in der Spalte "no".
- **Abbreviation** - Die Abkürzung des Namens der Ontologie, sofern vorhanden.
- **Short description** - Eine kurze, prägnante Beschreibung über den Inhalt der Ontologie.
- **Project page or publication** - Eine URL auf die Projektseite, falls vorhanden. Alternativ eine URL zu einer Publikation über die Ontologie oder zu einem Ontologie-Portal mit weiteren Angaben.
- **Ontologie URI** - URI zur Ontologie. Sie ist in der Regel global eindeutig.
- **Latest version** - Falls vorhanden, eine Angabe zur neusten Version der RDF-Daten. Die neuste Version und das Datum der neusten, dokumentierten Änderung hängen nicht zusammen und können vollkommen verschiedene zeitliche Bezüge haben.
- **Latest activity found** - Eine Datumsangabe der neusten und dokumentierten Änderung an den RDF-Daten. Die Änderung kann, muss aber nicht, zeitlich mit der neusten Version zusammenfallen.

¹⁸Gute Ausführungen zum Thema hier: https://protegewiki.stanford.edu/wiki/How_Owl_Imports_Work

¹⁹Das schließt auch dynamisch generierte Textdateien mit ein.

- **RDF/XML file:** Eine URL zu den RDF/XML-Daten der Ontologie, falls vorhanden.
- **RDF/Turtle file:** Eine URL zu den RDF/Turtle-Daten der Ontologie, falls vorhanden.
- **Download location:** Manche RDF-Daten besitzen keinen statischen Download-Link oder sind Teil eines ZIP Archivs. Diese findet man dann hier.
- **Autors/creators** - Eine Liste von Namen der Autoren oder beteiligten Gruppen/Unternehmen. Sollte es keine Angaben zu Autoren geben, werden hier alle Beitragende aufgelistet.
- **License** - Falls vorhanden, eine Angabe zu der verwendeten Lizenz.

Eine Bewertung der Inhalte (z.B. Qualität der RDF-Daten oder genutzte Lizenzen) fand nicht statt. Aufgrund des Umfangs wurde die Liste der Metadaten auf die notwendigsten Angaben beschränkt. Alle Angaben in der zugehörigen CSV-Datei wurden in Englisch erstellt, um eine größtmögliche Zugänglichkeit zu ermöglichen.

Bei der Auswertung der Metadaten wurden zuerst die RDF-Daten geprüft. Waren diese unvollständig, wurde auf die Projektseite zurückgegriffen, falls vorhanden. Waren beide Quelle erfolglos, wurde versucht, die Metadaten über den Onlinedienst zu beziehen, der Daten über die Ontologie bereitstellte. Lagen am Ende zu einem Metadatum immer noch keine Angaben vor, so wurde an der Stelle "Information not available" in der CSV-Datei hinterlegt.

4.6 Inhaltliche Nacharbeiten

Es wurden Einträge in der CSV-Datei **ontologies.csv** inhaltlich angepasst, um ein Mindestmaß an Verständlichkeit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten:

1. Unvollständige oder fehlende Angaben wurden durch Angaben von Ontologie-Portalen ergänzt, sofern klar erkenntlich und inhaltlich passend.
2. Manche Ontologien besaßen keine Angaben zu den Autoren, lediglich Beitragende. In diesem Fall wurden alle Beitragenden in das Autors/creators Feld übernommen.
3. Konnten keine Autoren und Beitragende ermittelt werden (z.B. VDI3682), so wurde versucht den Klarnamen der Autoren über Git-Commits zu ermitteln.
4. Die Versionen und Datumsangaben (der letzten Aktivität) wurden vereinheitlicht, um eine Vergleichbarkeit herzustellen.

4.7 Eingesetzte Programme und Technologien

Im Rahmen der Recherche wurden die folgenden Programme und Technologien eingesetzt:

- **LibreOffice Calc**²⁰ - Das Open Source Tabellenkalkulationsprogramm wurde hauptsächlich für die Bearbeitung der CSV-Datei mit den Ontologien genutzt.
- **PHP**²¹ - Es wurden verschiedene PHP-Skripte für die Datenrecherche und -überprüfung entwickelt und eingesetzt. Alle PHP-Skripte wurden unter PHP 8.3 in einem Docker-Container²² ausgeführt.
- **VSCode**²³ - Alle Arbeiten im Code und gewisse Arbeiten an den CSV-Dateien wurden mit VSCode durchgeführt.

²⁰<https://www.libreoffice.org/>

²¹<https://www.php.net/>

²²<https://www.docker.com/>

²³<https://code.visualstudio.com/>

5 Rechercheergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst. Die Datenbasis bestand aus den **217** Ontologien, die einen thematischen Bezug zur industriellen Fertigung haben.

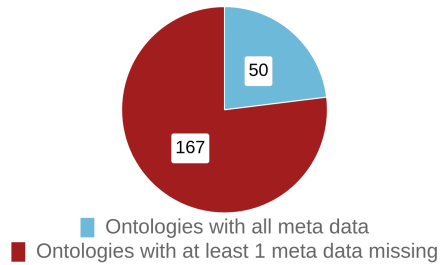


Figure 2

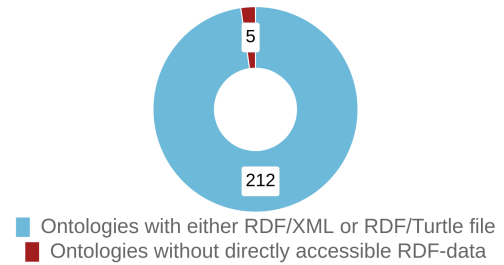


Figure 3

Nur **50** von 217 Ontologien besitzen vollständige Metadaten. Bei dem Rest (N=167) gibt es mindestens ein Metadatum, bei dem der Wert fehlt und es daher "Information not available" beinhaltet.

212 Ontologien besitzen entweder eine per URL abrufbare RDF/XML- oder RDF/Turtle-Datei. Nur bei **5** Ontologien liegen die RDF-Daten zwar vor, der Zugriff benötigt jedoch Zusatzaufwand (z.B. das Entpacken eines ZIP-Archives). Es ist nicht nachvollziehbar, warum die Ontologie-Autoren diese Hürden für die Konsumenten ihrer Ontologie eingebaut haben.

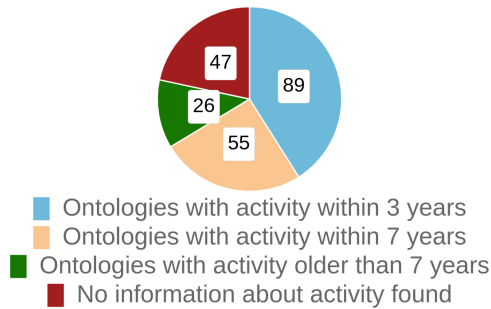


Figure 4

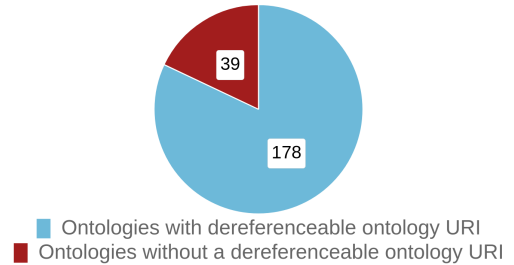


Figure 5

Bei **89** Ontologien konnte eine Projektaktivität (z.B. Git-Commit) innerhalb der letzten 3 Jahre festgestellt werden. Eine Projektaktivität vor über 3 Jahren, aber innerhalb der letzten 7 Jahre, konnte bei **55** Ontologien festgestellt werden. **26** Ontologien besaßen eine Projektaktivität vor über 7 Jahren. Es konnten keine Angaben zur letzten Projektaktivität bei **47** Ontologien gefunden werden.

178 Stück Ontologien besitzen eine dereferenzierbare Ontology URI. Zur Überprüfung der Dereferenzierbarkeit wurde ein HTTP-Request abgesendet und der Response ausgewertet. Als dereferenzierbar wurde eine Ontology URI angesehen, wenn der Response keinen Fehler zurücklieferte.

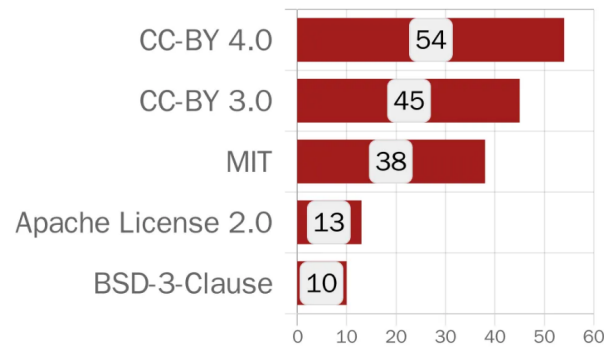


Figure 6: Meist genutzte Lizenzen (min. 10 mal in Verwendung)

180 Ontologien nutzten eine freie bzw. Open Source Lizenz und lediglich **5** Ontologien benutzten eine eigene Lizenzregelung, die sich keiner bekannten Open Source Lizenz direkt zuordnen lies. Bei **32** Ontologien konnten keine Angaben zur Lizenz gefunden werden. Der hohe Anteil an Ontologie mit einer freien bzw. Open Source Lizenz stimmt positiv, weil es damit jedem ermöglicht, eigene Arbeiten auf diesen Ontologien aufzubauen, ohne auf Lizenzkosten oder rechtliche Auseinandersetzungen achten zu müssen. Es muss an dieser Stelle jedoch auch erwähnt werden, dass es zwei Ontologien gibt, die nur für nicht-kommerzielle Zwecke zur Verfügung stehen (EPPSA Ontology, Industry 4.0 Knowledge Graph).

Im Folgenden werden alle freien Lizenzen aufgelistet, die während der Recherche gefunden wurden:

1. Apache License 2.0²⁴
2. BSD License (2- und 3-Clause)²⁵
3. Creative Commons Licenses (in verschiedenen Arten und Versionen)²⁶
4. GNU Public License (verschiedene Versionen)²⁷
5. MIT License²⁸
6. OGC Document License Agreement²⁹
7. Public Domain Dedication License (PDDL)³⁰
8. W3C Document License (2023 version)³¹

5.0.1 Ergänzungen

Es wurden Ontologien gefunden, die nicht mehr in ihrer Form existierten, weil sie z.B. in eine andere Ontologie übergegangen sind. Die GoodRelations Ontologie ging 2012 in schema.org über. Ein anderes Beispiel ist die Ontologie RealEstateCore: sie gab ihre OWL-Ontologie in Version 4 auf und verlagerte sich dann auf SHACL und Digital Twin Definition Language Serialisierungen³².

Und die Product Types Ontology³³ stellt lediglich einen RDF-Daten-Dump mit nur 1000 der am häufigsten abgefragten Klassen als Ontologie bereit.

²⁴<https://www.apache.org/licenses/LICENSE-2.0.html>

²⁵<https://opensource.org/license/bsd-2-clause>, <https://opensource.org/license/bsd-3-clause>

²⁶<https://creativecommons.org/licenses/?lang=en>

²⁷<https://www.gnu.org/licenses/licenses.en.html>

²⁸<https://opensource.org/license/mit>

²⁹<https://www.ogc.org/about-ogc/policies/document-license-agreement/>

³⁰<https://opendatacommons.org/licenses/pddl/>

³¹<https://www.w3.org/copyright/document-license-2023/>

³²Siehe auch <https://dev.realestatecore.io/docs/DTDL-or-SHACL> und <https://doc.realestatecore.io/3.3/full.html>

³³<http://www.productontology.org/>

6 Diskussion

Die Untersuchung wurde über einen begrenzten Zeitraum von 5 Monaten durchgeführt und die vorgestellte Ontologie-Liste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, aufgrund einer fehlenden Liste, die alle bekannten Ontologien enthält. Weiterhin wurde der thematische Fokus industrielle Fertigung weit ausgelegt, wodurch auch thematisch nicht passende Ontologien einbezogen sein könnten. So wurden z.B. Ontologien über Autos und andere Produkte inkludiert, weil diese im Rahmen der industriellen Fertigung hergestellt werden. An dieser Stelle wäre eine Nachuntersuchung mit Domainexperten sinnvoll. In den Skripten wurden RDF-Bibliotheken genutzt, welche nicht alle RDF-Dateien lesen konnten³⁴. In diesen Fällen wurden die Dateien manuell ausgewertet. Die Nutzung von Metadaten außerhalb der Ontologie, z.B. von einem Ontologieportal, könnte dazu geführt haben, dass falsche Angaben übernommen wurden.

7 Fazit und Ausblick

Die Rechercheergebnisse zeigen ein gemischtes Bild. Für das Themengebiet industrielle Fertigung und angrenzende Themengebiete konnten 217 passende Ontologien gefunden werden. Die ermittelten letzten Aktivitäten je Ontologie deuten auf ein über 10 Jahre währendes Interesse an dem Themenbereich hin. Ebenso ist positiv, dass einige Ontologien eine dezidierte Webseite mit der Spezifikation besitzen, die neben den Metadaten, u.a. auch eine Liste der Klassen und Properties bereitstellt.

Jedoch war es bei dem Großteil der Ontologie aufwendig an die gewünschten Metadaten zu gelangen. Es ist bemerkenswert, wie wenig Aufmerksamkeit von den Ontologie-Autoren auf die Metadaten gelegt wurde, obwohl sie bei Suchanfragen in Ontologie-Portalen und Suchmaschinen zuerst herangezogen werden. Die gesamte Recherche wurde regelmäßig erschwert durch nicht mehr erreichbare Web-Ressourcen, was mich dazu zwang, manuell über andere Onlinedienste zu suchen. Dieses Phänomen ist unter dem Namen "link rot" bzw. "reference rot" bekannt und gut dokumentiert [3] [6]. Kritisch wird das Problem, wenn essentielle Web-Ressourcen aus wissenschaftlichen Publikationen nicht mehr erreichbar sind und damit die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Arbeit zumindest erschwert wird.

Diese Arbeit stellt ein stabiles Fundament für weitere Untersuchungen zu Ontologien in der industriellen Fertigung dar. Zudem erlaubt sie interessierten Personen und Unternehmen, die sich im RDF-Umfeld noch nicht so gut auskennen, einfacher an die Ontologie zu gelangen, ohne sich mit technischem Kleinklein beschäftigen zu müssen.

8 Erwähnungen

Ich danke Paul-Robert Kästner für die Sichtung und Zuarbeit der ersten Ontologie-Einträge.

Die Arbeit wurde im Rahmen KI-Werk Projektes durchgeführt, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde (<https://www.cbasynergy.net/cba/ki-werk.html>).

³⁴Fehler beim XML-Parsing

9 Anhang

Stark gekürzte Darstellung der CSV-Datei mit Ontologien zum Thema industrielle Fertigung:

	Name	Project page, publication or RDF-file
1	3D Modeling Ontology	http://bdi.si.edu.es/bdi/ontologies/ExtruOnt/docs/
2	Additive Manufacturing and Maintenance Operations Ontology	https://github.com/LA3D/ammo
3	Additive Manufacturing Ontology	https://www.nist.gov/programs-projects/systems-integration-additive-manufacturing
4	Additive Manufacturing and Maintenance Operations Ontology	https://github.com/LA3D/ammo
5	AURORAL Adapters Ontology	https://github.com/oeg-upm/auroral-adapters-ontology
6	AURORAL Cell-Tower Ontology	https://github.com/oeg-upm/auroral-cellTower-ontology
7	AURORAL Energy Ontology	https://github.com/oeg-upm/auroral-energy-ontology
8	AURORAL Logistic Ontology	https://github.com/oeg-upm/auroral-shipmentBiomass-ontology
9	AURORAL Vehicle Charger Ontology	https://github.com/oeg-upm/auroral-VehicleCharger-ontology
10	Automotive Industry Ontology	https://iuriam.rockets.de/ontology-for-automotive-industry/
11	Battery Interface Ontology	https://www.big-map.eu/dissemination/battinfo
12	Bicycle Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/bicycle.html
13	Brick	https://brickschema.org/
14	Building Automation and Control Network Ontology	https://bacowl.sourceforge.net/intro.html
15	Building Circularity Assessment Ontology	https://github.com/linmor-sys/BCAO
16	Building Element Ontology	https://pi.pauwel.be/voc/buildingelement/index-en.html
17	Building Ontology	https://bimerr.iot.linkeddata.es/def/building/
18	Building Product Ontology	https://www.projekt-scope.de/ontologies/bpo/
19	Building Topology Ontology	https://github.com/w3c-lbd-cg/bot
20	Capability and Skills Ontology based on Industry Standards	https://github.com/CaSkade-Automation/CaSk
21	Capability and Skills Ontology based on Manufacturing	https://github.com/CaSkade-Automation/CaSkMan
22	Car HiFi Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/carhifi.html
23	Car Options Ontology	http://lov.linkeddata.es/dataset/lov/vocabs/coo/versions/2010-10-12.n3
24	Chair Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/chair.html
25	Classification of Business Functions	https://showvoc.op.europa.eu/#/datasets/ClassificationOfBusinessFunctions_%28CBF_1.0%29/metadata
26	Clothing Product Information Ontology	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/cpi/ns
27	Coffee Machine Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/coffeemachine.html
28	Collaborative Manufacturing Service Ontology	https://zenodo.org/records/3374505
29	Components for ExtruOnt	https://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj2217.pdf
30	Computer Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/computer.html
31	Context Aware System Observation Ontology	https://irstea.github.io/caso/OnToolology/ontology/caso.owl/documentation/index-en.html
32	Cooker and Oven Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/cookeroven.html
33	core	https://rds.posccaesar.org/ontology/plm/ont/core/
34	Core Ontology for Robotics and Automation	https://github.com/srforini/IEEE1872-owl
35	Core Ontology for Robotics and Automation (Bare)	https://github.com/srforini/IEEE1872-owl
36	CORAX	https://github.com/srforini/IEEE1872-owl
37	Crystallography Domain Ontology	https://github.com/emmo-repo/domain-crystallography
38	CSS Ontology	https://github.com/CaSkade-Automation/CSS
39	DefectOnt	https://github.com/AndreaMazullo/DefectOnt/
40	Digital Buildings Ontology	https://github.com/google/digitalbuildings/
41	Digital Camera Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/digitalcamera.html
42	Digital Construction Materials	https://data.industryportal.eu/fr/ontologies/DCMATERIALS/submissions/1/download?apikey=019ad570-1d64-41b7-8f6e-8f7e5eb54942
43	Digital Receiver Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/digitalreceiver.html
44	DIN EN 61360 Ontology-Design-Pattern	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-DINEN61360
45	DIN EN 6264-2 Ontology-Design-Pattern	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-DINEN6264-2
46	DIN 8580 Ontology-Design-Pattern	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-DIN8580
47	Dishwasher Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/dishwasher.html
48	Distribution Element Ontology	https://pi.pauwel.be/voc/distributionelement/index-en.html
49	DogOnt: Ontology Modeling for Intelligent Domotic Environments	https://iot-ontologies.github.io/dogont/
50	Domain Mechanical Testing	https://github.com/emmo-repo/domain-mechanical-testing
51	Domain Mechanical Testing Chemistry	https://github.com/emmo-repo/domain-mechanical-testing
52	Dryer Machine Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/dryermachine.html
53	DVD Player and Blu-ray Player Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/blurayplayer.html
54	eClass Products and Services Ontology	http://www.heppnetz.de/projects/eclassowl/
55	EEPSA Ontology	https://esnaola.github.io/eeppsa/EEPSA/index-en.html
56	Elemental Multiperspective Material Ontology	https://emmc.eu/emmo
57	Elemental Multiperspective Material middle-level ontology	https://github.com/emmo-repo/EMMO
58	equipment	https://rds.posccaesar.org/ontology/plm/ont/equipment/
59	ERA Vocabulary	https://showvoc.op.europa.eu/#/datasets/ERA_vocabulary/metadata
60	European Waste Classification for Statistics	https://showvoc.op.europa.eu/#/datasets/ESTAT_European_Waste_Classification_for_Statistics_%28EWC-Stat_Rev_4%29/metadata
61	Extruder Ontology	http://bdi.si.edu.es/bdi/ontologies/ExtruOnt/docs/
62	Extruder's sensors ontology	http://bdi.si.edu.es/bdi/ontologies/ExtruOnt/docs/
63	Facility Ontology	https://github.com/oeg-upm/cogito-facility-ontology
64	Fridge and Freezer Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/refrigerator.html
65	Furniture Sector Ontology	https://industryportal.eu/fr/ontologies/FUNSTEP
66	Game Console Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/gameconsole.html
67	Garment Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/garment.html
68	General Process Ontology	https://gitlab.cc-asp.fraunhofer.de/ISC-Public/ISC-Digital/ontology/gpo
69	GRACE Ontology	https://industryportal.eu/fr/ontologies/GRACE
70	Grid2Onto	https://industryportal.eu/fr/ontologies/GRID2ONTO
71	Hair Dryer Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/hairedryer.html
72	Home HiFi Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/homehifi.html
73	IEEE Standard for Autonomous Robotics Ontology	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-IEEE1872-2
74	IFC2X3	https://github.com/buildingsmart-community/ifcOWL
75	IFC2X3.TC1	https://github.com/buildingsmart-community/ifcOWL
76	IFC4	https://github.com/buildingsmart-community/ifcOWL
77	IFC4.ADD1	https://github.com/buildingsmart-community/ifcOWL
78	IFC4.ADD2	https://github.com/buildingsmart-community/ifcOWL
79	Industrial Maintenance Ontology	https://industryportal.eu/fr/ontologies/IMAMO
80	IOF Core Ontology	https://github.com/iofoundry/ontology/
81	International System of Quantities	https://github.com/emmo-repo/EMMO
82	Industrial IoT Architecture Ontology	https://github.com/i40-Tools/StandardsOntology
83	Industrial Ontologies Foundry Supply Chain Reference Ontology	https://spec.industrialontologies.org/iof/ontology/supplychain/SupplyChainReferenceOntology/
84	Industry 40 Knowledge Graph	https://industryportal.eu/fr/ontologies/I40KG
85	IoT Ontology	https://github.com/oeg-upm/cogito-iot-ontology
86	ISO 22400-2 Ontology-Design-Pattern	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-ISO22400-2
87	Key Performance Indicator ontology	https://bimerr.iot.linkeddata.es/def/key-performance-indicator/
88	Landline Phones Vocabulary	http://www.ebusiness-unibw.org/ontologies/opdm/landlinephone.html
89	M3-lite Taxonomy	https://github.com/fiesta-iot/ontology
90	M3 Ontology	http://sensormeasurement.appspot.com/m3#
91	Maintenance Activity Ontology	https://github.com/uwasystemhealth/Paper_Archive_Maintenance_Activity
92	Maintenance Activity Ontology	https://industryportal.eu/fr/ontologies/MNT-ACT
93	Maintenance Reference Ontology	https://spec.industrialontologies.org/iof/ontology/maintenance/Maintenance/
94	Manufacturing	https://github.com/emmo-repo/EMMO
95	Manufacturing Semantics Ontology	https://www.academia.edu/download/30806306/Lemaignan2006.pdf
96	Manufacturing System Ontology	https://github.com/enegri/OFM

	Name	Project page, publication or RDF-file
97	MamService Ontology	https://industryportal.enit.fr/ontologies/MANUSERVICE
98	Materials	https://github.com/emmo-repo/EMMO
99	Materials Design Ontology	https://github.com/LiUsemWeb/Materials-Design-Ontology
100	Material properties ontology	https://bimerr.iot.linkeddata.es/def/material-properties/
101	Material Science and Engineering Ontology	https://matportal.org/ontologies/MSEO
102	Mechanical Testing Ontology (MTO)	https://industryportal.enit.fr/ontologies/MTO
103	Microstructure domain ontology	https://github.com/emmo-repo/domain-microstructure
104	Microwave Vocabulary	https://ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/microwave.html
105	Mobile Phone Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/mobilephone.html
106	Modem Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/modem.html
107	Molecules And Materials Basic Ontology	https://github.com/daimoners/MAMBO
108	MPS500	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
109	MPS500 AssembleCylinder	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
110	MPS500 AssembleThermometer	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
111	MPS500 CameraModule	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
112	MPS500 DrillingModule	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
113	MPS500 Property Types	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
114	MPS500 RawCylinderSupplyModule	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
115	MPS500 RawThermometerSupplyModule	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
116	MPS500 ShippingModule	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
117	MPS500 StorageModule PutInStorage	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
118	MPS500 StorageModule RetrieveFromStorage	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
119	MPS500 Transport Module	https://github.com/hsu-aut/MPS500-Capabilities
120	MSDL (Manufacturing Service Description Language)	https://industryportal.enit.fr/ontologies/MSDL
121	Navigation Device Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/navigation.html
122	Occupancy Profile ontology	https://github.com/og-upm/bimerr-occupant-behavior
123	oneM2M Base Ontology	https://git.onem2m.org/MAS/BaseOntology
124	Ontology for Maintenance Procedure Documentation (OMPD) Conditional Maintenance Task Ontology	https://industryportal.enit.fr/ontologies/OMPD-CMTO
125	Ontology for the Battery Value Chain	https://gitlab.cc-asp.fraunhofer.de/ISC-Public/ISC-Digital/ontology/bvco
126	Ontology model for Web of Things	http://iot.linkeddata.es/def/wot/index-en.html
127	Ontology of units of Measure	http://bdi.si.edu.es/bdi/ontologies/ExtraOnt/docs/
128	OntoSensor Device Ontology	https://imnissw.org/ont/univmemphis/sensor
129	OPC UA Core ontology	https://github.com/OnotolA/ua-nodeset-core-ont
130	OPC UA Nodeset ontology	https://github.com/OnotolA/ua-nodeset-core-ont
131	OPC UA Ontology-Design-Pattern	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-OPC-UA
132	OpenADR ontology	https://albaniz.github.io/OpenADRontology/OnToolology/ontology/openADRontology.owl/documentation/index-en.html
133	OpenLink Product Features Ontology	http://www.openlinksw.com/ontology/features#
134	Open Energy Ontology	https://openenergy-platform.org/ontology/
135	PackML StateMachine Ontology-Design-Pattern	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-PackML
136	Paper Vocabulary	https://ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/paper.html
137	PCA Part 14' upper ontology	https://rds.posccaesar.org/ontology/lis14/ont/core/
138	Platform Ontology	https://github.com/og-upm/cogito-platform-ontology
139	Portable Media Player Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/portablemp.html
140	Position Ontology	https://github.com/erforini/IEEE1872-owl
141	Printer Vocabulary	https://ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/printer.html
142	process	https://rds.posccaesar.org/ontology/plm/ont/process/
143	Process Ontology	https://github.com/og-upm/cogito-construction-process-ontology
144	Product Ontology	https://github.com/mvegetti/PRONTO/
145	Product Types Ontology	http://www.productontology.org/
146	Product Vocabulary	https://ns.inria.fr/provoc/v1/provoc_v1.html
147	PSS Ontology	https://industryportal.enit.fr/ontologies/PSS
148	RealEstateCore Full	https://github.com/RealEstateCore/real
149	Reference Generalized Ontological Model	https://github.com/MuhammadYahya/rgom
150	Reified Requirements Ontology	https://data.dnv.com/ontology/requirement-ontology/core/req-ont.html
151	Resistance Spot Welding Ontology	https://github.com/nssi-uo/RSWO
152	RESPOND Ontology	https://respond-project.github.io/RESPOND-Ontology/respond/index-en.html
153	RFID System Configuration Ontology	https://github.com/eleni1salapati/ONTOLOGIES
154	RIVA InfoModel	https://github.com/hsu-aut/RIVA_InfoModel
155	Resource, Material, Process, Function and Quality (rmplq) ontology	https://github.com/zhengxiaochen/rmplq.ontology
156	ROMAIN: Reference Ontology for industrial Maintenance	https://industryportal.enit.fr/ontologies/ROMAIN
157	RPAIRS	https://github.com/erforini/IEEE1872-owl
158	Safety Ontology	https://github.com/mahsa-teimourikia/Safety-Ontology
159	Safety Ontology	https://github.com/og-upm/cogito-safety-ontology
160	SAREF Ontology	https://saref.etsi.org/core/
161	SAREF extension for the Automotive domain	https://saref.etsi.org/sarefauto/
162	SAREF extension for building	https://saref.etsi.org/saref4bldg/
163	SAREF extension for the Energy domain	https://saref.etsi.org/saref4ener/
164	SAREF extension for the electric grid domain	https://saref.etsi.org/saref4grid/
165	SAREF extension for the industry and manufacturing domain	https://saref.etsi.org/saref4inna/
166	SAREF extension for the smart life domain	https://saref.etsi.org/saref4life/
167	SAREF4SYST: an extension of SAREF for typology of systems and their inter-connections	https://saref.etsi.org/saref4syss/
168	SAREF4WATR is an extension of SAREF for Water	https://github.com/og-upm/S4WATR
169	SCOPRO (Supply Chain Process Ontology)	https://openreview.net/pdf?id=rieE3prhF8
170	SCORVoc	https://github.com/vocol/scor
171	SEAS Architecture ontology	https://ci.mines-st-etienne.fr/seas/ArchitectureOntology
172	SEAS Building Ontology	https://ci.mines-st-etienne.fr/seas/BuildingOntology
173	SEAS Device ontology	https://ci.mines-st-etienne.fr/seas/DeviceOntology
174	SEAS Electric Light Source Ontology	https://ci.mines-st-etienne.fr/seas/ElectricLightSourceOntology
175	SEAS Electric Power System Ontology	https://ci.mines-st-etienne.fr/seas/ElectricPowerSystemOntology
176	SEAS Electric Street Light System Ontology	https://ci.mines-st-etienne.fr/seas/StreetLightSystemOntology
177	SEAS Electric Vehicle ontology	https://ci.mines-st-etienne.fr/seas/ElectricVehicleOntology
178	SEAS Photovoltaic ontology	https://ci.mines-st-etienne.fr/seas/PhotovoltaicOntology
179	SEAS Smart Meter ontology	https://ci.mines-st-etienne.fr/seas/SmartMeterOntology
180	SEAS Thermodynamic System ontology	https://ci.mines-st-etienne.fr/seas/ThermodynamicSystemOntology
181	Semantic Sensor Network Ontology	https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/
182	Semantically Integrated Planning Model	https://industryportal.enit.fr/ontologies/SIMPM
183	Sensor Data ontology	https://bimerr.iot.linkeddata.es/def/sensor-data/
184	Sensor: Observation, Sample and Actuator	https://www.w3.org/TR/vocab-ssn/
185	Sharework Ontology for Human-Robot Collaboration	https://industryportal.enit.fr/ontologies/SOHO
186	Shaver Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/shaver.html
187	Shoe Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/shoe.html
188	Shredder Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/shredder.html
189	SmartHomeWeather	https://paul.staroch.name/en/
190	SmartProducts EADS	https://projects.kmi.open.ac.uk/smartproducts/ontology.html
191	SmartProducts Generic model	https://projects.kmi.open.ac.uk/smartproducts/ontology.html
192	SmartProducts Product model	https://projects.kmi.open.ac.uk/smartproducts/ontology.html
193	Statistical classification of products by activity	https://op.europa.eu/en/web/en-vocabularies/dataset/?resource=uri=http://publications.europa.eu/resource/dataset/cpa21
194	Storage Media Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/storagemedia.html
195	Tablet PC Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/tablet.html
196	Television Vocabulary	https://ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/television.html
197	Top Level Ontology of Ontology-based-InformationFlow-Industry-40	https://github.com/ko3n1g/Ontology-based-InformationFlow-Industry-4.0
198	Units of measure (uom)	https://rds.posccaesar.org/ontology/plm/ont/uom/
199	Utility vocabulary of OPDM Category Scheme based on the taxonomy of product types defined by Google	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/category/google.owl
200	Vacuum Cleaner Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/vacuum.html
201	VDI 2206 Ontology-Design-Pattern	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-VDI2206
202	VDI 2860 Ontology-Design-Pattern	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-VDI2860
203	VDI 3682 Ontology-Design-Pattern	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-VDI3682
204	VDI 5100 Ontology-Design-Pattern	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-VDI5100
205	VDI VDE NAMUR 2658	https://github.com/hsu-aut/IndustrialStandard-ODP-VIDVDENAMUR2658
206	Vehicle Sales Ontology for Semantic Web-based E-Commerce	https://www.heppnetz.de/ontologies/vso/ns
207	Versioning Ontology	https://data.ontocommons.linkeddata.es/vocabulary/VersioningOntology(veronto)
208	Vicinity core model	http://iot.linkeddata.es/def/core/index-en.html
209	Video Camera Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/videocamera.html
210	Video Projectors Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/videoprojector.html
211	Virtual Asset Representation Ontology	https://foundationmaker.github.io/edius-ontology/vae/index-en.html
212	visualization4ExtrOnt	http://bdi.si.edu.es/bdi/ontologies/ExtraOnt/docs/
213	Volkswagen Vehicles Ontology	https://www.w3.org/2001/sw/ewco/public/UseCases/Volkswagen/Volkswagen.pdf
214	Washer Machine Vocabulary	http://www.ebusiness-unilw.org/ontologies/opdm/washingmachine.html
215	Waste Categories	https://showvoc.op.europa.eu/#/datasets/ESTAT_Waste_categories/metadata
216	WoT Digital Twin Ontology	https://og-upm.github.io/WoT-DT-ontology/OnToolology/dt-ontology.ttl/documentation/index-en.html
217	Z-BRE4K semantic model	https://www.z-bre4k.eu/

References

- [1] Emna Amdouni et al. “IndustryPortal: a Common Repository for FAIR Ontologies in Industry 4.0”. In: *22nd International Semantic Web Conference (ISWC)-Demo & Poster*. 2023.
- [2] Mathieu d’Aquin and Natalya F Noy. “Where to publish and find ontologies? A survey of ontology libraries”. In: *Journal of Web Semantics* 11 (2012), pp. 96–111.
- [3] Johannes Frey et al. “DBpedia Archivo: a web-scale interface for ontology archiving under consumer-oriented aspects”. In: *Semantic Systems. In the Era of Knowledge Graphs: 16th International Conference on Semantic Systems, SEMANTiCS 2020, Amsterdam, The Netherlands, September 7–10, 2020, Proceedings 16*. Springer International Publishing. 2020, pp. 19–35.
- [4] Aldo Gangemi and Valentina Presutti. “Ontology design patterns”. In: *Handbook on ontologies*. Springer, 2009, pp. 221–243.
- [5] Veera Ragavan Sampath Kumar et al. “Ontologies for Industry 4.0”. In: *The Knowledge Engineering Review* 34 (2019), e17.
- [6] Viktor Lakic, Luca Rossetto, and Abraham Bernstein. “Link-Rot in Web-Sourced Multimedia Datasets”. In: *International Conference on Multimedia Modeling*. Springer. 2023, pp. 476–488.
- [7] Fabian Neuhaus. “What is an Ontology?” In: *arXiv preprint arXiv:1810.09171* (2018).
- [8] Joanna Isabelle Olszewska et al. “Ontology for autonomous robotics”. In: *2017 26th IEEE international symposium on robot and human interactive communication (RO-MAN)*. IEEE. 2017, pp. 189–194.
- [9] Emilio Sanfilippo, Yoshinobu Kitamura, and Robert IM Young. “Formal ontologies in manufacturing”. In: *Applied Ontology* 14.2 (2019), pp. 119–125.