Teil I: Kurzbericht

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Ziel des Verbundprojektes und des Teilvorhabens:

Das Verbundprojekt zielte auf die Entwicklung eines ontologiebasierten semantischen Modells für die additive Fertigung von Metallstrukturen ab. Innerhalb des Teilprojekts sollten spezifische Aufgaben bearbeitet werden, darunter die Festlegung wesentlicher Parameter für das experimentelle Programm, die Definition der Anforderungen an die Kooperationsplattform und die Entwicklung von Ontologien.

Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens:

Zu Beginn des Projekts stützte sich die Arbeit auf den bestehenden Stand der Technik in der additiven Fertigung und semantischen Modellierung. Die Expertise des Konsortiums umfasste die Nutzung etablierter Methoden, wie Interviews, Literaturstudien und Expertenbefragungen, um eine umfassende Parametrierung und Anforderungsdefinition für die Fertigungsprozesse zu erreichen. Es wurden bereits Vorarbeiten in der Modellierung von Fertigungsparametern und Prüfstandards geleistet.

Eingebrachte Expertise und Vorarbeiten:

Das Konsortium brachte umfassende Expertise in der additiven Fertigung und semantischen Modellierung ein. Frühere Arbeiten umfassten die Entwicklung von Prüfkörpergeometrien, die Parametervariation und die Auswahl von Metalllegierungen. Es wurden bestehende Normen und Standards wie DIN, ISO und ASTM genutzt, um eine fundierte Basis für die semantische Modellierung zu schaffen.

Wesentliche Änderungen des Arbeitsplanes, des Finanz- oder Zeitplanes:

Mit dem Schreiben vom 29. Januar 2024 wurde durch die VDI Technologiezentrum GmbH dem Antrag auf zuwendungsneutrale Laufzeitverlängerung vom 01.04.2024 zugestimmt. Die Laufzeit wurde bis zum 30.06.2024 verlängert.

Durchgeführte Arbeitspakete und Meilensteine:

- **Arbeitspaket 1**:
  - Festlegung wesentlicher Parameter für das experimentelle Programm, darunter Prüfkörpergeometrien, Parametervariationen und Auswahl von Metalllegierungen
  - Zusammenarbeit mit den Projektpartnern MFPA und IGCV zur erfolgreichen Definition der Versuchsparameter und Ontologien
- **Arbeitspaket 4:**
  - Systematisierung der prozessbeschreibenden Kennwerte und Ableitung von Wissensgraphen und Ontologien
  - Implementierung einer Top-Level-Ontologie (BFO), und eine detaillierte Modellierung der Prozessparameter für Laser Powder Bed Fusion (LPBF), Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) und Composite Extrusion Modeling (CEM)
- **Arbeitspaket 6**:
  - Entwicklung einer Client-Server-Architektur und Kooperationsplattform
  - Entwicklung einer serverbasierte Softwarearchitektur, die eine zentrale Verwaltung und Kuratierung der Daten sowie die Integration von Sensordaten ermöglicht
  - Benutzungsoberfläche für die Datenabfrage und -visualisierung
- **Arbeitspaket 7:**
  - Entwicklung von Apps zum Einpflegen der Daten
  - Entwicklung einer Web-App, die die dezentrale Erfassung und Übertragung von Daten

ermöglicht.
    - Testen der Apps mit den Projektpartnern
- **Arbeitspaket 8:**
    - Integration statistischer Methoden in die Web-App zur Verarbeitung von experimentellen Kennwerten (Klassische statistische Methoden wurden bevorzugt, um eine einfache Interpretation der Daten zu ermöglichen)
- **Arbeitspaket 10:**
    - Durchführung einer Validierung anhand eines Validierungsplans, der Konsistenz, Genauigkeit, Leistung sowie Funktionalität umfasst.
- **Arbeitspaket 11:**
    - Austausch innerhalb der Community sowie die Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation mit Außenstehenden. Teilnahme an der Generalversammlung der Plattform „MaterialDigital“.

Erzielte Ergebnisse:

- **Definition von Prozessparametern:** Für verschiedene additive Fertigungsverfahren wurden detaillierte Prozessparameter und mechanische Eigenschaften definiert. Dies umfasste die Modellierung physikalischer und mechanischer Eigenschaften, wie Dichte, Streckgrenze und Ermüdungsgrenze. Ein detaillierter Versuchsplan und die erforderlichen mechanischen Tests wurden ebenfalls definiert.
- **Glossar und Ontologien:** Ein umfassendes Glossar zur Vereinheitlichung der Begriffe und des Vokabulars wurde erstellt. Die Top-Level-Ontologie BFO (Basic Formal Ontology) wurde implementiert, um Konsistenz und Nicht-Redundanz zu gewährleisten. Diese Ontologie fand breite Anwendung in der Modellierung der additiven Fertigungsprozesse.
- **Client-Server-Architektur:** Eine serverbasierte Softwarearchitektur wurde entwickelt, die eine zentrale Verwaltung und Kuratierung der Daten sowie die Integration von Sensordaten ermöglichte. Die Architektur bestand aus einer Datenzugriffsschicht, einer Anwendungsschicht und einer Präsentationsschicht.
- **Webanwendung:** Eine Webanwendung zur Datenabfrage und -visualisierung wurde entwickelt. Benutzer/innen konnten Parameter des Fertigungsprozesses und mechanische Prüfdaten importieren, abfragen und visualisieren. Die Webanwendung ermöglichte auch die Integration von Simulationsergebnissen und die Durchführung von Abfragen mittels SPARQL.

Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen:

Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit der MFPA Weimar und dem IGCV durchgeführt. Regelmäßige Sitzungen und Koordinierungen mit der Plattform MaterialDigital (PMD) trugen dazu bei, die Anforderungen und Leitlinien für die Ontologieentwicklung abzustimmen. Weitere Partner und Unterauftragnehmer wurden bei spezifischen Aufgabenstellungen eingebunden, um die Expertise und Ressourcen optimal zu nutzen. Es wurden wöchentliche Treffen mit der Workflow-Gruppe und zweiwöchentliche Treffen mit der Gruppe für semantische Interoperabilität durchgeführt.

Schlussfolgerung:

Das Verbundprojekt hat erfolgreich die Grundlagen für eine ontologiebasierte semantische Modellierung in der additiven Fertigung entwickelt und damit einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung und Standardisierung in diesem Bereich geleistet. Die Zusammenarbeit und der Austausch mit verschiedenen Forschungseinrichtungen und Plattformen spielten eine entscheidende Rolle bei der erfolgreichen Erreichung der Projektziele. Die entwickelten Methoden und Ergebnisse bieten eine solide Basis für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der additiven Fertigung.

Teil II: Eingehende Darstellung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zuwendungsempfänger: Technische Universität Hamburg
Institut für Digitales und Autonomes Bauen (B-1)
Herr Prof. Dr.-Ing. Kay Smarsly
Blohmstraße 15
21079 Hamburg

Förderkennzeichen: 13XP5117D

Vorhabensbezeichnung: ODE_AM

Laufzeit des Vorhabens: 01. April 2021 – 30. Juni 2024

Berichtszeitraum: 01. April 2021 – 30. Juni 2024

Arbeitspaket 1: Spezifikation von Anforderungen und Vorgehen
Das Ziel des ersten Arbeitspakets (AP 1) bestand darin, die wesentlichen Parameter für das experimentelle Programm festzulegen. Hierzu gehörten Prüfkörpergeometrien, Parametervariationen, Anzahl der Proben, Auswahl von Metalllegierungen, Prüfstandards und Dokumentationsarten.

Teilpakete

- **AP 1.1:** Festlegung der für das experimentelle Programm wesentlichen Parameter, darunter Prüfkörpergeometrien, Parametervariationen, Anzahl von Proben, Auswahl von Metall-legierungen, Prüfstandards und Dokumentationsart.
- **AP 1.2:** Definition von Anforderungen an die Plattform zur Kooperation und Herangehensweise zur Ableitung von Ontologien

Erzielte Ergebnisse

Versuchsplan: Die erforderlichen Prozessparameter sowie die mechanischen Eigenschaften für die Modellierung wurden definiert. Mechanische Tests, wie Zugversuch, Härtetest und Ermüdungstest, wurden festgelegt. Tabelle 1 zeigt beispielhaft definierte Materialtests der Projektpartner.

Test	Norm	Probennummern	Partner	Kennwerte
Zugversuch	DIN 50125:2016-12 DIN EN ISO 6892-1	5 Proben + 2 Reserven je Verfahren und Anordnung (0°, 45°, 90°)	MFPA Weimar	Zugfestigkeit Endfestigkeit E-Modul
Druckversuch	ASTM E 9 - 89a	5 Proben + 2 Reserven je Verfahren und Anordnung (0°, 45°, 90°)	MFPA Weimar	Druckfestigkeit

Tabelle 1: Definierte Tests zur Untersuchung der Zug- und Druckfestigkeit des Materials.

Glossar: Ein Glossar zur Vereinheitlichung der Begriffe und des Vokabulars basierend auf Normen wie DIN, ISO und ASTM wurde erstellt. Tabelle 2 zeigt einen Auszug aus dem Glossar für ausgewählte Prüf- und Materialbezeichnungen.

Bezeichnung	Beschreibung
Direct Energy Deposition	The process category is **direct energy deposition**, using a GMAW, in a wire feed process

Powder Bed Fusion - Laser Beam/Metal	The process category is **powder bed fusion**, using a laser beam (-LB) in a metallic material (/M) (Quelle: ISO/ASTM DIS 52900:2018(E))
Compression Test	**Material-characterization process** performed to characterize the behavior of a material under compressive loading
Tensile Test	A fundamental materials science and engineering test (=**material-characterization process**) in which a sample is subjected to a controlled tension until failure
(Material) Objects	
(Portion of) 316L Steel	**(Portion of) Steel** with a specific ratio of iron and further atoms
EOS M290	Specific **additive manufacturing machine** of supplier Electro-Optical System
Kuka KR60	**Handling system** for the additive manufacturing use case in DED-Arc
Fronius CMT Advanced 4000	**Welding power sources** for the additive manufacturing use case in DED-Arc

Tabelle 2: Auszug aus dem Glossar ausgewählter Test- und Materialbezeichnungen.

Übergeordnete Fragen: Unter der Leitung des PMD wurden durch Brainstorming und Diskussionen zwischen den Projektpartnern Antworten auf folgende Fragen erarbeitet:

- Welcher Bereich der additiven Fertigung sollte von der Ontologie abgedeckt werden?
- Wofür soll die Ontologie verwendet werden?
- Wer wird die Ontologie nutzen?
- Welche Fragen sollen durch die Ontologie beantwortet werden?

Die Antworten auf diese Fragen haben dazu beigetragen, den Modellierungsbereich, den Schwerpunkt und den Zweck der erforderlichen Ontologie zu definieren. Die Präsentation und Diskussion mit dem PMD fand im Dezember 2021 statt. Das Ziel der Ontologie wurde durch die Beantwortung der Fragen auf allgemeinverständliche Weise definiert. Die Partner des PMD bestätigten, dass die Verwendung der Ontologie einen einmaligen Mehrwert bietet. Zudem wurde festgestellt, dass die spezifizierten Projektziele geeignet sind, eine Ontologie zu modellieren.

Die grundlegende, formale Ontologie (BFO) wurde als *Top-Level-Ontologie (TLO)* implementiert, um Konsistenz und zu gewährleisten. Auch die *Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering (DOLCE)* wurde für diesen Zweck verwendet. Beide Ontologien haben denselben philosophischen Ursprung, jedoch mit unterschiedlichen Ansätzen. Während BFO einen realistischeren Ansatz anstrebt, verfolgt DOLCE ein deskriptives Vorgehen. Es ist festzuhalten, dass sich beide Ontologien überschneiden. Zum Beispiel sind die Klassen *Occurrent* und *Continuant* in BFO den Klassen *Endurant* und *Perdurant* in DOLCE sehr ähnlich. Tabelle 3 zeigt eine Zusammenfassung der Top-Level-Ontologien, die im Bereich der additiven Fertigung verwendet wurden. Es wird ersichtlich, dass die meisten Forschungsarbeiten BFO als TLO implementiert haben. In ODE_AM wurde auch aus diesen Gründen entschieden, BFO zu verwenden. Dies wird die Erweiterung und den Abgleich der erstellten Ontologie mit anderen Ontologien in Zukunft erleichtern [1].

Quelle	Top-Level-Ontologie	Modellierungssprache
[1]	BFO	OWL
[6]	-	OWL
[7]	BFO	OWL
[9]	BFO	-
[10]	DOLCE	OWL
[11]	BFO	OWL
[12]	-	UML

Tabelle 3: TLO und Modellierungssprachen, die in Ontologien für die additive Fertigung verwendet werden.

Wie bereits erwähnt, enthält die BFO eine Oberklassenentität mit zwei Unterklassen: *Continuant* und

Occurrent. Ein *Occurrent* ist eine Entität, die im Laufe der Zeit auftritt und endet. Als Beispiel kann hier ein Herstellungsprozess genannt werden. Ein *Continuant* hingegen ist eine Entität, die über die ganze Zeit besteht [2]. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus der BFO-Klassenhierarchie. BFO ist eine gut dokumentierte Ontologie, die bereits erfolgreich im biomedizinischen Bereich eingesetzt wird. Aufgrund ihrer kleinen Klassenstruktur findet sie auch innerhalb der additiven Fertigung breite Anwendung.

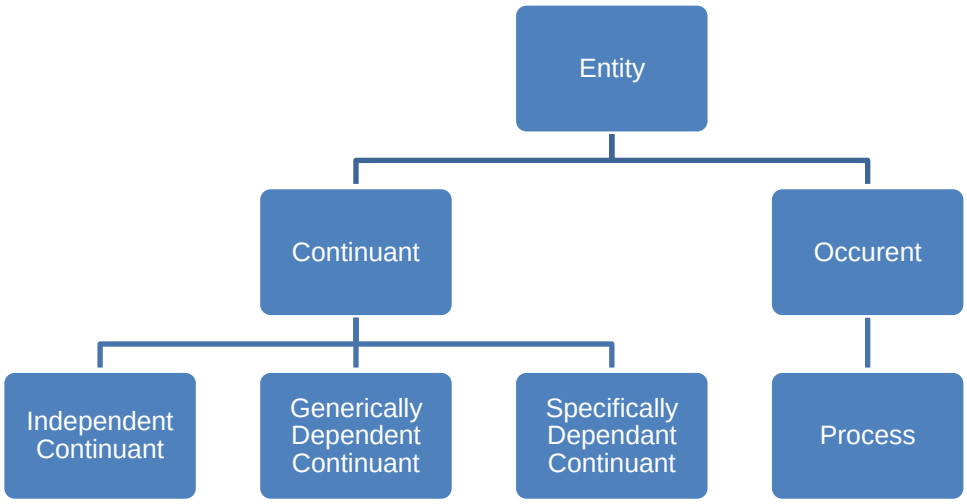


Abbildung 1: Teildarstellung einer BFO-Klassenstruktur

Modellierungssprache: Das Institut für Digitales und Autonomes Bauen forscht intensiv auf dem Gebiet der Modellierungssprachen und untersucht semantische Beschreibungskalküle. Auf Basis dieser langjährigen Expertise und gemeinsam mit den Projektpartnern wurde beschlossen, die *Web Ontology Language (OWL)* als Modellierungssprache zu verwenden. Eine Ontologie, die OWL verwendet, besteht aus Klassen, Individuen und Eigenschaften. Dabei gibt es zwei Arten von Eigenschaften: *Objekteigenschaften* und *Dateneigenschaften*. OWL wird auch mit der *Semantic Web Rule Language (SWRL)* verwendet, um die Ontologie semantisch zu erweitern, indem beispielsweise komplexe Regeln für Schlussfolgerungen definiert werden [3]. Die formale Struktur der OWL-Ontologie, einschließlich der Terminologie und der Beziehungen, macht die Ontologie für Menschen und Maschinen lesbar und erleichtert den Austausch von Informationen [4]. Auch die Verfügbarkeit vieler Werkzeuge, die OWL unterstützen, wie *Protégé* oder *Apache Jena*, erleichtert die Verwendung von OWL als Modellierungssprache. Tabelle 3 zeigt die Zusammenfassung der verwendeten Modellierungssprachen im Bereich der additiven Fertigung. Es ist festzustellen, dass OWL von den meisten Forschern verwendet wurde, was die zukünftige Erweiterung der Ontologie erleichtert.

Literaturrecherche: In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die Forschungsliteratur gegeben, die im Bereich der additiven Fertigung für die Datenspeicherung und die Unterstützung der Entscheidungsfindung bezüglich der Prozessparameter entwickelt wurde. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst. Ein ontologischer Rahmen für *Semantic Additive Manufacturing Process Planning (SAMPro)* wurde in [5] entwickelt. Ziel von SAMPro ist es, die Merkmale des Produktdesigns mit verschiedenen Prozessen zu integrieren, einschließlich Directed Energy Deposition (DED), Materialstrahlverfahren, Powder Bed Fusion (PBF) etc. Es ist anzumerken, dass der Ansatz sehr abstrakt ist; er enthält keine detaillierten Prozessparameter und -variationen; außerdem weist die Ontologie keine detaillierten Material-eigenschaften auf.ie „Design für additive Fertigung Ontologie“ (*DFAM-Ontologie)*, welche in [6] entwickelt wurde, zeigt eine detailliertere Modellierung von Klassenparametern: Hier ist jedoch anzumerken, dass die Ontologie ihre eigenen Klassenbegriffe und ihr eigenes Vokabular verwendet, die manchmal nicht mit Prozessstandards einhergehen. In [7] wurde eine Ontologie für die Prozessabbildung der additiven Fertigung von Metallen entwickelt, um Zusammenhänge zwischen thermischen, mechanischen und Laserprozessparametern zu identifizieren. Der vorgeschlagene Rahmen umfasst sowohl experimentelle Daten als auch Ersatzmodelle, welche die Grundlage für den Aufbau fortschrittlicher Modelle und Simulationen für additive Fertigungsprozesse bilden. In [8] wurde ein Rahmen für die additive Fertigung mit Drahtbögen

(WAAM) für die Prozessplanung entwickelt, das die Vorteile sowohl einer Wissensbasis als auch computergestützter Werkzeuge (KP-CAPP) aufweist. Das Framework bietet einen Service für die Herstellbarkeitsanalyse und die Prozessplanung.

Vergleich mit den angestrebten Zielen

Die Ziele des Arbeitspakets wurden vollständig erreicht. Die definierten Parameter und das Glossar bilden eine solide Grundlage für die weiteren Arbeiten im Projekt.

Arbeitspaket 4: Systematisierung semantische Modellierung

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung eines ontologiebasierten semantischen Modells für die additive Fertigung von Metallstrukturen.

Teilpakete

- **AP 4.1:** Systematisierung der prozessbeschreibenden Kennwerte in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens
- **AP 4.2:** Ableitung von Wissensgraphen
- **AP 4.3:** Ableitung und Definition von Ontologien
- **AP 4.4:** Umwandlung in zur Innovationsplattform kompatible Datenformate

Erzielte Ergebnisse

Ontologieentwicklung: Eine Top-Level-Ontologie (BFO) wurde implementiert, um Konsistenz und Nicht-Redundanz zu gewährleisten. Eine detaillierte Modellierung der Prozessparameter für Laser Powder Bed Fusion (LPBF) und Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) wurde durchgeführt. Abbildung 2 zeigt den Entwicklungsprozess der Ontologie.

Abbildung 2: Entwicklungsprozess der Ontologie

Modularer Ansatz: Ein modularer Ansatz zur Entwicklung der Ontologie wurde verfolgt, um die Prozessparameter und mechanischen Eigenschaften von Teilen zu erfassen. Abbildung 3 zeigt die Architektur des modularen Ansatzes. Die erzeugten Datenformate (.rdf) und (.ttl) sind kompatibel mit den Anforderungen der PMD. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Herstellungsverfahren vorgestellt sowie die dazugehörigen Ontologien kurz vorgestellt

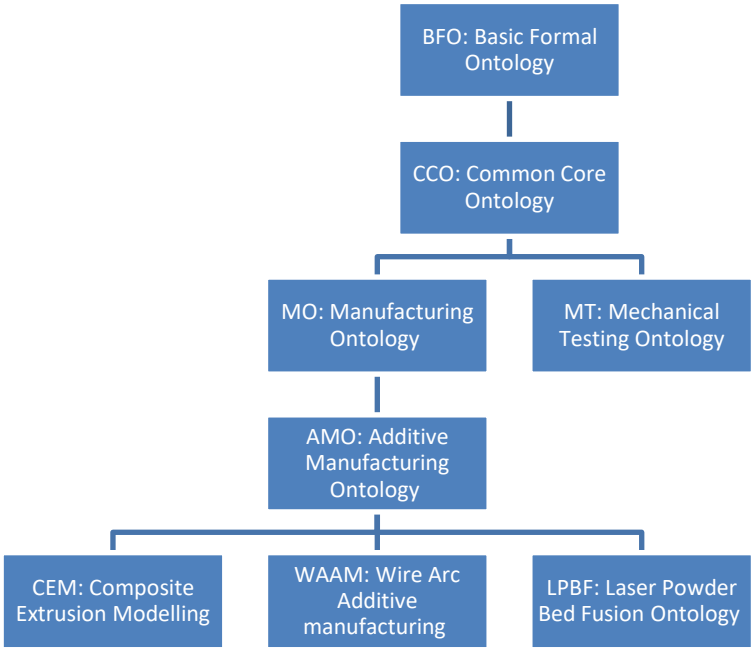


Abbildung 3: Architektur eines modularen Ansatzes der entwickelten Ontologie

Ontologie des Laser-Pulverbettschmelzens: Laser-Pulverbettschmelzens (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem ein Laserstrahl mit kontrollierter Geschwindigkeit eine ausgewählte Geometrie auf dem Pulverbett abtastet. Das Pulver wird vollständig aufgeschmolzen und verfestigt sich mit der darunter liegenden Schicht. Das Pulverbett wird um eine Schichtdicke abgesenkt und eine neue Pulverschicht wird aufgetragen. Der Vorgang wird so lange wiederholt, bis die gesamte gewünschte 3D-Geometrie hergestellt ist. Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung des LPBF-Verfahrens [13].

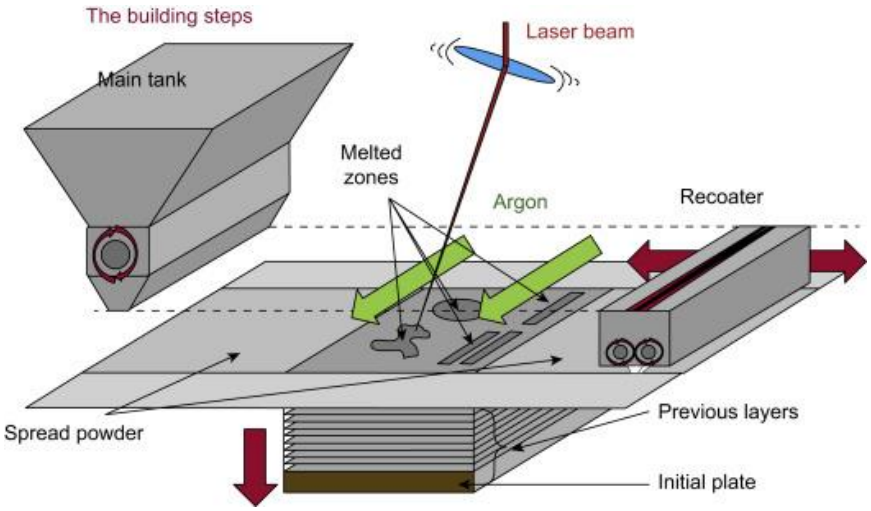


Abbildung 4: Schematische Darstellung des LPBF-Verfahrens [13].

Auf der Grundlage von Gesprächen mit der IGCV wurden mehr als 50 Prozessparameter, wie in Tabelle 4 dargestellt, definiert. Eine detaillierte Abbildung der entwickelten Ontologie findet sich im Anhang 1.

Ontologie der Lichtbogenverfahren: Bei der Lichtbogenverfahren (WAAM, siehe oben) wird ein elektrischer Lichtbogen als Wärmequelle verwendet, um die gewünschte 3D-Geometrie Schicht für Schicht durch Auftragen eines Metalldrahtes herzustellen, der mit kontrollierter Geschwindigkeit zugeführt wird. Zur Steuerung der Schweißgeschwindigkeit und der Schweißstrategie wird ein Roboterarm eingesetzt. WAAM wird normalerweise für die Herstellung großer Komponenten mit

geringer Komplexität verwendet. Abbildung 5 zeigt eine schematische Darstellung des WAAM-Prozesses [14]. Auf der Grundlage von Gesprächen mit den Projektpartnern in Ilmenau wurden die WAAM-Prozessparameter wie in Tabelle 5 dargestellt definiert. Sowohl die LPBF- als auch die WAAM-Prozesse wurden als Ontologien abgebildet. Eine detaillierte Abbildung der WAAM-Ontologie findet sich in Anhang 2.

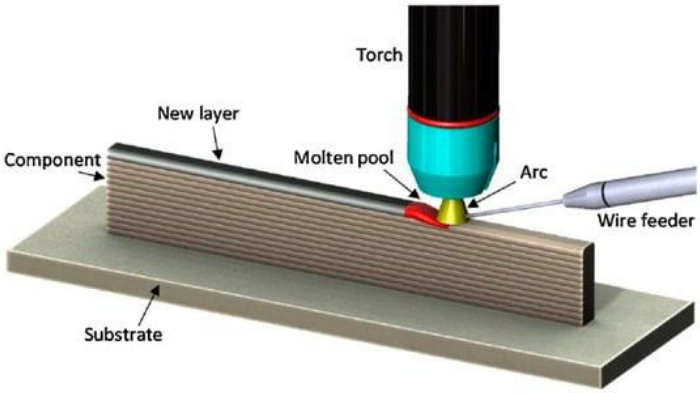


Abbildung 5: Schematische Darstellung des WAAM-Prozesses [14]

Build Platform Temperature Parameter	Laser Power In Fill Parameter
Contour Corridor Parameter	Laser Power In Fill Parameter
Edge Factor Parameter	Laser Power On Part Contour Parameter
Exposure Pattern Down Skin Parameter	Laser Power Parameter
Exposure Pattern In Fill Parameter	Laser Power Up Skin Parameter
Exposure Pattern Up Skin Parameter	Laser Speed Contour Parameter
Flow Optimization Down Skin Parameter	Laser Speed Down Contour Parameter
Flow Optimization In Fill Parameter	Laser Speed Down Skin Parameter
Flow Optimization Parameter	Laser Speed Edge Parameter
Flow Optimization Up Skin Parameter	Laser Speed In Fill Parameter
Build Platform Temperature Parameter	Laser Speed On Part Contour Parameter
Contour Corridor Parameter	Laser Speed Parameter
Edge Factor Parameter	Laser Speed Up Skin Parameter
Exposure Pattern Down Skin Parameter	Layer Height Parameter
Exposure Pattern In Fill Parameter	Min. Radius Factor Parameter
Exposure Pattern Up Skin Parameter	Min. Vector Length Parameter
Flow Optimization Down Skin Parameter	Offset Contour Parameter
Flow Optimization In Fill Parameter	Offset Edge Parameter
Flow Optimization Parameter	Overlap with Infill Parameter
Flow Optimization Up Skin Parameter	Pattern Features Shifted Down Skin Parameter
Hatch Distance Down Skin Paraeter	Pattern Features Shifted In Fill Parameter
Hatch Distance In Fill Parameter	Pattern features Shifted Parameter
Hatch Distance Parameter	Pattern Features Shifted Up Skin Parameter
Hatch Distance Up Skin Parameter	Recoating Speed Parameter
Hatch Offset Parameter	Ridge Down Skin Parameter
Hatch Restriction Angle Parameter	Ridge Up Skin Parameter
Hatch Rotation Angle Parameter	Skywriting Down Skin Parameter
Infill Skipping Layers Parameter	Skywriting Infill Parameter
Laser Power Contour Parameter	Skywriting Up Skin Parameter
Laser Power Down Contour Parameter	Thickness Contour Parameter
Laser Power Down Skin Parameter	Thickness Down Skin Parameter
Laser Power Down Skin Parameter	Thickness Up Skin Parameter
Laser Power Edge Parameter	Threshold Parameter

Tabelle 4: LPBF-Prozessparameter.

Arclength Correction	Slope 2 Parameter
End Current	Start Current Time
End Current Time	Starting Current
Energy Per Unit Length	Stick Out
Gas Flow Rate	Trigger Mode
Interlayer Temperature	Welding Mode
One Bead Width	welding Speed Parameter
Overlap	wire feed speed
Pulse Dynamic Correction	Z- Jump
Slope 1 Parameter	

Tabelle 5: WAAM-Prozessparameter

Ontologie für Composite Extrusion Modeling: Composite Extrusion Modeling (CEM) ist ein additiver Fertigungsprozess, bei dem Extrusionsverfahren eingesetzt werden, um die erforderlichen 3D-Geometrien zu erzeugen [15]. Wie in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt, durchläuft der CEM-Prozess mehrere Schlüsselphasen, die jeweils entscheidend für die Erreichung der gewünschten Materialeigenschaften und Geometrien sind:

- **Drucken:** In dieser Phase wird das granulierte Material dem Extrusionssystem zugeführt, wo es erwärmt und Schicht für Schicht extrudiert wird, um ein Bauteil zu konstruieren. Dadurch entsteht ein Grünteil/Grünling, welches nahezu die Nettoform des endgültigen Bauteils hat, aber noch Bindemittel enthält.
- **Entbindern:** Das Grünteil wird entbindert, um das Bindermaterial zu entfernen. Dieser Schritt ist für die mechanischen Eigenschaften des Teils von entscheidender Bedeutung, da hier eine poröse Struktur entsteht, die das Entfernen der restlichen Bindemittel erleichtert und ein besseres Zusammenwachsen der Materialpartikel ermöglicht.
- **Sintern:** Der entbinderte Bräunling wird dann gesintert – ein Hochtemperaturverfahren, das das Material verdichtet, indem es die Partikel miteinander verbindet und schließlich das gewünschte Bauteil ergibt.

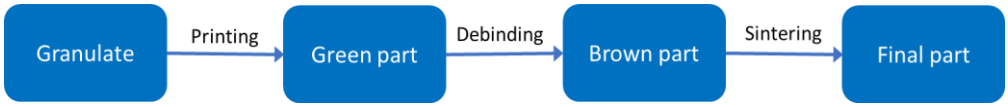


Abbildung 6: Schematische Darstellung der einzelnen Phasen des CEM-Prozesses.

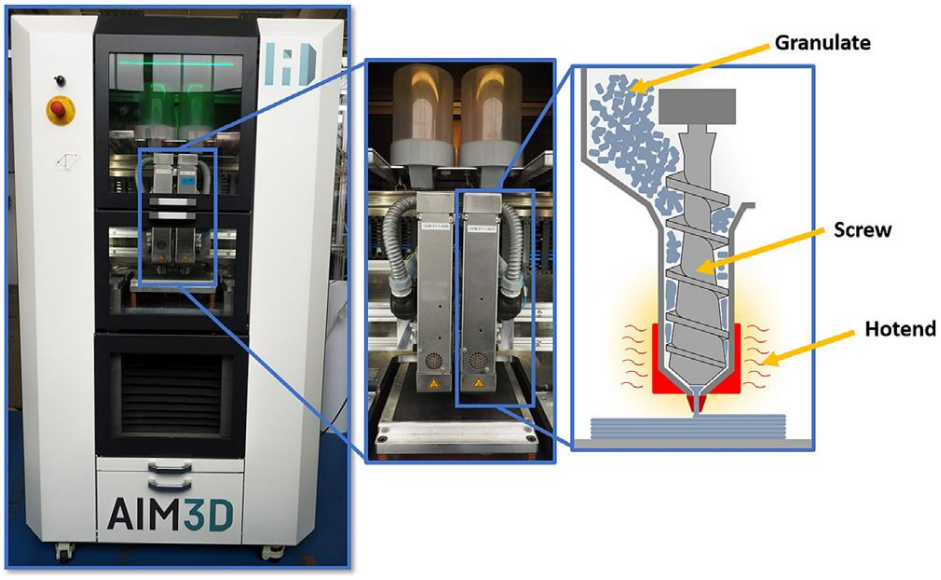


Abbildung 7: Darstellung des CEM-Verfahrens [15].

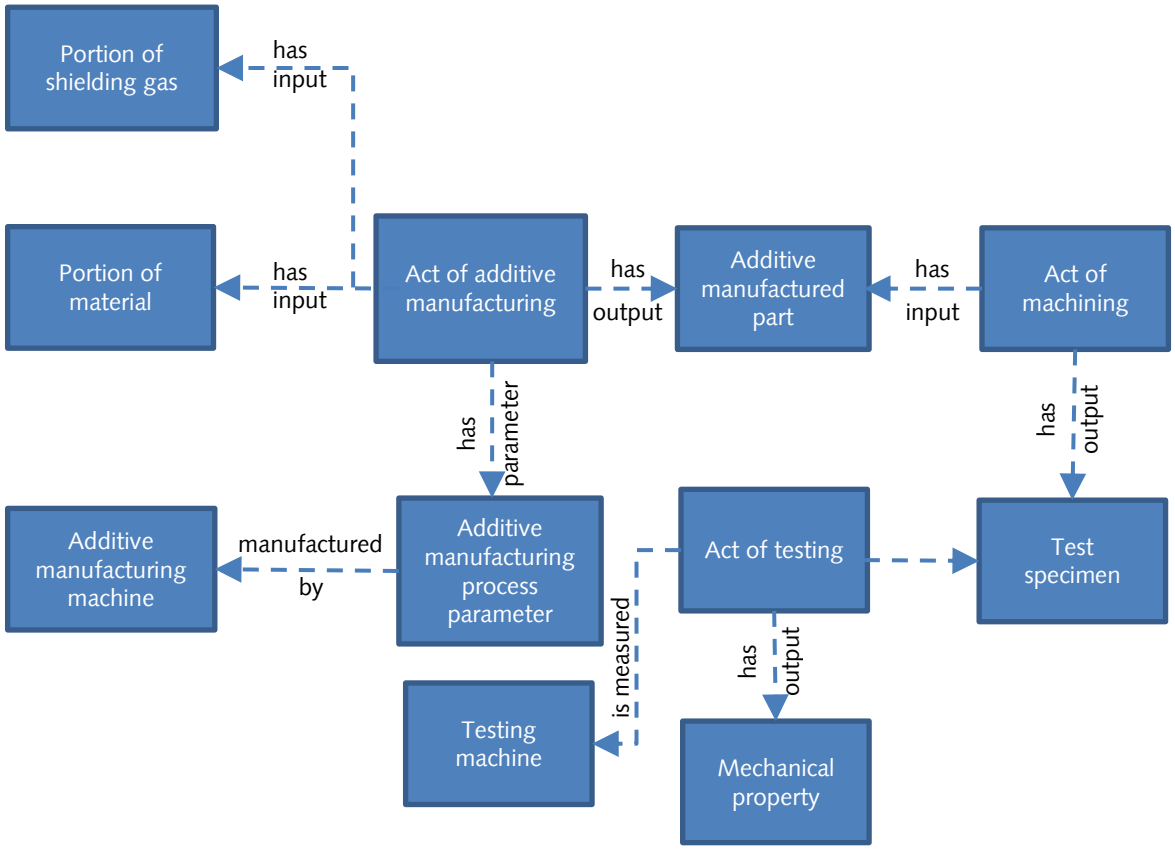


Abbildung 8: Auszug aus dem allgemeinen Schema der Hauptklassenstruktur.

Die Composite Extrusion Modeling Ontology (CEMO) wurde ähnlich modelliert, wie die Laser Powder Bed Fusion Ontology (LPBFO) und die Wire Arc Additive Manufacturing Ontology (WAAMO). Tabelle 6 zeigt die wichtigsten CEM-Prozessparameter. Die detaillierte Klassenstruktur von CEMO ist im Anhang 3 dargestellt.

Extruder Multiplier Parameter	Green Part Volume
Brown Part Density	Green Part Weight
Brown Part Volume	Nozzle Diameter Parameter
Brown Part Weight	Printer Bed Temperature Parameter
Debinding Process Parameter	Sintered Part Density
Debinding Technology	Sintered Part Volume
Debinding Temperature Profile	Sintered Part Weight
Extrusion Speed Parameter	Sintering Process Parameter
First Layer Height Parameter	Sintering Temperature Profile
Green Part Density	

Tabelle 6: CEM-Prozessparameter.

Auf der Grundlage von Brainstorming und Diskussionen mit den Projektpartnern wurde ein allgemeines Schema entwickelt, das für jede Domänenontologie befolgt werden soll. Abbildung 8 zeigt eine Zusammenfassung der Hauptklassenstruktur des allgemeinen Schemas für additive Fertigungsprozesse.

Vergleich mit den angestrebten Zielen

Die Ziele des Arbeitspakets wurden erreicht. Die entwickelte Ontologie und die Datenformate bieten eine solide Grundlage für die semantische Modellierung in der additiven Fertigung.

Arbeitspaket 6: Entwicklung von Client-Server-Architektur und Kooperationsplattform

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung einer serverbasierten Software, die von allen Projektpartnern genutzt werden kann und der Kopplung mit der Innovationsplattform dient.

Teilpakete

- **AP 6.1:** Aufbau einer Client-Server Architektur in Analogie zur Innovationsplattform MaterialDigital
- **AP 6.2:** Zentrale Verwaltung innerhalb des Verbundes und Kuratierung
- **AP 6.3:** Metadatensemantiken anhand der Ontologie zur Gewährleistung eindeutiger Mappings
- **AP 6.4:** Prototypische Sensordatenintegration auf Instanzebene (Vorarbeit für Arbeitspaket 8 und 9)

Erzielte Ergebnisse

Das Hauptziel der Plattform ist es, eine Umgebung für die Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern bei der Dateneingabe, -zuordnung und -abfrage bereitzustellen. Die entwickelte Plattform ist in der Lage, verschiedene Arten von mechanischen Prüf- und Fertigungsdaten zu importieren, Daten auf der Grundlage definierter Ontologie-Mappings abzubilden und erforderliche Informationen abzufragen sowie Diagramme und Grafiken zu visualisieren. Die Analyse der Daten hat ergeben, dass die unterschiedlichen Bezeichnungen der Parameter sowie die heterogene Datenstruktur ein allgemeingültiges, eindeutiges Mapping weiterhin vor Herausforderungen stellen, die nur teilweise im Rahmen dieses Vorhabens gelöst werden konnten.

Anwenderberichte: Um die Anforderungen an die Plattform zu definieren, wurden so genannte „User Stories“ erstellt, um das Schema zu entwerfen und die erforderlichen Aufgaben und Seiten für die Webanwendung zu definieren. Die Hauptnutzer/innen der Anwendung sind:

- Fertigungsingenieur/innen
- Qualitätsingenieur/innen
- Anwendungsingenieur/innen
- Simulationsingenieur/innen

Die Fertigungsingenieur/innen sollen in der Lage sein, die Parameter des Fertigungsprozesses direkt oder durch Hochladen von Maschinenprotokolldateien bereitzustellen. Die importierten Daten sollten entsprechend der Ontologiestruktur abgebildet werden. Schließlich sollen die Fertigungsingenieur/innen in der Lage sein, die aktualisierte Datenbank zu überprüfen. Um die Anforderungen zu erfüllen, soll eine Parsing-Seite erstellt werden, um die Daten aus der Maschinenprotokolldatei in das CSV-Format zu parsen. Die Dateneingabeseite sollte so gestaltet sein, dass sie Daten aus dem CSV-Format in die Graph Datenbank hochlädt.
Die Qualitätsingenieur/innen sollen in der Lage sein, mechanische Prüfdaten direkt oder durch Hochladen von Maschinenausgabedateien bereitzustellen. Die importierten Daten sollten entsprechend der Ontologiestruktur abgebildet werden. Schließlich sollen die Qualitätsingenieur/innen in der Lage sein, die aktualisierte Datenbank zu überprüfen. Ähnlich wie bei den vorherigen Anforderungen sind Parsing- und Dateneingabeseiten erforderlich, um Daten in die Datenbank hochzuladen.
Die Anwendungsingenieur/innen sollen in der Lage sein, die Parameter des Herstellungsprozesses auf der Grundlage der abgefragten Daten auszuwählen. Sie sollten auch in der Lage sein, die Abbildung der Ontologie und die verschiedenen Klassendefinitionen zu verstehen. Eine Abfrageseite, die auf der Standardabfragesprache und dem Protokoll (SPARQL) basiert, wird benötigt, um die Ergebnisse herunterzuladen oder in das CSV-Format zu exportieren. Die Visualisierungsseite ist erforderlich, um verschiedene Arten von Diagrammen sowie die Visualisierung von 3D-Dateien im STL-Format zu ermöglichen. Eine Dashboard-Seite ist erforderlich, um Informationen über die Ontologie-Zuordnung sowie Durchschnittswerte der in der Datenbank gespeicherten mechanischen Eigenschaften bereitzustellen.
Die Simulationsingenieur/innen sollen in der Lage sein, Simulationsergebnisse aus der Ontologie abzufragen, die für die Simulation erforderlichen Parameter zu überprüfen und schließlich Simulationsaufträge für nicht simulierte Fertigungsprozesse zu automatisieren. Ähnlich wie die Anforderungen der Anwendungsingenieur/innen sind eine Abfrageseite und eine Visualisierungsseite erforderlich. Darüber hinaus sollte die Möglichkeit bestehen, Simulationsdateien auf der Grundlage der

gewünschten Fertigungsprozessparameter zu exportieren.

Softwarearchitektur: Eine serverbasierte Architektur wurde entwickelt, die eine zentrale Verwaltung und Kuratieren der Daten ermöglicht. Abbildung zeigt die Softwarearchitektur. Um die verschiedenen Anforderungen der Benutzer/innen zu erfüllen, wurde das Schichtenmodell gewählt. Die Softwarearchitektur ist eine wiederverwendbare Lösung, die eine Standardmethode zur Organisation und Strukturierung der Software bietet und die Wartung und Entwicklung des Systems erleichtert. Das Schichtenmodell wurde aufgrund seiner Vorteile der einfachen Wartung und Verwaltung gewählt. In Schichtenmodellen sind die Programme in Gruppen von Teilaufgaben auf verschiedenen Abstraktionsebenen strukturiert. Jede Schicht stellt Dienste für die nächsthöhere Schicht bereit. Abbildung zeigt die Schichten der vorgeschlagenen Webanwendung. Die vorgeschlagene Architektur besteht aus drei Schichten:

Die Datenzugriffsschicht enthält die Graphdatenbank mit dem endgültigen Wissensgraphen, der in AP 4 entwickelt wurde. Ontotext GraphDB wurde als semantische Graphdatenbank verwendet, die RDF (Resource Description Framework) zur Datendarstellung und SPARQL zur Abfrage nutzt.

Die Anwendungsschicht (Backend) wurde mit Flask entwicklet. Flask ist ein schlankes Web-Framework für Python zur Entwicklung von Webanwendungen. Außerdem ist die Verwendung eines auf Python basierenden Backend mit den PMD-Workflow-Umgebungen kompatibel.

Die Präsentationsschicht (Frontend) wurde mit Hilfe von Angular erstellt. Angular ist ein Open-Source-Anwendungsframework, das auf der Sprache TypeScript basiert und die Möglichkeit bietet, wiederverwendbare Komponenten zu erstellen, die problemlos im vorgeschlagenen Frontend verwendet werden können.

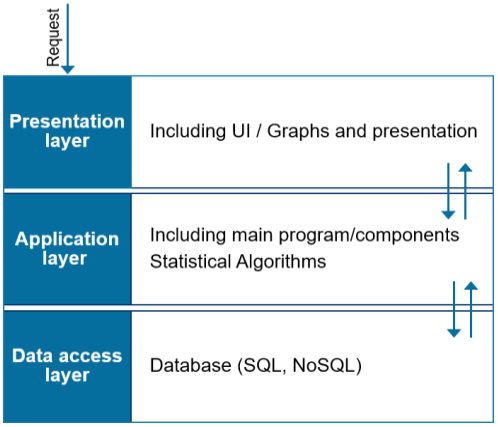


Abbildung 9: Serverbasierte Softwarearchitektur der Kooperationsplattform.

Datenintegration: Eine prototypische Sensordatenintegration wurde durchgeführt, um die Validierung der Software-Implementierungen zu ermöglichen.

Vergleich mit den angestrebten Zielen

Unter Berücksichtigung der erwähnten Einschränkung hinsichtlich der Allgemeingültigkeit des eindeutigen Mappings konnten die Ziele des Arbeitspakets erreicht werden. Die entwickelte Softwarearchitektur sowie die Benutzungsoberfläche bieten eine effektive Plattform für die Zusammenarbeit und Datenintegration.

Arbeitspaket 7: Entwicklung von Apps zum Einpflegen der Daten

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung von Apps, die ein effizientes dezentrales Arbeiten aller Projektpartner ermöglichen.

Teilpakete

- **AP 7.1:** App-Entwicklung mittels zu den Workflowumgebungen „Pyiron“ oder „SimStack“

kompatiblen Softwarelösungen

- **AP 7.2:** Aufgreifen der Apps durch Mitglieder im Verbund, testweise Übertragung von Daten, dezentrale Erfassung

Erzielte Ergebnisse

App-Entwicklung: Eine App wurde entwickelt, die eine dezentrale Erfassung und Übertragung von Daten ermöglicht. Diese App wurde in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern entwickelt und getestet. Wie bereits in AP 6 beschrieben, wurde das Backend der Webanwendung auf der Grundlage von Python entwickelt. Um eine optimierte Adaptivität an die definierten Anforderungen zu gewährleisten, wurde anstelle der Pyrion-Integration eine eigenständige App entwickelt, welche auf Angular (Frontend) und Flask (Backend) basiert. Die Python-Skripte sind mit der Pyiron-Umgebung kompatibel. Pyiron ist eine integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) für die rechnergestützte Materialwissenschaft. Sie vereint mehrere Werkzeuge in einer gemeinsamen Plattform. Der folgende Abschnitt befasst sich mit dem dezentralisierten Datenimport und der Abfrage von Parametern des additiven Fertigungsprozesses und der mechanischen Prüfung über die Webanwendung auf der Grundlage der entwickelten Ontologieabbildung.

Benutzungsoberfläche: Eine Benutzungsoberfläche zur Datenabfrage und -visualisierung wurde implementiert. Abbildung 1 zeigt das Frontend der Webanwendung. Im entwickelten Frontend kann die Abfrage von Daten entweder direkt vom Server oder durch eine RDF-Datei erfolgen. Der/die Benutzer/in wählt den Abfragetyp und gibt die SPARQL-Abfrage ein. Unter der Schaltfläche „Run Query“ erscheint das Ergebnis der Abfrage in Form von Tripeln.

Abbildung 10: Abfrageseite im Frontend der Webanwendung

Datenimport: Ein Datenimport-Workflow wurde entwickelt, um Daten aus verschiedenen Excel-Tabellen zu importieren und den endgültigen Wissensgraphen zu erstellen. Abbildung zeigt den Datenimport-Workflow. Es wurden zwei Möglichkeiten für den Datenimport implementiert.

Import mittels Python-Code: Wie mit den Projektpartnern besprochen, sind Excel-Tabellen und CSV-Formate die am häufigsten verwendeten Formate für den Datenaustausch in Fertigungs- und Charakterisierungslabors. Wie in Abbildung dargestellt, wurde ein Datenimport-Workflow entwickelt, um Daten aus verschiedenen Excel-Tabellen auf der Grundlage der entwickelten Ontologie zu importieren und den endgültigen Wissensgraphen zu erstellen. Python-Backend-Codeblöcke wurden entwickelt, um Benutzer/innen-Excel-Sheets auf der Grundlage des Ontologie-Mappings zu importieren. Der vorgeschlagene Daten-Workflow, wie in Abbildung dargestellt, kann von verschiedenen Benutzern leicht verwendet werden. Er erfordert jedoch die Verwendung bestimmter Vorlagen, was wenig

Flexibilität bietet, falls in Zukunft neue Vorlagen verwendet werden sollen. Anhang 4 zeigt ein Beispiel für einen Python-Codeblock zum Importieren von Prozessparametern für die additive Fertigung mit Drahtbögen.

Abbildung 9: Datenimport-Workflow

Import über die grafische Benutzungsoberfläche: Es wurde auch eine andere Lösung vorgeschlagen, um Erweiterbarkeit zu erreichen. Wie in Abbildung dargestellt, wird das OntoRefine-Tool verwendet, um neue Excel-Sheets der Ontologiezuordnung zuzuordnen. OntoRefine ist ein von Ontotext entwickeltes Tool zur Umwandlung unstrukturierter Daten in strukturierte Wissensgraphen. Es ermöglicht ein einfaches Mapping von String-Daten auf RDF-Formate und vereinfacht den Prozess der Datentransformation in semantische Webtechnologien [16]. Bei der Importmethode mit grafischer Benutzungsoberfläche müssen Benutzer/innen jedoch die Ontologiestruktur kennen, um genaue bzw. eindeutige Mappings zu erstellen.

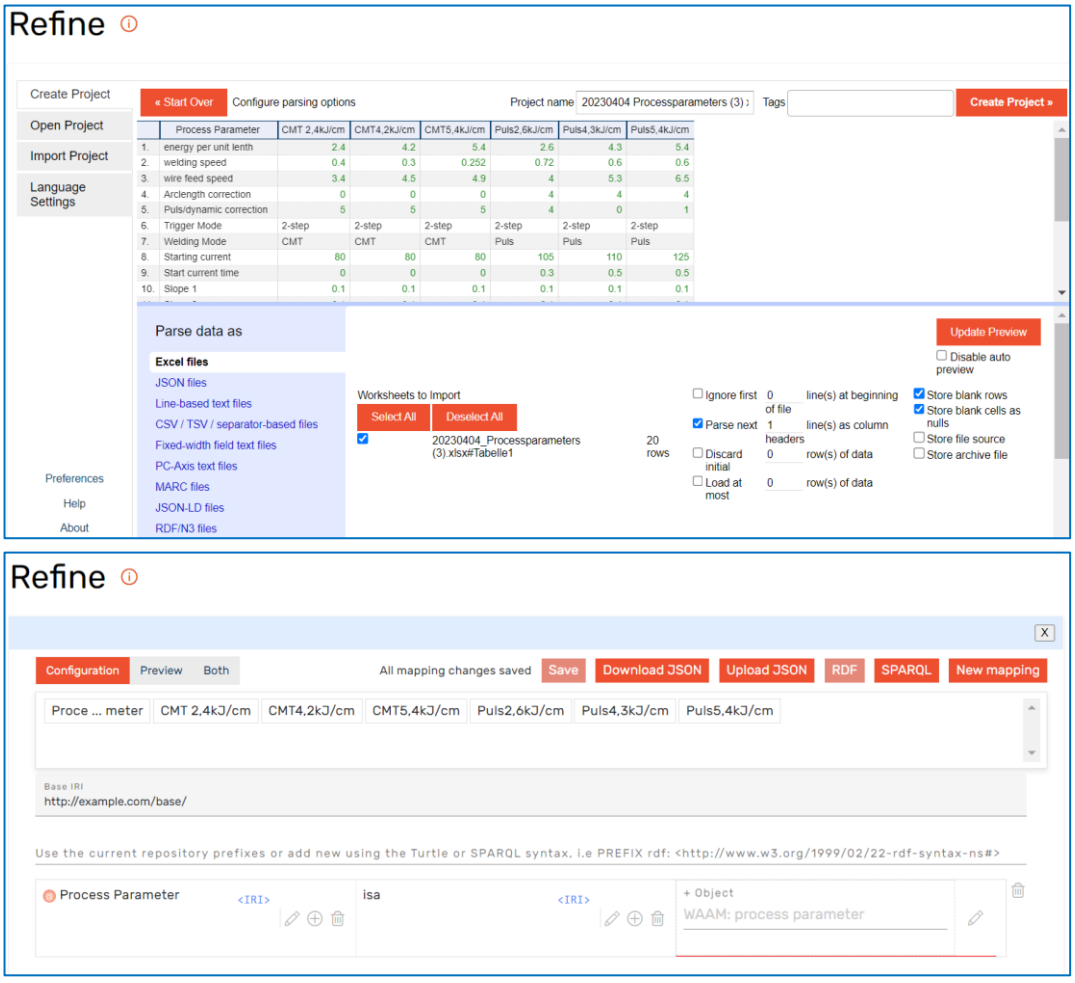


Abbildung 10: Datenimport mit ontoRefine.

Datenabfrage: Die Abfrage erfolgt in SPARQL (SPARQL Protocol and RDF Query Language), einer

Abfragesprache für Daten, die im RDF-Format vorliegen. Es ermöglicht Benutzer/innen, Informationen aus Datenbanken oder anderen Datenquellen, die RDF unterstützen, zu extrahieren. SPARQL ermöglicht die komplexe Abfrage von RDF-Graphen durch die Optionen, RDF-Daten in verschiedenen Datenspeichern zu suchen, hinzuzufügen, zu ändern und zu löschen. Die Funktionsweise von SPARQL-Abfragen wurde anhand ausgewählter Beispiele bereits im Zwischenbericht erläutert.

Visualisierung der Graphen: Die Visualisierung des Wissensgraphen ist über die GraphDB-Schnittstelle möglich. Benutzer/innen können die gewünschten Klassen und die Eigenschaftsbeziehungen zwischen ihnen darstellen. Die Darstellung erleichtert das Verständnis der komplexen Ontologie-Mappings, insbesondere für die Zwecke der Erweiterung und Bearbeitung. Abbildung zeigt ein Beispiel für die Klasse „EOS_DirectPart“ und die damit verbundenen Klassen und Beziehungen.

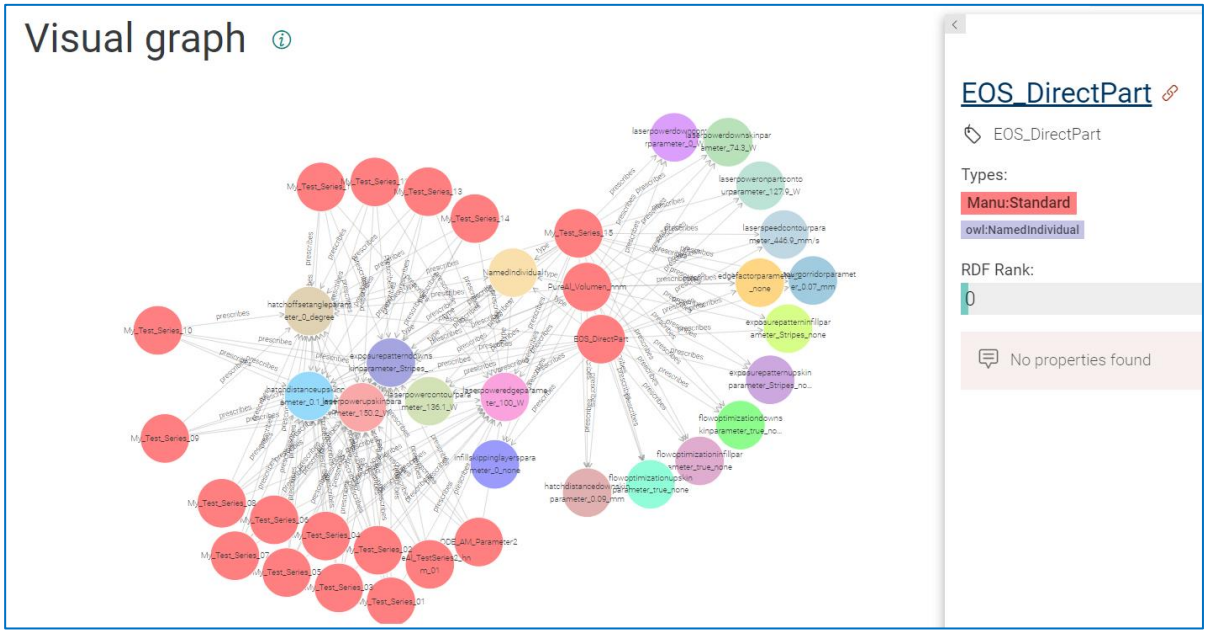


Abbildung 11: Darstellung des Wissensgraphen

Vergleich mit den angestrebten Zielen

Unter Berücksichtigung der erwähnten Anpassungen konnten die Ziele des Arbeitspakets erreicht werden. Die entwickelte Applikation sowie der Datenimport-Workflow stellen eine effektive Lösung für die dezentrale Datenerfassung und -übertragung dar.

Arbeitspaket 8: Baysian Updating-Methode

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Integration statistischer Methoden in die Web-App zur Verarbeitung von experimentellen Kennwerten.

Teilpakete

- **AP 8.1:** Implementierung des Bayesian Updatings auf Server, Verknüpfung von Informationen zur Qualität der Charakterisierung (Rauschen, Fehler) mit initialen Werten (a priori Verteilung, Expertenwissen) sowie der ermittelten Kennwerte aus Simulation und Experiment (Maximum-Likelihood-Methode), Ergebnis: Stochastische Verteilungen (a posteriori) zur Beschreibung von Unschärfe in Kennwerten
- **AP 8.2:** Nutzung des Bayesian-Updating-Frameworks durch Übermittlung von experimentellen Kennwerten der gleichen Proben, die mit gleichen Verfahren, aber an verschiedenen Standorten ermittelt wurden (im Sinne eines Round-Robin-Tests):

Erzielte Ergebnisse

Statistische Methoden: Wie in den Arbeitspaketen 2 und 3 geplant, wurden die additive Fertigung und die experimentellen Charakterisierungstests gemäß dem Projektplan durchgeführt. Die aufgezeichneten experimentellen Messdaten weisen jedoch eine Komplexität auf, die weitere experimentelle Tests erfordert, um sie für die Bayesian-Updating-Methode geeignet zu machen. Aufgrund der komplexen Beschaffenheit und der relativ geringen Menge der Daten, sowie der Herausforderung, Daten aus unterschiedlichen Quellen zu integrieren und insbesondere wegen der festen Annahmen über die Datenverteilung, erscheint die Anwendung der Bayesian-Updating-Methode für die Schätzung von Parametern und deren Zuverlässigkeit nicht zweckmäßig. Stattdessen werden klassische statistische Methoden bevorzugt, da sie generell einfacher zu deuten sind und somit einen klaren Überblick über die Daten ermöglichen. Klassische statistische Methoden umfassen ein breites Spektrum von Techniken für die Datenanalyse. Diese Methoden sind grundlegend für die Statistik und werden in der Regel verwendet, um Merkmale von Datensätzen zusammenzufassen, zu beschreiben und abzuleiten. Die deskriptive Statistik liefert entscheidende Einblicke in einen Datensatz, indem sie dessen zentrale Tendenz und Variabilität quantifiziert. Die Varianz quadriert die Abweichungen um den Mittelwert und liefert so ein Maß für die Gesamtstreuung der Daten, während die Standardabweichung als Quadratwurzel der Varianz ein skalenkonsistentes Maß für die Streuung liefert. Darüber hinaus bietet die Spanne eine einfache Darstellung der Differenz zwischen dem Maximal- und dem Minimalwert und verdeutlicht die Gesamtspanne des Datensatzes. Der Interquartilsabstand (IQR) verfeinert dies noch, indem er die Streuung der mittleren Hälfte der Daten aufzeigt und so ein klareres Bild der Datenverteilung ohne den Einfluss von Ausreißern liefert. Diese Statistiken bieten insgesamt einen umfassenden Überblick über die Merkmale der Daten, der für alle nachfolgenden Analysen und Entscheidungsprozesse unerlässlich ist.

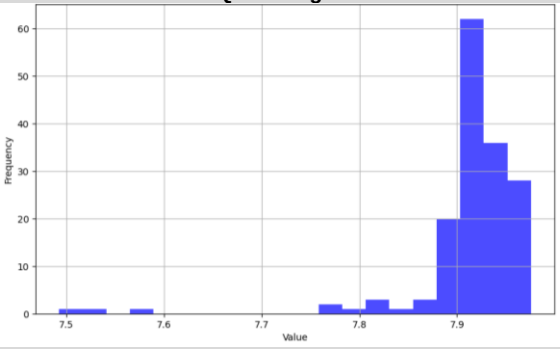
Integration in die Webanwendung: Deskriptive Statik kann direkt in der SPARQL-Abfrage durchgeführt werden, Funktionen wie Zählen, Summieren, Mittelwertbildung, Minimum und Maximum können verwendet werden. Allerdings unterstützen SPARQL-Abfragen keine komplexeren statistischen Funktionen wie Standardabweichung, Varianz oder die Erstellung von Histogrammen direkt in einer Abfrage. Wie unten gezeigt, wurden für die Dichte-, Durchschnitts-, Minimal- und Maximalwerte abgefragt. Deskriptive statistische Methoden können mit komplexeren statistischen Funktionen im Backend mit Python angewendet werden. Im Anhang 5 ist ein Beispiel für einen Python-Codeblock zur Anwendung deskriptiver statistischer Methoden gezeigt. Im Folgenden wird eine Beispielanfrage mit statistischen Funktionen gezeigt.

Beispiel 1:
SPARQL-Abfrage mit statistischen Funktionen (Histogramm der Dichtewerte)

```
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX Comm: <http://www.ontologyrepository.com/CommonCoreOntologies/>
PREFIX obo: <http://purl.obolibrary.org/obo/>

SELECT (AVG(xsd:decimal(?value)) AS ?averageValue)
      (MIN(xsd:decimal(?value)) AS ?minValue)
      (MAX(xsd:decimal(?value)) AS ?maxValue)
WHERE {
  ?density rdf:type Comm:Density .
  ?density Comm:is_measured_by ?measurement .
  ?measurement obo:inheres_in ?infoLine .
  ?infoLine Comm:has_decimal_value ?value .
}
```

Antwort für die SPARQL-Anfrage:



Vergleich mit den angestrebten Zielen

Nach nochmaliger, eingehender Analyse der Problemstellung während des Projektverlaufs wurden, abweichend von der ursprünglichen Planung, die Ziele des Arbeitspakets mittels klassischer Statistik umgesetzt, weil die Integration ebendieser statistischer Methoden in die Web-App eine einfache und effektive Auswertung der experimentellen Kennwerte ermöglicht.

Arbeitspaket 10: Validierung des Frameworks

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Durchführung einer Validierung anhand eines Validierungsplans.

Teilpakete

- **AP 10.1:** Abruf der auf dem Server erfassten Kennwerte (ohne weitere Instruktion durch Partner)
- **AP 10.2:** Prüfung der Werte und messtechnische Validierung für die drei ausgewählten Fertigungsverfahren

Erzielte Ergebnisse

Es wurde ein Validierungsplan für das Framework entwickelt, um die Genauigkeit, Konsistenz und Zuverlässigkeit einschließlich der semantischen Modellierung und der Webanwendung zu gewährleisten.

Vorgehensweise: Zur Validierung wurden die im folgenden beschriebenen Schritte bzw. Prüfungen mit den entsprechenden Tools durchgeführt:

1. **Konsistenzprüfungen:**
   - 1.1. **Protégé** bietet robuste Unterstützung durch seine Integration von sog. Reasonern. Reasoner sind bei der semantischen Modellierung von entscheidender Bedeutung, da sie bei der Überprüfung der logischen Konsistenz von Ontologien, der Ableitung von neuem Wissen und der Überprüfung von Unterklassenbeziehungen helfen. Es gibt mehrere verfügbare Reasoner wie HermiT, Pellet und Fact++.
   - 1.2. **Der HermiT-Reasoner** wurde für Reasoning und Konsistenzprüfungen verwendet. HermiT ist ein OWL-Reasoner, der in der Lage ist, Ontologien mit hoher logischer Komplexität zu verarbeiten. Er ist gut geeignet für Anwendungen, die umfassende Reasoning-Fähigkeiten benötigen, um sicherzustellen, dass alle logischen Implikationen der Ontologie vollständig erforscht werden. Der Reasoner verifiziert, dass es keine logischen Widersprüche innerhalb der Ontologie gibt.
2. **Genauigkeitsüberprüfung:**
   Es wurden Gespräche mit Partnern und Domänenexperten geführt, um sicherzustellen, dass die Wissensgraphen den additiven Fertigungsprozess genau modellieren. In den Gesprächen wurde überprüft, ob die Ontologie alle notwendigen Konzepte und Beziehungen abdeckt, die für den Bereich relevant sind, und ob die Ontologie das von den Fachleuten vereinbarte Wissen des Bereichs korrekt wiedergibt. Die von Benutzer/innen importierten Daten und Instanzen des Wissensgraphen wurden mit statistischen Methoden validiert, um Ausreißer oder Fehler bei der Dateneingabe zu erkennen.
3. **Leistungsbewertung:**
   Der Zweck der Leistungsbewertung besteht darin, sicherzustellen, dass die Webanwendung die erwartete Last effizient bewältigen kann und den Benutzer/innen ein ansprechendes Erlebnis bietet. Die Reaktionszeit der Anwendung und die Handhabung der Gleichzeitigkeit der Benutzer/innen wurden bewertet. Ontotext graphDB bietet eine spezielle Benutzungdoberfläche für die Datenbank, um das System zu überwachen und langsame Abfragen zu erkennen. Derzeit werden die Abfragen aufgrund der relativ geringen Datenmenge in Millisekunden durchgeführt. In Zukunft, wenn mehr Produktions- und Testergebnisse in das Framework hochgeladen wurden, wäre die Überwachung der Server-Antwortzeit jedoch von entscheidender Bedeutung. Abbildung zeigt die Überwachung der Benutzungsoberfläche von graphDB. Außerdem wurden weitere Tests durchgeführt, um die Leistung des Frameworks zu validieren.

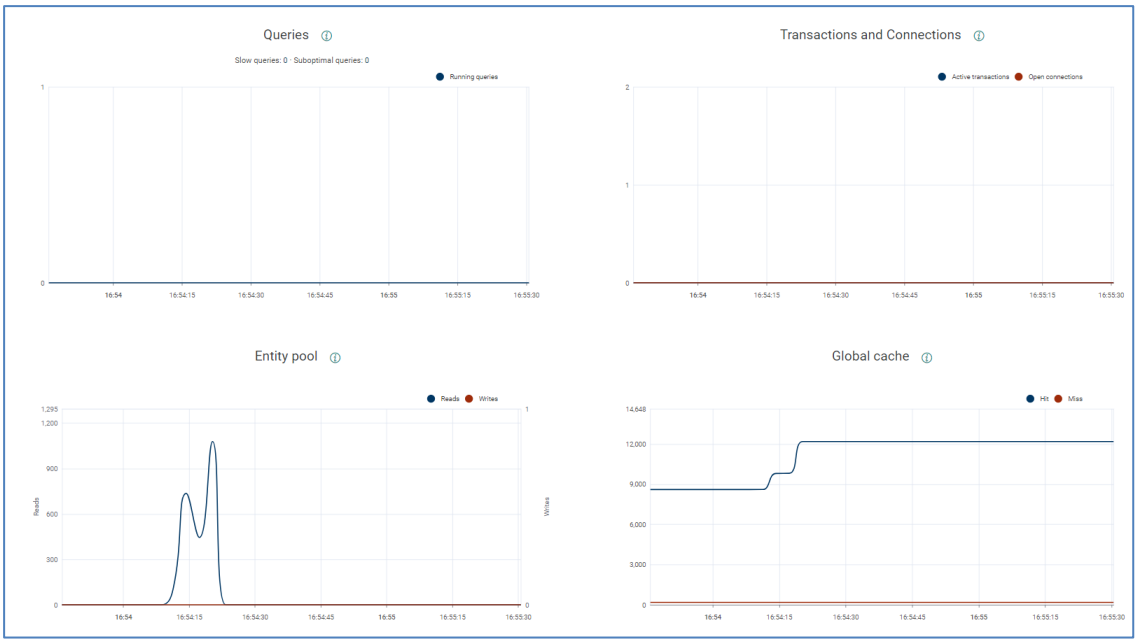


Abbildung 12: Graph-Datenbank-Server-Systemüberwachung

4. **Funktionelle Prüfung:** Funktionstests werden durchgeführt, um sicherzustellen, dass alle Benutzungsoberflächen wie erwartet funktionieren und die Daten korrekt eingegeben und abgerufen werden. Dies geschieht manuell durch wiederholte Überprüfung der Funktionalität der Komponenten der Webanwendung sowie durch Feedback von Partnern.
   4.1. **Abfragefunktionalität:** Die häufigsten Abfragen und die Abfragen zur Beantwortung der Kompetenzfragen, die bei der Erstellung der Ontologie verwendet wurden, wurden herangezogen, um sicherzustellen, dass das System genaue und vollständige Ergebnisse liefert. In Tabelle *7* sind einige typische Kompetenzfragen aufgeführt. Abbildung veranschaulicht eine mögliche Instanziierung der fünften Kompetenzfrage (KF5) aus Tabelle *7* für die WAAM-Ontologie, die bei Anfragen die entsprechenden Prozess- bzw. Materialparameter liefert.

ID	Kompetenzfragen für WAAM und CEM
KF1	Welche Art von Maschine wird für die Herstellung verwendet?
KF2	Was sind die Inputs und Outputs während des Herstellungsprozesses?
KF3	Was sind die Teilprozesse des Herstellungsprozesses?
KF4	Welcher Schweißmodus wird bei der Herstellung verwendet?
KF5	Wie lauten die Messungen der charakteristischen Temperatur und der spezifischen Wärmekapazität eines bestimmten Artefakts, das durch ein WAAM-Verfahren hergestellt wurde, wie sie durch einen dynamischen Rasterkalorimetrietest bestimmt werden?

Tabelle 7: Kompetenzfragen zur Validierung des Frameworks

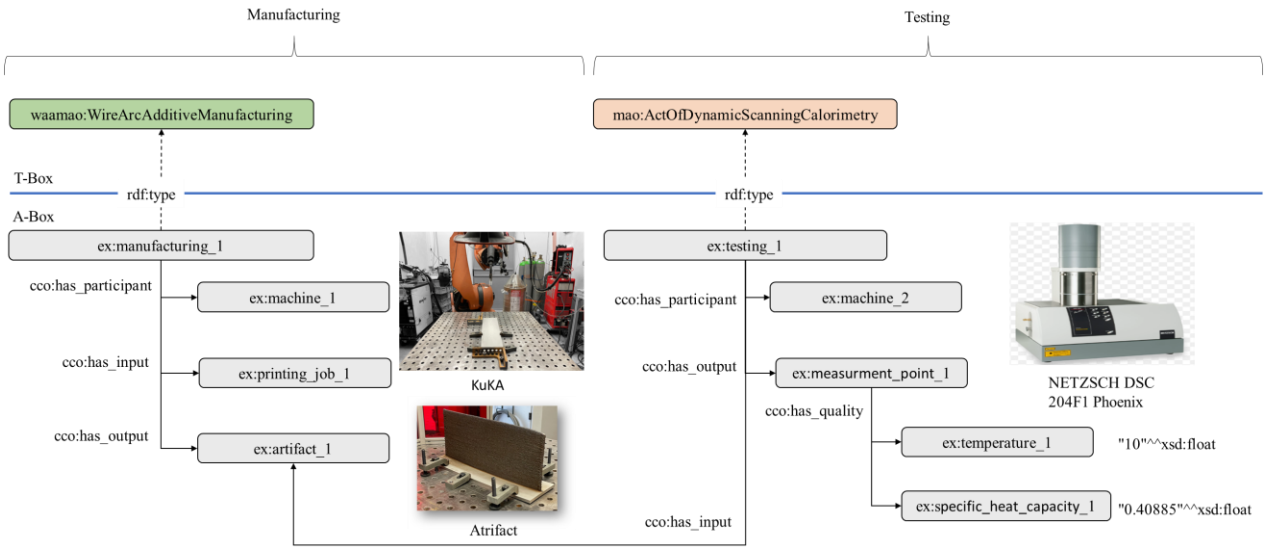


Abbildung 13: Schematische Darstellung einer Prozesskette zur Herstellung (Manufacturing, links) und Prüfung (Testing, rechts) einer Wandstruktur („Wall structure“, Bildmitte): Die Abbildung ist in zwei Teile gegliedert, die terminologische Box (T-Box, oberer Teil der Abbildung) und die assertionale Box (A-Box, unterer Teil der Abbildung). In der T-Box werden die wichtigsten Klassen der Ontologie WAAMAO vorgestellt, während die A-Box eine Beispielinstanziierung illustriert. In der A-Box werden die Instanzen verknüpft, um die Prozesskette zu modellieren: Die Wandstruktur („ex:artifact_1“) durchläuft einen WAAM-Herstellungsprozess .

Vergleich mit den angestrebten Zielen

Die Ziele des Arbeitspakets wurden erreicht.

Arbeitspaket 11: Vernetzung in der Community und Öffentlichkeitsarbeit

Das Ziel dieses Arbeitspakets war der Austausch innerhalb der Community sowie die Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation mit Außenstehenden.

Teilpakete

- **AP 11.1:** Reger Austausch mit anderen aus der Ausschreibung MaterialDigital geförderten Forschenden, Unterstützung der anvisierten Roadmap zur Digitalisierung von Materialien der Kooperationsplattform
- **AP 11.2:** Kontinuierliche Publikationstätigkeiten sowie Präsentationen auf Tagungen
- **AP 11.3:** Dokumentation und graphische Aufbereitung der Client-Server-Architektur zur Verbreitung an weitere Konsortien

Erzielte Ergebnisse

Wie geplant, wurde eine enge Abstimmung mit der Plattform MaterialDigital erreicht. Im Folgenden wird die Koordination mit dem PMD in den Bereichen Ontologieentwicklung und Workflow und Interoperabilität beschrieben. Es wurden wöchentliche Treffen mit der Workflow-Gruppe und zweiwöchentliche Treffen mit der Gruppe für semantische Interoperabilität durchgeführt. ODE_AM nahm aktiv an der Generalversammlung der Plattform „MaterialDigital“ in Berlin 2022 und in Karlsruhe 2023 teil, wo ein Poster und eine Präsentation des Projekts vorgestellt wurden. Die Diskussion mit den neuen PMD-Phase-2-Projekten war auch nützlich, um die aus dem Projekt gezogenen Lehren zu erörtern. Die Ontologiedateien (.rdf) wurden eingereicht und im PMD Github repository veröffentlicht:

- https://github.com/materialdigital/materialdigital1_ontology_collection

Es ist geplant, einen Artikel in der Zeitschrift „Advanced Engineering Materials“, in Abstimmung mit den

Partnern und der digitalen Plattform MaterialDigital, zu veröffentlichen. Die Einreichung ist nach Ablauf der Projektlaufzeit geplant. Die Dokumentation der in AP 11.3 erwähnten Client-Server-Architektur ist in Arbeitspaket 6 enthalten.

Literatur

[1] Mohd Ali, M., Rai, R., Otte, J. N., & Smith, B. (2019). A product life cycle ontology for additive manufacturing. Computers in Industry, 105, 191–203. https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.007

[2] Arp, R., Smith, B., & Spear, A. D. (2015). Building Ontologies with Basic Formal Ontology (The MIT Press). The MIT Press.

[3] Park, H., Ko, H., Lee, Y. T. T., Feng, S., Witherell, P., & Cho, H. (2021). Collaborative knowledge management to identify data analytics opportunities in additive manufacturing. Journal of Intelligent Manufacturing. https://doi.org/10.1007/s10845-021-01811-1

[4] Mayerhofer, M., Lepuschitz, W., Hoebert, T., Merdan, M., Schwentenwein, M., & Strasser, T. I. (2021). Knowledge-Driven Manufacturability Analysis for Additive Manufacturing. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2, 207–223. https://doi.org/10.1109/ojies.2021.3061610

[5] Eddy, D., Krishnamurty, S., Grosse, I., Perham, M., Wileden, J., & Ameri, F. (2015). Knowledge Management with an Intelligent Tool for Additive Manufacturing. Volume 1A: 35th Computers and Information in Engineering Conference. https://doi.org/10.1115/detc2015-46615

[6] Dinar, M., & Rosen, D. W. (2017). A Design for Additive Manufacturing Ontology. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 17(2). https://doi.org/10.1115/1.4035787

[7] Roh, B. M., Kumara, S. R. T., Witherell, P., & Simpson, T. W. (2021). Ontology-based Process Map for Metal Additive Manufacturing. Journal of Materials Engineering and Performance, 30(12), 8784–8797. https://doi.org/10.1007/s11665-021-06274-2

[8] Xiong, Y., Dharmawan, A. G., Tang, Y., Foong, S., Soh, G. S., & Rosen, D. W. (2020). A knowledge-based process planning framework for wire arc additive manufacturing. Advanced Engineering Informatics, 45, 101135. https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101135

[9] Dimassi, S., Demoly, F., Cruz, C., Qi, H. J., Kim, K. Y., André, J. C., & Gomes, S. (2021). An ontology-based framework to formalize and represent 4D printing knowledge in design. Computers in Industry, 126, 103374. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103374

[10] Sanfilippo, E. M., Belkadi, F., & Bernard, A. (2019). Ontology-based knowledge representation for additive manufacturing. Computers in Industry, 109, 182–194. https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.03.006

[11] Hagedorn, T. J., Krishnamurty, S., & Grosse, I. R. (2018). A Knowledge-Based Method for Innovative Design for Additive Manufacturing Supported by Modular Ontologies. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 18(2). https://doi.org/10.1115/1.4039455

[12] Liang, J. S. (2018). An ontology-oriented knowledge methodology for process planning in additive layer manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 53, 28–44. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.03.003

[13] Sun, S., Brandt, M. and Easton, M. (2017) “Powder Bed Fusion Processes,” Laser Additive Manufacturing, pp. 55–77. Available at: https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100433-3.00002-6.

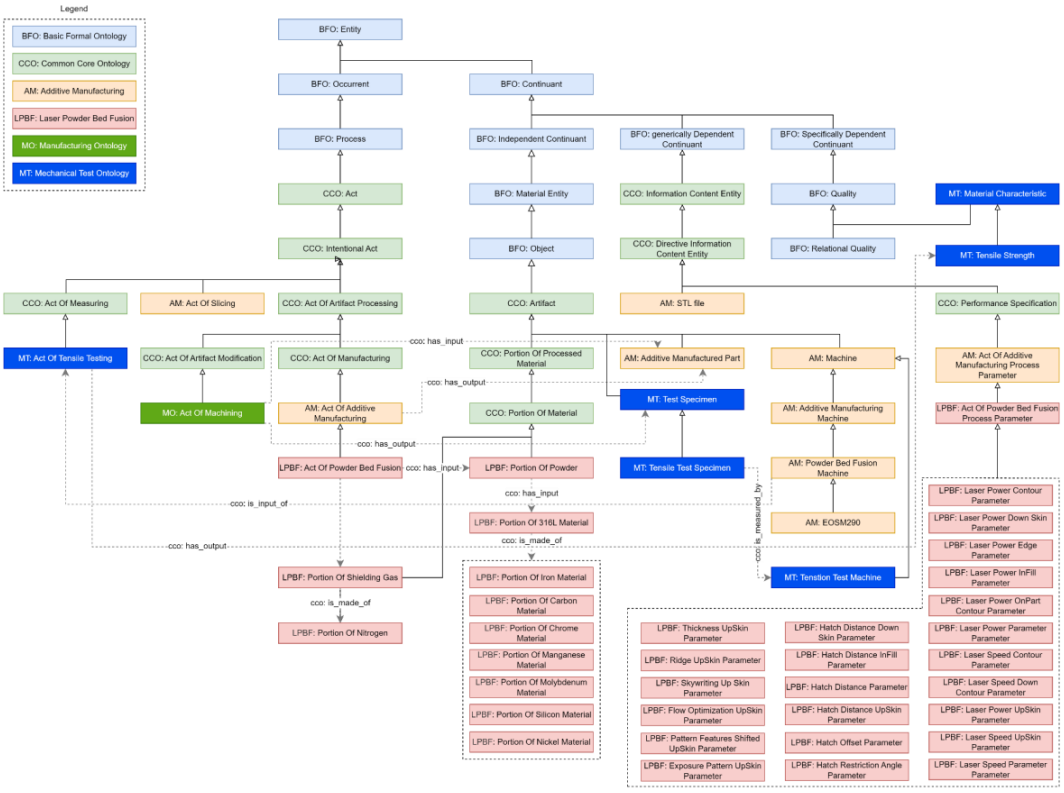
[14] Jin, W., Zhang, C., Jin, S., Tian, Y., Wellmann, D., & Liu, B. (2020). Wire Arc Additive Manufacturing of Stainless Steels: A Review. Applied Sciences, 10(5), 1563. https://doi.org/10.3390/app10051563

[15] T. Dreier et al., "3D printing of aluminum oxide via composite extrusion modeling using a ceramic injection molding feedstock," Materials & Design, vol. 227, p. 111806, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111806.

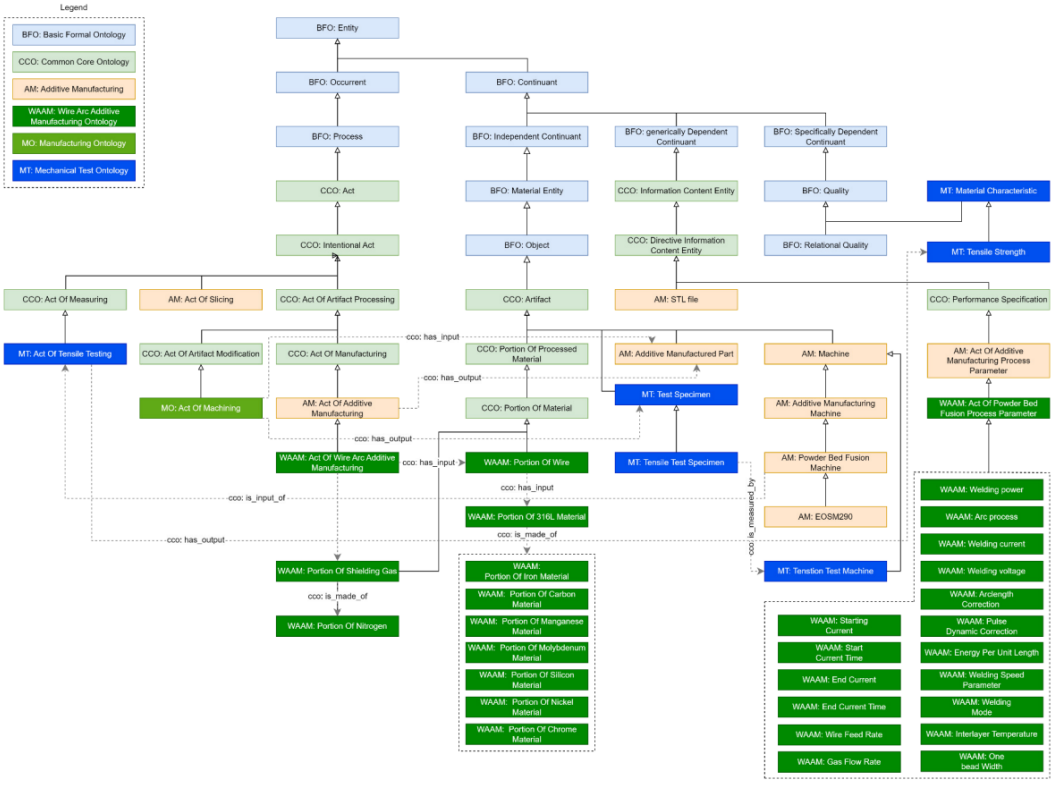
[16] “Ontotext Refine,” Ontotext. https://www.ontotext.com/products/ontotext-refine/ (accessed Mar. 15, 2024).

Anhang :

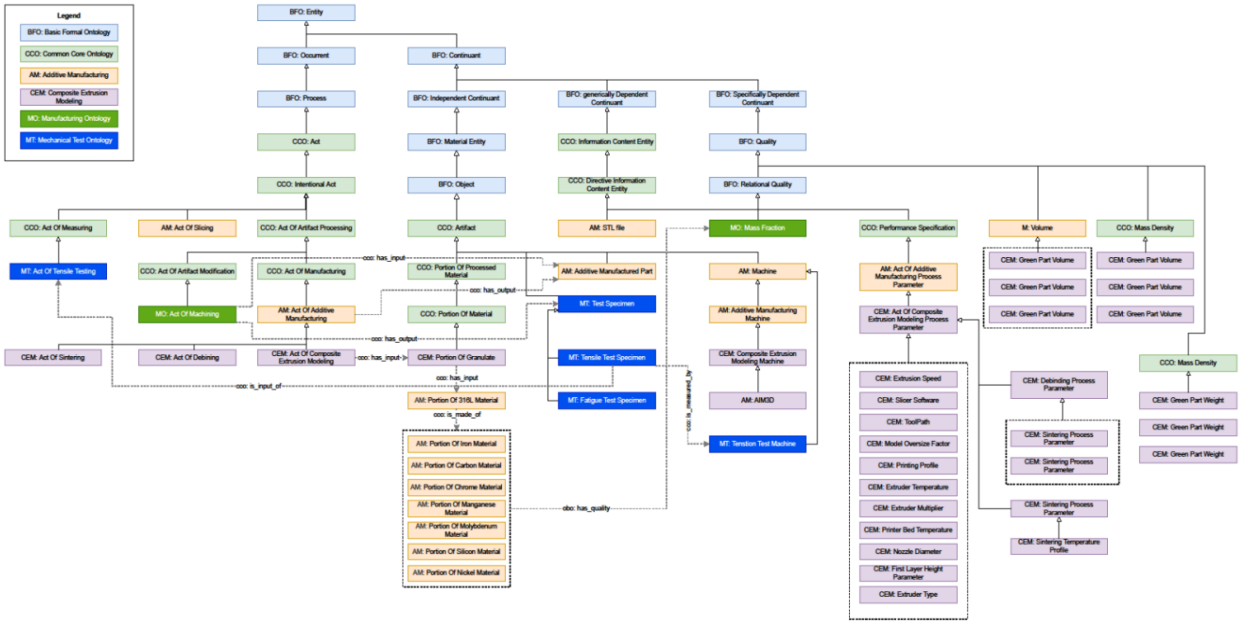
Anhang 1: Klassenstruktur der LPBF Ontologie



Anhang 2: Klassenstruktur der WAAM-Ontologie



Anhang 3: Klassenstruktur der CEM-Ontologie



Anhang 4: WAAM-Prozessparameter Datanimport

```
from rdflib import Graph, Namespace, URIRef, L iteral
from rdflib.namespace import RDF, XSD
import pandas as pd
# Initialize the RDF graph
g = Graph()
ontology_base =
"http://www.semanticweb.org/wirearcadditivemanufacturingontology#"
n = Namespace(ontology_base)
def create_class_instances(df, graph, namespace):
for index, row in df.iterrows():
# For each column, create an instance of the class corresponding to the column
name
for column in df.columns:
class_uri = namespace[column] # Assuming a class for each column
instance_uri = URIRef(f"{ontology_base}{column}/{index}") # Unique URI for
each instance
graph.add((instance_uri, RDF.type, class_uri))
graph.add((instance_uri, namespace[f"{column}Value"], Literal(row[column],
datatype=XSD.string)))
# Create instances based on the DataFrame
create_class_instances(df, g, n)
# Serialize the graph to a TTL file
output_ttl_path = '/mnt/data/modified_ontology.ttl'
g.serialize(destination=output_ttl_path, format='turtle'
```

Anhang 5: Deskriptive Statistik in Python

```
import pandas as pd
from scipy import stats
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Load the CSV file into a DataFrame
data = pd.read_csv('/mnt/data/query-result.csv')

# Display the first few rows to understand its structure
print(data.head())

# Calculate descriptive statistics for the 'value' column
descriptive_stats = data['value'].describe()

# Print the statistics to review
print("Descriptive Statistics:\n", descriptive_stats)

# Perform a one-sample t-test to check if the mean is significantly different
from 8.0
t_test_result = stats.ttest_1samp(data['value'], popmean=8.0)
# Print the t-statistic and p-value
print(f"T-statistic: {t_test_result.statistic}, P-value: {t_test_result.pvalue}")

# Generate a histogram with 20 bins
plt.figure(figsize=(10, 6))
data['value'].hist(bins=20, color='blue', alpha=0.7)
plt.title('Histogram of Values')
plt.xlabel('Value')
plt.ylabel('Frequency')
plt.show()
```