



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Institut für
Fertigungstechnik und
Photonische Technologien



Diplomarbeit

Erstellung eines Digitalen Produktpasses für ein
Spritzgussteil mittels Asset Administration Shell:

Fokus auf den CO₂-Fußabdruck entlang der
Wertschöpfungskette vom Werkzeugstahl bis zum
Kunststoffprodukt

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs (Dipl.-Ing oder DI) unter der Leitung von

Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Fabian Trautner

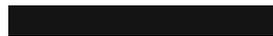
(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Nikolas LOIDOLT, BSc



Klosterneuburg, im September 2024

Nikolas Loidolt

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Klosterneuburg, im September 2024

Nikolas Loidolt

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zuallererst ganz besonders bei meiner Frau Sophie bedanken. Ohne ihrer Motivation und ihrer unermüdlichen Unterstützung wäre diese Diplomarbeit nicht zustande gekommen und ich hätte womöglich das Masterstudium niemals erfolgreich abgeschlossen.

Ein großes Dankeschön gebührt meiner Familie, insbesondere meiner Mutter Michaela, die mir das Studium ermöglicht hat. Ihre Unterstützung war ausschlaggebend, um gerade im Bachelorstudium meinen Fokus vollumfänglich auf die Universität legen zu können.

Ein herzliches Dankeschön gilt ebenfalls meinen Freunden und ehemaligen Studienkollegen, die mich immer wieder angespornt haben, das Studium abzuschließen. Sowohl mit positiven als auch mit spitzen Anmerkungen.

Weiters möchte ich mich bei Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Trautner bedanken, der diese Arbeit trotz seines außerordentlich vollen Terminkalenders betreut hat und immer für Feedback und Anmerkungen zur Verfügung gestanden ist. Das Projektteam mit Rainer Gerstbauer und Levon Harutyunyan hatte immer eine offene Tür für mich, und ich möchte mich für die Zusammenarbeit und technische Unterstützung im Zuge dieser Arbeit bedanken.

Abschließend bedanke ich mich bei der gesamten Kollegschaft am IFT. Die Atmosphäre und Zusammenarbeit war hervorragend und die Unterstützung im Rahmen dieser Arbeit ging weit über das Maß von gewöhnlichen Institutskollegen hinaus.

Kurzfassung

Mit der Einführung der „Ökodesign-Verordnung“ der EU im Rahmen des European Green Deal wurde der digitale Produktpass (DPP) offiziell etabliert. Die damit einhergehende Datentransparenz könnte einen maßgeblichen Beitrag zur Förderung der Kreislaufwirtschaft leisten. Obgleich der legislative Kontext des DPP bereits hinreichend geklärt ist, bestehen hinsichtlich seiner praktischen Umsetzung noch diverse offene Fragepunkte.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage, wie ein Produktionsprozess eines Kunststoffprodukts mithilfe des DPP dargestellt werden kann. Dieser Prozess beinhaltet im Rahmen dieser Arbeit den Zuschnitt eines Halbzeugs aus Werkzeugstahl, das spanenden Bearbeiten zur Erstellung eines Inlays zum Einbau in ein bestehendes Spritzgusswerkzeug sowie den Spritzgussprozess, welcher zur Erstellung des Kunststoffteils notwendig ist. In der Folge soll auf Basis dieser Modellierung der CO₂-Fußabdruck des Kunststoffprodukts über den Gesamtprozess hinweg berechnet werden.

Dafür ist es unerlässlich, ein einheitliches, standardisiertes und interoperables Datenformat für den DPP zu wählen. Eine Möglichkeit, welche auch in der Literatur großen Zuspruch findet, ist die Asset Administration Shell (AAS) aus dem Kontext der Industrie 4.0.

Basierend auf einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 werden die Systemgrenzen des gesamten Produktionsprozesses bestimmt, welche die beteiligten Produkte, Ressourcen und Teilprozesse umfassen. Diese werden als DPP oder digitaler Prozesspass im Datenformat der AAS modelliert, miteinander vernetzt und mit Primär- und Sekundärdaten befüllt. Durch die Verwendung von entsprechenden Software Tools werden diese Daten verfügbar gemacht und in eine eigens entwickelte Berechnungslogik integriert. Mit Hilfe dieser Berechnungslogik wird der CO₂-Fußabdruck des Kunststoffteils ermittelt und an den DPP des Bauteils zurückgegeben.

Somit lässt sich durch die Verwendung dieser externen Logik eine Berechnung und Akkumulation von Daten eines mehrstufigen Produktionsprozesses realisieren. Gleichzeitig wird eine standardisierte Bereitstellung der Ergebnisse durch die Verwendung der AAS ermöglicht. Die einzelnen AAS werden dabei so entworfen, dass diese relevanten Daten für einen DPP für Produkte und Ressourcen bzw. DPssP für Prozesse für die Elemente entlang der Wertschöpfungskette bereitstellen. Im Rahmen dieser Arbeit können auf diese Weise relevante Umweltdaten über den Prozess hinweg berechnet werden.

Abstract

The introduction of the EU's 'Ecodesign' regulation as part of the European Green Deal officially established the Digital Product Passport (DPP). The data transparency that goes along with it will make a significant contribution to promoting the circular economy. Although the legislative context of the DPP has already been sufficiently clarified, there are still various open questions regarding its practical implementation.

This thesis deals with the question of how a production process for a plastic product can be visualised with the help of DPP. In the context of this work, this process includes the cutting of a semi-finished product from tool steel, the machining to create an inlay for installation in an existing injection moulding tool and the injection moulding process required to create the plastic part. Subsequently, the CO₂ footprint of the plastic product across the entire process is to be calculated on the basis of this modelling.

To do this, it is essential to choose a uniform, standardized and interoperable data format for the DPP. One option, which is also very popular in the literature, is the Asset Administration Shell from the context of Industry 4.0.

Based on a life cycle assessment according to DIN EN ISO 14040, all products, resources and sub-processes involved are determined. These are modelled as DPP or digital process passports in the AAS data format, linked together and filled with primary and secondary data. The use of appropriate software tools makes this data available and integrates it into a specially developed calculation logic. This calculation logic determines the CO₂ footprint of the plastic part and returns it to the DPP of the component.

The use of this external logic therefore makes it possible to calculate and accumulate data from a multi-stage production process. At the same time, standardized provision of the results is made possible by using the AAS. The individual AAS are designed in such a way that they provide relevant data for a DPP for products and resources or DPssP for processes for the elements along the value chain. As part of this work, relevant environmental data can be calculated across the process in this way.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Grundlagen und Stand der Technik	9
2.1	Der digitale Produktpass	9
2.2	Ökobilanz und CO ₂ -Fußabdruck	11
2.3	Asset Administration Shell.....	12
2.4	Prozessdaten innerhalb der AAS	14
2.5	Der digitale Produktpass im Kontext der Asset Administration Shell.....	16
2.6	Der digitale Prozesspass.....	17
2.7	Berechnung des CO ₂ -Fußabdrucks mittels AAS in der Literatur	18
2.8	Überblick über die genutzten Software Tools	20
2.8.1	AASX Package Explorer	20
2.8.2	AASX Server	20
2.8.3	Node RED	20
2.9	Das Produkt-Prozess-Ressource Modell.....	21
3	Zielsetzung	24
4	Methodische Vorgangsweise	25
5	Der Digitale Produktpass für ein Spritzgussteil innerhalb der Asset Administration Shell	27
5.1	Physische und digitale Betrachtungsebenen.....	27
5.2	Prozessbeschreibung und Modellbildung	28
5.2.1	Beschreibung der betrachteten Wertschöpfungskette in der Produktion	28
5.2.2	Definierte Rahmenbedingungen für die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040	30
5.2.3	Visualisierung der Wertschöpfungskette mittels Asset Administration Shells	33
5.2.4	Erstellung der Asset Administration Shells im AASX Package Explorer	34
5.2.5	Modellierung der Asset Administration Shells für den digitalen Produktpass	35
5.2.6	Modellierung der Asset Administration Shells für den digitalen Prozesspass.....	37

5.2.7	Beziehungsmodellierung zwischen den AAS	39
5.2.8	Breitstellung von Asset Administration Shells auf lokalem Server mittels AASX Server	43
5.3	Erhebung der Prozessdaten	44
5.3.1	Messaufbau zur Energiemessung an der Bandsäge Behringer HBE 321A.....	44
5.3.2	Abfrage der Datenbank inklusive Datenverarbeitung mittels Python Skript.....	47
5.3.3	Weitere notwendige Daten zur Berechnung des CO ₂ e entlang der Wertschöpfungskette.....	48
5.4	Berechnung des CO ₂ -Fußabdrucks entlang der Wertschöpfungskette ..	52
5.4.1	Detaillierte Betrachtung am Beispiel Energieverbrauch Sägeprozess mittels Node-RED.....	53
5.4.2	Zusammenfassung der weiteren Berechnungslogik.....	56
6	Ergebnisse	59
6.1	Ergebnisse der Berechnung des CO ₂ -Fußabdrucks	59
6.2	Darstellung der Ergebnisse innerhalb der Asset Administration Shell....	62
7	Zusammenfassung und Ausblick	65
8	Literaturverzeichnis	68
9	Abbildungsverzeichnis.....	73
10	Tabellenverzeichnis	75
Anhang	76
	Anhang A – Ergebnisse aus der Berechnungslogik in tabellarischer Form.....	76

Abkürzungsverzeichnis

AAS	Asset Administration Shell
API	Application Programming Interface
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalent
DPP	Digitaler Produktpass
DPssP	Digitaler Prozesspass
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IDTA	Industrial Digital Twin Association
JSON	Java Script Object Notation
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
PPR	Produkt-Prozess-Resource
REST	Representational State Transfer
TCP	Transmission Control Protocol
URL	Uniform Resource Locator

1 Einleitung

Mit der Veröffentlichung der EU-Verordnung (EU) 2024/1781 der sogenannten „Ökodesign-Verordnung“ im Rahmen des „European Green Deals“ ist der digitale Produktpass (DPP) in den Fokus der politischen und industriellen Diskussion gerückt. In dieser Verordnung wird hervorgehoben, dass der DPP als entscheidend für die Förderung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft angesehen wird. Der DPP soll durch die Bereitstellung relevanter Informationen den gesamten Produktlebenszyklus begleiten. Ein wichtiger Teil dieser Informationen ist u. a. Transparenz über die Umweltauswirkungen eines Produkts zu schaffen.

Während die legislativen Rahmenbedingungen zum DPP gegeben sind, gibt es hinsichtlich der praktischen Umsetzung noch offene Fragen.

Diese Arbeit geht der Frage nach, wie die Wertschöpfungskette eines Produktionsprozesses in der Spritzgussdomäne digital modelliert werden kann, sodass ein einheitliches Framework entsteht, das die Berechnung und transparente Darstellung der CO₂-Fußabdrücke entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht und den CO₂-Fußabdruck des Endprodukts, eines Kunststoffbauteils, in dessen DPP ausgibt.

Dafür ist es notwendig, dass die Daten und Informationen im DPP in einem standardisierten und interoperablen Datenformat vorliegen. Hierfür bietet sich das Konzept der Asset Administration Shell (AAS) an, welches aus dem Umfeld der Industrie 4.0 stammt und die benötigten Anforderungen erfüllt. Plociennik et al. [1] plädieren für die Verwendung von AAS im Zusammenhang mit dem DPP.

Neben den für die einzelnen Prozessschritte entlang der Wertschöpfungskette jeweils benötigten Ressourcen und (Teil-)Produkten gilt es ebenso, die Daten der Fertigungsprozesse mittels AAS digital zu bereitzustellen. Hierbei wird der Ansatz von Alt et al. [2], [3] verfolgt. Die Autoren zeigen Schwächen des DPP aufgrund seiner produktzentrierten Auslegung auf und stellen das Konzept des digitalen Prozesspasses (DPssP) vor.

Anschließend an die digitale Modellierung des Gesamtprozesses werden die entsprechenden Daten in den AAS hinterlegt. Die Erhebung dieser Daten geschieht u. a. durch die Messung von Primärdaten im Fertigungsprozess. Auf Basis dieser Daten kann anschließend die zuvor entworfene Berechnungslogik zur Bestimmung des CO₂-Fußabdrucks des Endprodukts angewendet werden. Die Ergebnisse werden dann in den entsprechenden AAS gespeichert.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Der digitale Produktpass

Der legislative Kontext dieser Arbeit bezieht sich auf die am 28. Juni 2024 veröffentlichte Verordnung (EU) 2024/1781 [4] des Europäischen Parlaments. Ziel dieser Verordnung ist die Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit von Produkten, was wiederum dazu beitragen soll, die Umwelt- und Klimaziele der EU zu erreichen.

Neben der Einführung von verpflichtenden Ökodesign-Anforderungen für in Verkehr gebrachte Produkte wird in dieser Verordnung auch die Einführung des digitalen Produktpasses (DPP) beschlossen. Beim DPP handelt es sich gemäß der Verordnung um einen produktspezifischen Datensatz, der digital zugänglich ist. Die darin enthaltenen Informationen sind neben der eindeutigen Identifizierung des Herstellers und des Produkts selbst auch kreislaufwirtschaftsrelevante Informationen wie beispielsweise der CO₂-Fußabdruck, die Reparierbarkeit oder toxische Inhaltsstoffe. Die Verordnung nennt drei mögliche Granularitäten für den DPP, nämlich auf Produktmodell-Basis, Chargen-Basis oder Artikel-Basis.

Der in der Verordnung erwähnte DPP wird als wichtiges Instrument im Sinne der Informationsbereitstellung entlang der Wertschöpfungskette bezeichnet. Stakeholdern entlang der Wertschöpfungskette wie Kunden, Recycler oder auch Behörden soll der Zugriff auf für sie relevante Daten und Informationen deutlich erleichtert werden. Alle im DPP enthaltenen Informationen müssen maschinenlesbar, strukturiert und durchsuchbar sein. Produktpässe müssen außerdem vollständig interoperabel sein, was dafür sorgt, dass die im DPP enthaltenen Daten über standardisierte Formate in verschiedenen Systemen und von unterschiedlichen Akteuren einheitlich abgerufen und genutzt werden können. Gemäß den Zugangsrechten werden sowohl Verbraucher und Wirtschaftsteilnehmer als auch für andere maßgebliche Akteure wie beispielsweise Marktüberwachungsbehörden freie Zugänge zu dem jeweiligen DPP geschaffen. Außerdem ist die Authentizität und Integrität der im Produktpass enthaltenen Daten sicherzustellen. Um diese Informationen zugänglich zu machen, wird seitens der EU ein zentrales digitales Register eingeführt, welches den DPP aufnimmt.

Mit dem DPP wird eine Möglichkeit geschaffen, sektorübergreifend Daten über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg für eine Fülle von Akteuren verfügbar zu machen. Durch den standardisierten Datenaustausch werden Barrieren hinsichtlich der Kreislaufwirtschaft aufgehoben. Walden et al. [5] nennen beispielhaft u. a. folgende Vorteile, welche sich aus dem DPP erschließen sollen:

- Verbesserte Rückverfolgbarkeit von der Rohmaterialgewinnung über die Produktion bis zum Ende der Nutzungsdauer eines Produkts
- Höhere Recyclingquoten
- Ermöglichung und Unterstützung hinsichtlich Dienstleistungen im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft wie beispielsweise Wiederaufarbeitung, Wiederverwendung und Reparatur
- Entwicklung besserer Durchsetzungsinstrumente und Marktüberwachungsmechanismen für Behörden

Die erste Produktgruppe, welche einen digitalen Produktpass bereitstellen muss, sind Batterien. Ab Februar 2027 müssen Batterien über 2 kWh Kapazität, die neu in den EU-Markt eingebracht werden, den digitalen Batteriepass vorweisen [6]. Obwohl der digitale Batteriepass für den DPP zahlreiche Erkenntnisse bringen soll und wird, weisen Pellegrini et al. [7] darauf hin, dass eine allumfassende „one-size-fits-all“ Version des DPP über sämtliche Produktgruppen hinweg unrealistisch ist. Außerdem wird erwähnt, dass es neben offenen Fragen zur Definition des DPP und des dazugehörigen Datenträgersystems auch Herausforderungen im Bereich der notwendigen IT-Infrastruktur gibt. Hierzu zählen beispielsweise die Fragen, wie ein sicherer und effizienter Datentransport gewährleistet werden kann und wie Nutzungsrechte verwaltet und erteilt werden.

Während die EU-Verordnung zum DPP die allgemeinen Vorgaben definiert, ist die konkrete Umsetzung noch weitgehend ungeklärt. Dies bestätigen auch Psarommatis und May [8], die eine umfassende Literaturrecherche hinsichtlich des DPP durchgeführt haben. Die Ergebnisse von Psarommatis und May [8] zeigen, dass es einen dringenden Bedarf an einem standardisierten Rahmen für DPP gibt. Die diversen unterschiedlichen Perspektiven hinsichtlich des DPP lassen darauf schließen, dass viele offene Fragen erst geklärt werden müssen. In der Literatur wird oft auf spezifische Anwendungsfälle eingegangen, ein generischer Ansatz wird jedoch nicht präsentiert.

Ajdinović et al. [9] merken ebenfalls an, dass für den DPP in seinem derzeitigen Entwicklungsstadium das Fehlen einer standardisierten Methodik zur Erstellung und der Mangel an vorhandenen und verfügbaren digitalen Darstellungen und exemplarischen Implementierungen eine große Herausforderung darstellt. Besonders ausgeprägt ist diese Problematik in der verarbeitenden Industrie, wo der Fokus darauf liegt, Produktionsdaten mit den aus der Produktion resultierenden Produkten zu korrelieren.

Plociennik et al. [1] fassen zusammen, dass es eine Vielzahl von Bemühungen zur Umsetzung von DPP gibt. Einige haben einen sektorübergreifenden Ansatz, während andere sektororientiert sind. Die meisten dieser Bemühungen befinden sich entweder auf der konzeptionellen Ebene, in einem prototypischen Stadium oder werden in ersten Pilotversuchen auf dem Markt getestet. Die Lösungen reichen von der Zusendung von PDF-Dateien bis hin zu Lösungen, die über ein Application Programming Interface (API) auf verschiedenen Ausgabegeräten verfügbar sind. Besonders interessant sind Lösungen, die auf der Asset Administration Shell (AAS) basieren, da sie auf einer soliden technischen Basis aus der Industrie 4.0 aufbauen und von einer wachsenden Zahl von Forschern und Institutionen unterstützt werden.

2.2 Ökobilanz und CO₂-Fußabdruck

Gemäß der DIN EN ISO 14067:2018 [10] ist der CO₂-Fußabdruck „die Summe der Treibhausgasemissionen und des Treibhausgasabbaus in einem Produktsystem ausgedrückt als CO₂-Äquivalente und basierend auf einer Lebenszyklusanalyse“. Das CO₂-Äquivalent ist dabei eine Maßeinheit, die neben dem eigentlichen CO₂, die Klimaauswirkung verschiedener Treibhausgase (wie Methan oder Lachgas) in ihrer Wirkung auf die Erderwärmung in Relation zu der von CO₂ ausdrückt, um ihre unterschiedlichen Auswirkungen vergleichbar zu machen.

Die DIN EN ISO 14067:2018 [10] basiert auf den Prinzipien, Anforderungen und Richtlinien der Normen zur Ökobilanz DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044. Diese beiden Normen zur Ökobilanz sind verwandt und unterscheiden sich darin, dass die DIN EN ISO 14040 die allgemeinen Prinzipien und Rahmenbedingungen beschreibt, während die DIN EN ISO 14044 auf der DIN EN ISO 14040 aufbaut und detailliertere Anforderungen und Leitlinien vorgibt.

Die DIN EN ISO 14040 [11], welche in dieser Arbeit genutzt wird, nennt folgende allgemeine Anforderungen zur Festlegung des Untersuchungsrahmens:

- Festlegung der Systemgrenze: Die Systemgrenzen begrenzen den Umfang der Ökobilanz und legen fest, welche Module, Inputs und Outputs in Betracht gezogen werden.
- Festlegung der Funktion, der funktionellen Einheit und der Referenzflüsse: Da ein System eine Vielzahl von möglichen Funktionen haben kann, muss eine betrachtete Funktion definiert werden, von der die Ökobilanz abhängt. Die funktionelle Einheit legt die Bezugsbasis fest, auf welcher die Ökobilanz basiert. Dies deckt sich mit der Granularität im DPP der auf Produktmodell-Basis, Chargen-Basis oder Artikel-Basis erstellt werden kann. Der Referenzfluss ist die konkrete Menge an Materialien, Energie oder Dienstleistungen, die benötigt wird, um diese Funktionseinheit zu erreichen.

- Definition der Anforderungen an die Datenqualität: Um die Ökobilanz zuverlässig und vergleichbar zu machen ist es notwendig, dass die verwendeten Daten die Anforderung der Studie erfüllen. So können beispielsweise nur Primärdaten zugelassen sein oder nur Daten, welche innerhalb eines bestimmten Zeithorizonts gesammelt wurden. Auch die Verwendung von Datenbanken kann zugelassen oder explizit ausgeschlossen sein.

2.3 Asset Administration Shell

Die AAS stellt den „Transportbehälter“ für die Informationen einer digitalen Abbildung eines Objektes, beispielsweise einer Maschine, einer Anlage oder eines Geräts bereit. Dieses Objekt, als Asset bezeichnet, stellt für eine Organisation einen Wert dar. Gemäß der Plattform Industrie 4.0 [12] ist die AAS ein integraler Teil der Industrie 4.0. Ein Asset gemeinsam mit seiner AAS stellt eine Industrie 4.0 Komponente dar. Hoffmeister [13] zufolge ist eine Industrie 4.0 Komponente ein Modell, das die Eigenschaften cyber-physischer Systeme präzise beschreibt, indem es reale Produktionsobjekte mit virtuellen Objekten und Prozessen vernetzt.

Die AAS als standardisiertes, digitales Repräsentationsmodell von Assets erleichtert die Interoperabilität und den Datenaustausch zwischen verschiedenen Systemen, indem sie einen einheitlichen Rahmen für die Beschreibung von Anlagenmerkmalen, Verhaltensweisen und Daten bereitstellt. Dies ermöglicht die nahtlose Integration und Kommunikation in industriellen Umgebungen, die auf den Prinzipien von Industrie 4.0 basieren. Die AAS kann sämtliche Daten, die das Asset beschreiben, beinhalten und mittels Submodellen strukturiert voneinander abgrenzen. Beispiele dafür sind technische Daten, Übergabedokumentation oder ein digitales Typenschild. Sie lässt sich gemäß den Anforderungen an die benötigten Informationen nahtlos erweitern. Eine AAS besteht aus einem Header und einem Hauptteil. Der Header enthält Details über die AAS und das Asset, das sie repräsentiert, während der Hauptteil ein oder mehrere Submodelle enthält.

Das AAS-Metamodell [14] gibt den Aufbau der AAS vor:

Eine AAS kann zwingend nur ein Asset darstellen. Die AAS muss außerdem zwangsweise mindestens ein Submodell enthalten. In den Submodellen werden die entsprechenden Informationen des Assets als Submodellelemente dargestellt. Dabei kann es sich u. a. um beschreibende Eigenschaften, Beziehungselemente oder Entitäten handeln. Jedes Asset, jede AAS, jedes Submodell und jedes Submodellelement müssen eindeutig identifizierbar sein. Zum einen zur eindeutigen Unterscheidung aller Elemente einer AAS und des Assets, das sie repräsentieren, und zum anderen zur Verknüpfung von Elementen mit externen Definitionen, wie

Submodellvorlagen und Eigenschaftsdefinitionen. Dies geschieht mittels International Registration Data Identifier (IRDI) oder Internationalized Resource Identifier (IRI). Externe Eigenschaftsdefinition wie ECLASS können verwendet werden, um maschinenlesbare und interoperable Beschreibungen von Asset-Eigenschaften zu gewährleisten. Um Submodelle und Submodellelemente semantisch eindeutig beschreiben zu können, werden Concept Descriptions eingesetzt. Diese stellen sicher, dass die in den Submodellen enthaltenen Daten nicht nur numerische oder textuelle Werte sind, sondern mit einer genauen semantischen Bedeutung verknüpft sind. Damit können die Daten eindeutig interpretiert und konsistent verarbeitet werden. Der Aufbau einer AAS ist in Abb. 1 ersichtlich.

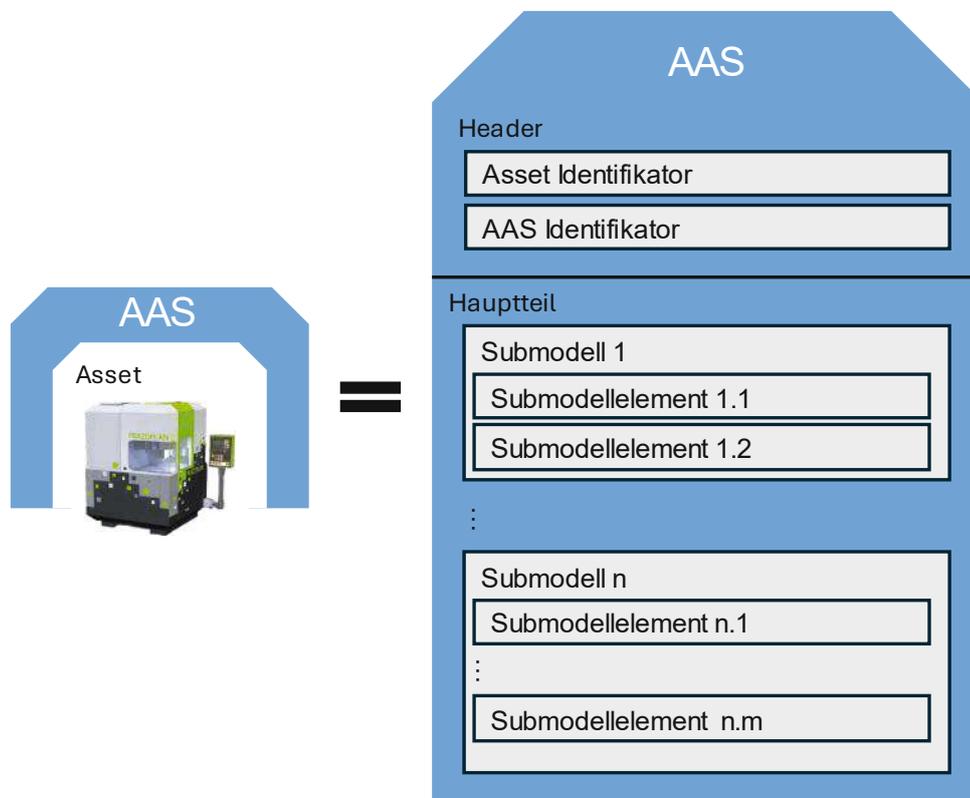


Abb. 1: Aufbau einer Asset Administration Shell

Weiters erlaubt die AAS die Unterscheidung zwischen Typ und Instanz und die Ableitung von Instanzen aus einem Typ.

Hinsichtlich der Standardisierung der Datenstrukturen innerhalb der AAS forciert die Industrial Digital Twin Association (IDTA) die Erstellung von standardisierten Submodellvorlagen, sogenannten Templates. Diese Submodell Templates erleichtern die Modellierung der AAS und ermöglichen einen leichten Einstieg in die Materie für Anwender. Durch die Standardisierung der Templates wird sichergestellt, dass diese über Branchen und Anwendungen hinweg interoperabel sind. Dies ermöglicht Konsistenz hinsichtlich Darstellung, Austausch und Interpretation der darin enthaltenen Informationen. Damit gehen Vorteile hinsichtlich Effizienz, Skalierbarkeit

und Wiederverwendbarkeit der Submodelle einher. Submodell Templates werden in der Regel auf Basis von Best Practices und Standards der Industrie entwickelt und beinhalten entsprechende Eigenschaftsdefinitionen und Concept Descriptions. Die in dieser Arbeit verwendeten Submodellvorlagen sind in den entsprechenden Kapiteln der Umsetzung 5.2.5 und 5.2.6 genauer erörtert.

Ye et al. [15] fassen zusammen, dass sich AAS gemäß ihrem Informationsaustausch in drei Typen einteilen lassen. Typ 1 AAS sind passiv, das bedeutet, dass die Informationsübertragung mittels Dateitransfer stattfindet. Beispielsweise das Versenden einer statischen .aasx-Datei via E-Mail. Typ 2 AAS sind reaktiv. Der Informationsaustausch zu einer anderen AAS oder externen Software erfolgt über eine API, beispielsweise durch ein webbasiertes Protokoll wie Hypertext Transfer Protocol (HTTP) oder Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Diese reaktive Interaktion kann im Allgemeinen durch einen Server-Client-Kommunikationsmodus implementiert werden. Typ 3 AAS können direkt und autonom miteinander kommunizieren. Man spricht hierbei von einer peer-to-peer AAS Interaktion. Dieser Typ kann als proaktiv bezeichnet werden. Die Darstellung der drei Typen in Abb. 2, entnommen aus Jacoby et al. [16], bietet eine übersichtliche Visualisierung der AAS Typen und dient der besseren Veranschaulichung der beschriebenen Inhalte.

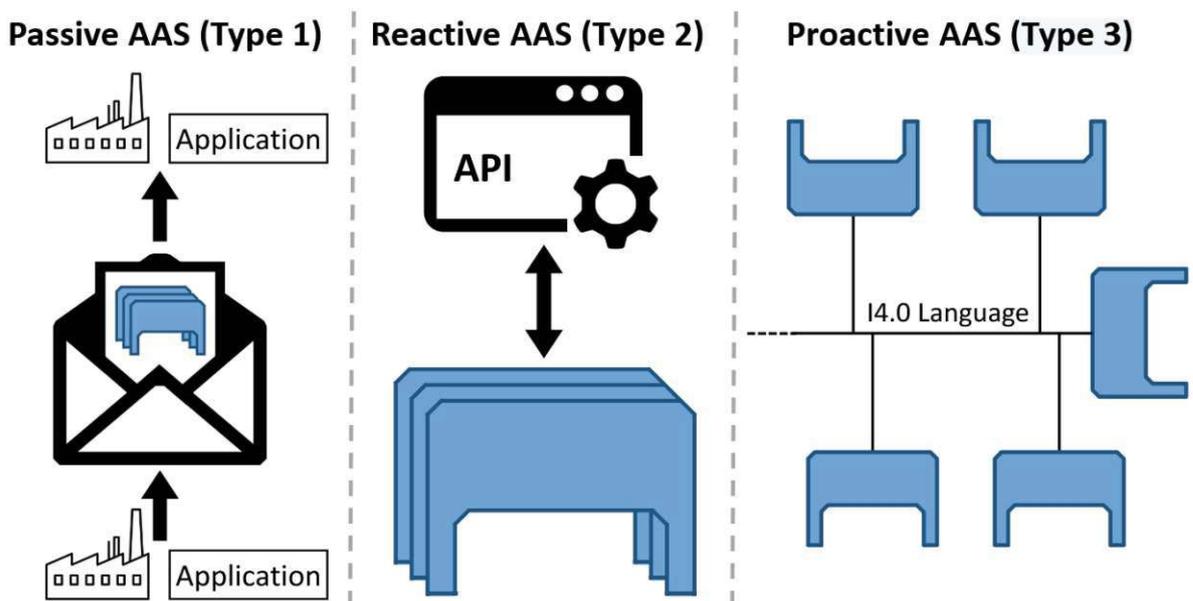


Abb. 2: Unterschiedliche Typen der Asset Administration Shell aus Jacoby et al. [16]

2.4 Prozessdaten innerhalb der AAS

Die AAS bietet u. a. die Möglichkeit Echtzeitdaten darzustellen. Echtzeitdaten, wie Sensorwerte von Maschinen, sind besonders relevant, um in automatisierten Prozessen schnell auf aktuelle Zustände zu reagieren und eine nahtlose Maschine-zu-Maschine-Kommunikation zu ermöglichen. In vielen Anwendungen der Industrie 4.0

steht daher die sofortige Verfügbarkeit und Verarbeitung von Daten im Mittelpunkt, um eine hohe Effizienz und Flexibilität in der Produktion sicherzustellen.

Im Gegensatz dazu erfordert der Kontext der Ökobilanzierung und der CO₂-Fußabdruckberechnung eine andere Art von Datenmanagement. Hierbei sind nicht nur aktuelle Momentaufnahmen entscheidend, sondern die Analyse von Daten über längere Zeiträume hinweg. Dies erfordert eine Aggregation und Auswertung von Daten, um einen vollständigen Überblick über die Umweltauswirkungen zu erhalten. Die Berücksichtigung solcher aggregierten Daten ist besonders relevant für die Lebenszyklusanalyse, bei der Daten wie Energieverbrauch, Materialeinsatz oder Emissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts hinweg gesammelt und zusammengefasst werden müssen.

Während für die Integration von Echtzeitdaten direkt in die AAS oft keine Datenverarbeitungsprozesse notwendig sind, müssen aggregierte Daten aus verschiedenen Quellen zusammengeführt, gefiltert und verarbeitet werden, bevor sie sinnvoll in die AAS eingebunden werden können. Dies macht den Prozess der Integration von aggregierten Informationen in eine AAS komplexer und weniger unmittelbar umsetzbar als bei Echtzeitdaten.

Einen Beitrag zur Abbildung von aggregierten Prozessdaten in AAS schaffen Ajdinović et al. [9]. Sie befassen sich in ihrer Arbeit mit der ereignisbasierten Aggregation von Produktionsdaten im Zusammenhang mit AAS. Dabei wird jede Zustandsänderung als Ereignis definiert und eindeutig identifiziert. Damit wird jeder Prozessschritt nachvollziehbar und nachverfolgbar. Diese Ereignisse können mit den Energieverbräuchen der jeweiligen Prozesse abgeglichen werden. Anschließend können diese Daten in einem AAS Submodell im jeweiligen Produkt abgebildet werden. Auf die Definition dieses Submodells wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen. Aus dem Paper geht nicht hervor, ob eine eigene Prozess AAS geschaffen wird, jedoch ist ersichtlich, dass die Daten verarbeitet und in der jeweiligen Produkt AAS abgelegt werden.

Sølvberg et al. [17] schlagen im Kontext der AAS vor, dass prozessrelevante Daten in Chargen auf Grundlage der Prozessabfolge aufgeteilt werden. Kleine Datenpakete, die auf der Prozess- oder Produktionssequenz basieren, statt auf kontinuierlichen Zeitreihen, ermöglichen einen einfacheren Abgleich der AAS und verbessern beispielsweise die Vergleichbarkeit von Produktionsperioden.

2.5 Der digitale Produktpass im Kontext der Asset Administration Shell

Die Verwendung von AAS im Zusammenhang mit DPP wird erstmalig von Götz et al. [18] diskutiert. Darin wird erwähnt, dass die AAS als digitales Abbild eines realen Produktionsgegenstandes, die Möglichkeit bietet, Produktdaten strukturiert zu erfassen und abzubilden. Da der DPP ebenfalls eine digitale Repräsentation einzelner Produkte ermöglichen soll, wird die AAS von Götz et al. [18] als mögliche Basis für dessen Umsetzung betrachtet. Durch die Standardisierung des Metamodells der AAS wird zudem jene standardisierte Umgebung bereitgestellt, welche für den DPP beispielsweise von Ajdinović et al. [9] und Plociennik et al. [19] verlangt wird. Die notwendige Interoperabilität und Maschinenlesbarkeit, welche definitionsgemäß von der Europäischen Union [4] vom DPP gefordert werden, sind durch Verwendung der AAS ebenfalls gegeben. Die AAS kann somit als Rückgrat für die Datenarchitektur des DPP dienen.

Plociennik et al. [19] setzen zur Modellierung eines digitalen Lebenszykluspasses ebenfalls AAS ein. Die Arbeit von Pourjafarian et al. [20] baut darauf auf und liefert eine Argumentation hinsichtlich der Verwendung von AAS für die Modellierung des DPP. Das Ziel des DPP besteht darin, Informationen über ein Produkt während seines gesamten Lebenszyklus transparent zugänglich zu machen, sodass alle beteiligten Interessengruppen davon profitieren können. Um Konsistenz und Interoperabilität sicherzustellen, ist laut Pourjafarian et al. [20] daher der Einsatz einer standardisierten Struktur für die Informationsmodellierung notwendig. Die Modellierung von Daten in einer Standardstruktur erlaubt einen erleichterten Austausch und eine vereinfachte Integration zwischen verschiedenen Systemen und Anwendungen. Überdies sind die Autoren der Meinung, dass es den involvierten Anwendern und Nutzern das Verständnis sowie das Arbeiten mit den Daten erleichtert. Das AAS Metamodell bietet eine solche Struktur.

Der in diesen beiden Arbeiten definierte digitale Lebenszykluspass ist eine Erweiterung zum DPP, auf die in dieser Diplomarbeit nicht weiter eingegangen wird. Er unterstreicht jedoch die Flexibilität und die Freiheiten, die durch die Verwendung von AAS zum Modellieren des DPP einhergehen.

Da das AAS Metamodell ein oder mehrere Submodelle in einer AAS voraussetzt, können diese dahingehend verwendet werden, als dass diese einzelne Sektoren des DPP darstellen, argumentieren Reinschmidt et al. [21]. So kann beispielsweise ein Submodell für Herstellerinformationen und ein weiteres Submodell für Umweltinformationen angelegt und genutzt werden. Die Submodellelemente innerhalb der Submodelle spiegeln die eigentlichen Datenpunkte wider.

Neligan et al. [22] nennen drei AAS Submodelle, welche den DPP in einer AAS darstellen können. Dabei handelt es sich um die Submodelle Typenschild, technische Daten und ökologischer Fußabdruck, wie in Abb. 3 dargestellt.

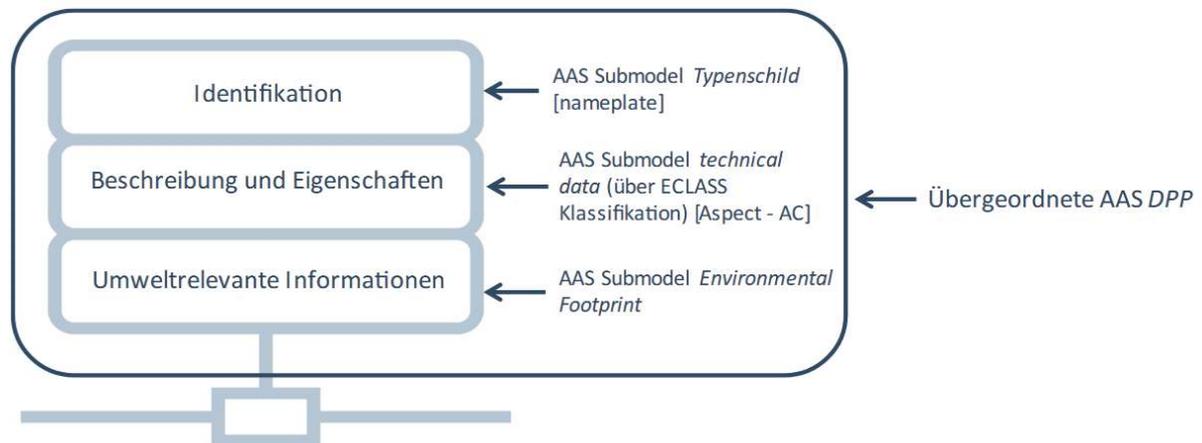


Abb. 3: Digitaler Produktpass mittels Asset Administration Shell: Auswahl der Submodelle gemäß Neligan et al. [22]

Dieser Aufbau des DPP innerhalb der AAS wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet und gemäß den Anforderungen entsprechend erweitert. Für die von Neligan et al. [21] genannten Submodelle sind überdies Vorlagen der IDTA verfügbar.

2.6 Der digitale Prozesspass

Der Terminus „Digitaler Prozesspass“, kurz DPssP wird erstmalig von Werth und Alt [23] im Jahr 2022 im Rahmen eines Beitrags erwähnt. Darin wird betont, dass die Entwicklung eines DPP als entscheidend für die Förderung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft angesehen wird. Jedoch wird ebenso betont, dass Schwierigkeiten existieren, prozessbezogene CO₂-Emissionen bei Dienstleistungsbetrieben zu erfassen und zuzuordnen. Der DPssP zielt darauf ab, prozessbezogene Umweltauswirkungen zu erfassen, zu steuern und gegenüber anderen Unternehmen und Behörden auszuweisen.

In der weiterführenden Arbeit von Alt et al. [2] wird der Standpunkt vertreten, dass die Erstellung eines DPP nur dann vollumfänglich ist, wenn sämtliche Daten und Informationen aus dem Herstellungsprozess des Produktes inkludiert sind. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit des DPssP, welcher eng mit der eigentlichen Produktion verknüpft. Die Autoren weisen darauf hin, dass sich im Sinne der Kreislauffähigkeit und des Ressourcenverbrauchs hinter einem DPP die DPssP der Herstellung und Materialdaten der verwendeten Materialien verbergen. Anhand eines Beispiels wird erläutert, dass Betriebs- und Energieverbrauchsdaten jeweils in eigenen Datenbanken gespeichert werden. Diese beiden Datenbanken können anschließend

zusammengeführt und daraus der CO₂-Fußabdruck über die Prozesskette hinweg abgeleitet werden.

In einer darauf aufbauenden Arbeit heben Alt et al. [3] hervor, dass der DPP ein Kernelement zur Erreichung der Kreislaufwirtschaftsziele darstellt. Jedoch werden auch die Schwächen des DPP durch seine produktzentrierte Definition aufgezeigt. Vor allem für Dienstleistungsunternehmen in einer Wertschöpfungskette hat dieser produktzentrierte Ansatz seine Einschränkungen. Durch den fehlenden Prozessfokus im DPP fehlt überdies die Möglichkeit kontinuierliche Verbesserung von Prozessen zur Reduzierung der Umweltauswirkungen aufzuzeigen. Aus diesem Grund plädieren die Autoren für die Einführung des DPssP, welcher eng mit dem DPP verbunden ist. Damit können aus Prozessen entstehende Umweltauswirkungen wie beispielsweise CO₂-Emissionen direkt mit den aus den Prozessen entstandenen Produkten verbunden werden. Dies schafft Transparenz und ermöglicht, Verbesserungspotenziale aufzuzeigen. Außerdem werden dadurch auch Dienstleistungsunternehmen, welche selbst keine Produkte herstellen, sondern beispielsweise Produkte veredeln, miteinbezogen. Gleichzeitig wird produktseitig ein prozessspezifischer Nachweis des ökologischen Fußabdrucks gegenüber anderen Akteuren, wie beispielsweise Auditoren und Behörden, geschaffen.

Das Konzept des DPssP wurde zum Zeitpunkt der Arbeit von Alt et al. [3] jedoch noch nicht praktisch angewandt. Außerdem behandelt diese Arbeit vorrangig das politische und industrielle Umfeld, welches für den DPssP relevant ist. Es wird die Bedeutung der Quantifizierung von CO₂-Emissionen für die Prozessoptimierung betont, gleichzeitig potenzielle Risiken wie erhöhte Transparenz und Datensicherheit erkannt.

Der Konnex zu AAS wird in den Arbeiten von Alt et al. [2], [3] nicht gebildet. Insofern liefern diese Arbeiten auch keine Anhaltspunkte hinsichtlich der Gestaltung eines DPssP mithilfe von AAS. Diese besagte Verbindung zu schaffen, ist Teil der Aufgabenstellung dieser Arbeit.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verknüpfung von Prozessen mit ihren Umweltauswirkungen und den aus den Prozessen entstehenden Produkten, im Kontext des digitalen Produktpasses, noch nicht eindeutig definiert ist. Der von Alt et al. [3] beschriebene Ansatz mit der Verwendung eines DPssP wird im Rahmen dieser Arbeit genutzt.

2.7 Berechnung des CO₂-Fußabdrucks mittels AAS in der Literatur

Im ZVEI Show-Case PCF@ControlCabinet [24] wird am Beispiel eines Schaltschranks der DPP eingesetzt, um den CO₂-Fußabdrucks dieses Schaltschranks automatisiert

zu berechnen. Der Schaltschrank wird dabei aus einzelnen Komponenten, welche allesamt über einen DPP verfügen, physisch assembliert. Sämtliche DPP im Projektrahmen sind in der AAS Datenstruktur erstellt. Die Autoren bezeichnen die DPP aufgrund der Verwendung des Industrie 4.0 Datenmodells AAS in diesem Anwendungsfall als DPP 4.0. Außerdem bezeichnen sie den digitalen Gesamtaufbau des Schaltschranks mittels AAS als digitalen Zwilling der physischen Baugruppe. Bevor ein Bauteil in den Schaltschrank eingebaut wird, wird ein QR-Code am Bauteil mittels eigens entwickelter Applikation durch Verwendung eines Mobiltelefons gescannt. Dadurch wird der DPP des Bauteils zugänglich und kann direkt zu den DPP der Baugruppe hinzugefügt werden. Der DPP jedes Bauteils wird hierbei dezentral auf einem Server des jeweiligen Herstellers gehostet. Durch das Hinzufügen des DPP in die Baugruppe wird der DPP in den DPP der gesamten Baugruppe übertragen und automatisiert der CO₂-Fußabdruck des Bauteils zur Baugruppe hinzugefügt. Der gesamte CO₂-Fußabdruck der Baugruppe sowie die einzelnen DPP der verwendeten Bauteile sind auf einem AAS Server des Schaltschrankherstellers, in diesem Fall der ZVEI e. V., ersichtlich. Auf welche Art und Weise die Summierung der einzelnen CO₂-Fußabdrücke durchgeführt wird, ist in dem Artikel nicht definiert. Darüber hinaus stellt ZVEI e. V. auch die Beschränkung von Zugangsrechten einzelner Nutzer zu den Daten der einzelnen DPP dar.

Al Assadi et al. [25] untersuchen in ihrer Arbeit den Einsatz von AAS im Zusammenhang mit der Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks zweier unterschiedlicher Montageprozesse, welche durch einen Roboter durchgeführt werden. Dafür werden für den Use Case drei AAS gebaut, eine für den Roboter, eine für den Energielogger und eine dritte AAS dient für die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks. Die Kommunikation zwischen den AAS erfolgt mittels MQTT Protokoll. Die drei AAS sind jeweils mit einem MQTT-Broker verbunden und abonnieren und veröffentlichen die Daten. Für die dritte AAS zur Berechnung ist jedoch nicht spezifiziert, in welcher Umgebung die Berechnungsoperationen tatsächlich durchgeführt werden. Da die AAS selbst keine Operationen ausführen kann, muss die Berechnung in einer separaten Umgebung erfolgen. Die Aussage, die Berechnungs-AAS „dient als Umweltverträglichkeitsprüfungs-Dienst, in dem der Strom- und Energieverbrauch sowie der CO₂-Fußabdruck berechnet wird“ sollte von Lesern der Arbeit von Al Assadi et al. [25] kritisch hinterfragt werden. Es ist denkbar, dass die genannte Berechnungs-AAS relevante Daten aus den beiden anderen AAS übernimmt und diese in einer externen Anwendung zu einem CO₂-Fußabdruck umgerechnet werden. Dieses Vorgehen wird auch in dieser Diplomarbeit angewandt. Konkludiert wird die Arbeit von Al Assadi et al. [25] unter anderem mit der offenen Forschungsfrage, wie Produktionsprozesse durch die Anwendung von AAS ökologisch optimiert werden können.

2.8 Überblick über die genutzten Software Tools

2.8.1 AASX Package Explorer

Für das Erstellen der AAS wird der AASX Package Explorer genutzt. Der AASX Package Explorer ist eine auf C# basierende Open Source Software welche von der IDTA entwickelt und von der Eclipse Foundation übernommen wurde ist über Github [26] zugänglich. Er soll Anwendern eine niederschwellige Möglichkeit bieten, AAS anzuzeigen und selbst zu erstellen.

Auf weitere Möglichkeiten zur Erstellung der AAS wie beispielsweise Eclipse BaSyx oder das Modellieren von AAS als Python Objekte wird nicht eingegangen.

2.8.2 AASX Server

Der AASX Server, welcher ebenfalls von der IDTA entwickelt wurde und mittlerweile ebenfalls von der Eclipse Foundation zur Verfügung gestellt wird, ist ebenfalls C# basiert und dient als Begleit Anwendung zum AASX Package Explorer. Die Eclipse Foundation stellt den AASX Server via Github [27] zur Verfügung.

Der AASX Server fungiert als Laufzeitumgebung zur Verarbeitung von .aasx-Dateien, indem er diese lädt und über ein Hypertext Transfer Protocol/Representational State Transfer (HTTP/REST) basiertes API verfügbar macht. Dadurch können die Inhalte der .aasx-Dateien ausgelesen, modifiziert und verwaltet werden. Darüber hinaus lässt sich der AASX Server mit dem AASX Package Explorer verknüpfen, wodurch die Erstellung von .aasx-Dateien im AASX Package Explorer sowie deren Aktualisierung im AASX-Server ermöglicht werden. Sämtliche API Operationen sind im zweiten Teil der Spezifikationen der AAS der IDTA [28] auffindbar .

Während der AASX Package Explorer Typ 1 AAS implementiert, realisiert der AASX Server Typ 2 AAS. Durch die Verwendung des AASX Servers werden Typ 1 AAS in Typ 2 AAS transformiert, da diese nicht mehr rein statisch sind, sondern die Kommunikation mit den AAS via HTTP/REST möglich ist.

2.8.3 Node RED

Da die AAS ein digitales Repräsentationsmodell und kein ausführbares System ist können in der AAS selbst keine mathematischen Operationen durchgeführt werden. Daher ist es notwendig, die in den AAS enthaltenen Daten in einer externen Umgebung zu verarbeiten. Dies geschieht im Rahmen dieser Arbeit in der Programmieroberfläche Node-RED, welche lokal auf einem PC ausgeführt wird.

Arvana et al. [29] beschreiben in ihrer Arbeit die gemeinsame Verwendung von Node-RED, dem AASX Server und dem AASX Package Explorer.

Node-RED [30] ist ein auf Node.js basierendes, visuelles Open-Source-Programmierwerkzeug, um unter anderem Internet of Things Anwendungen zu programmieren. Die Plattform bietet eine visuelle Programmieroberfläche über einen webbasierten Editor, mit dem der Benutzer ereignisgesteuerte Abläufe, auch „Flows“ genannt, erstellen kann, welche die Integration verschiedener Datenquellen, Dienste und Geräte erlauben. Die Flows werden im Java Script Object Notation (JSON) Datenformat gespeichert, wodurch der Import und Export von Code erleichtert wird.

Die visuelle Programmieroberfläche von Node-RED ermöglicht es Benutzern, komplexe Abläufe zu erstellen, ohne Code zu schreiben. Dies geschieht durch Ziehen und Ablegen von Knoten, die einzelne Teile der Funktionalität repräsentieren und durch die Verbindung dieser, um einen Workflow zu erstellen. Außerdem enthält Node-RED eine umfangreiche Bibliothek mit vorgefertigten Knoten, die es Entwicklern ermöglichen, schnell verschiedene Dienste, Geräte und Datenquellen zu integrieren, darunter MQTT, HTTP, WebSocket.

Aufgrund der Verwendung von Node.js ist Node-RED skalier- und erweiterbar. Es besteht die Möglichkeit, zusätzliche Node.js-Module und -Bibliotheken zu integrieren, um die Funktionalität gemäß den Anforderungen zu erweitern.

Des Weiteren ist Node-RED plattformübergreifend und kann auf diversen Betriebssystemen wie Linux, Windows und macOS ausgeführt werden. Zudem ist eine Verwendung auf unterschiedlichen Geräten möglich, darunter Raspberry Pi, Arduino sowie weiteren IoT-Geräte.

Aufgrund der aktiven und wachsenden Community von Nutzern und Entwicklern findet Node-RED vielseitige Anwendung, insbesondere bei der Erstellung von IoT-Anwendungen, Hausautomatisierungssystemen und anderen Projekten, welche die Integration verschiedener Dienste, Geräte und Datenquellen erfordern.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass Node-RED mit der simplen und intuitiv zu bedienenden Oberfläche Benutzern mit begrenzter Programmiererfahrung eine Möglichkeit bietet, komplexe Aufgabenstellungen zu realisieren.

2.9 Das Produkt-Prozess-Ressource Modell

Im Rahmen dieser Arbeit wird das PPR (Produkt-Prozess-Ressource) Modell verwendet, welches nachfolgend erklärt wird.

Das PPR Modell ist ein Modell aus der Produktionsplanung, welches die Zusammenhänge in der Produktion von Gütern erfasst. Die Objekte Produkt, Prozess

und Ressource stehen darin in ständiger Wechselwirkung zueinander. Schleipen et al. [31] definieren diese Abhängigkeiten wie folgt:

Ein Produkt benötigt für seine Herstellung einen Produktionsprozess. Dafür wird ein Produkt durch eine Produktionsressource verarbeitet. Eine Ressource führt einen Prozess aus. Sie verarbeitet dabei ein Produkt. Ein Prozess wird benötigt, um ein Produkt herzustellen. Der Prozess wird durch eine Ressource durchgeführt.

Die Abhängigkeiten sind in Abb. 4, welche aus Schleipen et al. [31] übernommen wurde, dargestellt.

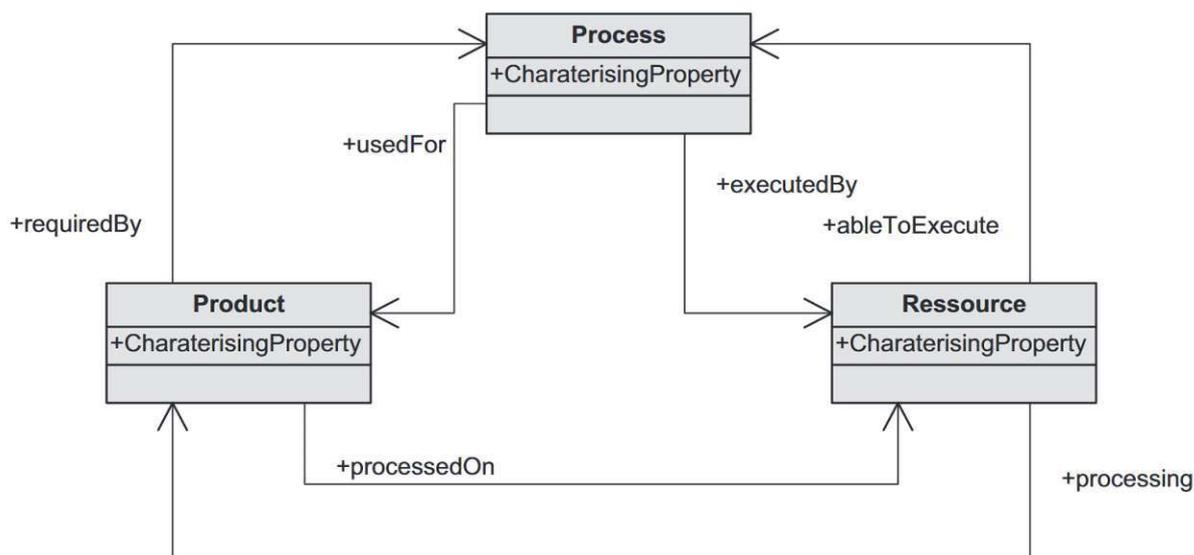


Abb. 4: Produkt-Prozess-Ressource Konzeptmodell aus Schleipen et al. [31]

Cutting-Decelle et al. [32] weisen darauf hin, dass sich die Definitionen der Begriffe Produkt, Prozess und Ressource in unterschiedlichen internationalen Normen kontextuell unterscheiden. Pfrommer et al. [33] haben aus der Arbeit von Cutting-Decelle et al. [32] folgende Definitionen abstrahiert:

„Produkt: Ein Produkt bezeichnet einen End- oder Zwischenprodukttyp. Man beachte den Unterschied zwischen einem Produkttyp und dem „realisierten“ Werkstück zur Laufzeit.

Prozess: Ein Prozess stellt Änderungen an einem Produkt dar, die während der Produktion auftreten. Prozesse können aus verschiedenen Bereichen stammen, z. B. Fertigung, Transport, Montage usw.

Ressource: Eine Ressource ist eine Hardware- oder Softwareeinheit, die an der Prozessausführung beteiligt ist. Beispiele für Ressourcen sind Roboter, Maschinen oder Transportmittel.“

Die von Pfrommer et al. [33] gewählte Definition des Terminus „Produkt“ soll zur Klarstellung um die Definition aus der ISO 10303-2 [34] erweitert werden, die ein Produkt als „Gegenstand, Substanz oder Information, die durch einen Prozess erzeugt wird“, bezeichnet.

Die Verwendung dieses Modells und der darin enthaltenen Definitionen der Termini Produkt, Prozess und Ressource unterstützt bei dieser Arbeit in weiterer Folge bei der Modellierung des Gesamtsystems.

Trautner et al. [35] stellen in Ihrer Arbeit ein Framework für den DPP vor, welches im Zuge von Audits die Rückverfolgbarkeit einzelner Prozesse und deren Prozessdaten ermöglicht. Dabei verwenden die Autoren das PPR Modell im Zusammenhang mit DPP und DPssP, die als AAS erstellt werden. Die Arbeit von Trautner et al. [35], bei der der Autor dieser Diplomarbeit als Mitautor genannt ist, entstand u. a. aus den Vorarbeiten zu dieser Diplomarbeit und enthält einige der Aspekte, die hier weiter vertieft und in einen breiteren Kontext gestellt werden. Darüber hinaus gehen Trautner et al. [35] intensiv auf die notwendige IT-Architektur des Frameworks ein und beschreiben einen Ansatz zur graphenbasierten Datenbankabfrage basierend auf dem PPR Modell zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks. Einige der in dieser Diplomarbeit gezeigten Abbildungen sind ebenfalls in Trautner et al. [35] enthalten und werden zur weiteren Analyse und Diskussion wiederverwendet.

3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Wertschöpfungskette in der Spritzgussdomäne unter Verwendung der AAS zu modellieren. Mit Hilfe der AAS werden u. a. die einzelnen CO₂-Fußabdrücke entlang dieser Wertschöpfungskette dargestellt. Die AAS der Produkte und Ressourcen sind so zu gestalten, dass diese als DPP dienen können. Ebenso sind die AAS der Prozesse so zu konzipieren, dass diese als DPssP genutzt werden können. Dadurch entsteht ein einheitliches Framework, welches die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks des Spritzgussbauteils durch die Akkumulation der Werte aus den mithilfe der AAS erstellten DPP und DPssP entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht. Dieses Ergebnis wird schließlich in der AAS und damit im DPP des finalen Produkts, dem Spritzgussbauteil, ausgegeben. Die betrachtete Wertschöpfungskette reicht hierbei von einem Werkzeugstahl Halbzeug, welches zur Herstellung eines Werkzeuginlays für ein Spritzgusswerkzeug zerspanend bearbeitet wird, über den Spritzgussprozess bis zum finalen Kunststoffprodukt.

Um die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks aussagekräftig und vergleichbar zu machen, muss eine Ökobilanz über die Wertschöpfungskette hinweg erstellt werden. Dazu müssen die innerhalb der Systemgrenzen befindlichen Produkte, Prozesse und Ressourcen sowohl erfasst als auch mittels DPP oder DPssP dargestellt werden. In weiterer Folge sind die Verknüpfungen dieser einzelnen AAS gemäß der Prozesshierarchie zu erstellen. Anschließend müssen die AAS als Typ 2 AAS für den externen Informations- und Datenaustausch bereitgestellt werden. Die Befüllung der DPssP mit dem CO₂-Fußabdruck des Prozesses erfordert die Durchführung einer Energiemessung. Im Rahmen dieser Arbeit geschieht dies exemplarisch für den Bandsägeprozess. Die erfassten Rohdaten müssen anschließend in geeigneter Weise verarbeitet, zum CO₂-Fußabdruck umgerechnet und im DPssP hinterlegt werden.

Sobald die erforderliche Datenbasis geschaffen ist, muss mittels einer externen Anwendung auf die Typ 2 AAS zugegriffen werden. Mithilfe einer zu erstellenden Berechnungslogik müssen sämtliche CO₂-Fußabdrücke aller Produkte, Prozesse und Ressourcen gemäß der Ökobilanz der funktionellen Einheit entsprechen. Im Falle dieser Arbeit handelt es sich dabei um ein Stück Werkzeuginlay bzw. ein Stück Kunststoffbauteil. Danach müssen diese CO₂-Äquivalente (CO₂e) summiert werden und an die Typ 2 AAS der jeweiligen Produkte zurückgegeben werden.

Zusammengefasst soll im Rahmen dieser Arbeit die Wertschöpfungskette mittels AAS modelliert werden und darüber hinaus eine Berechnungsoperation auf Basis der darin enthaltenen Daten vorliegen, welche den CO₂-Fußabdruck des Endprodukts ermittelt und in dessen AAS hinterlegt.

Systembausteine verfeinert, bis die Spezifikationen so weit präzisiert sind, als dass mit der Umsetzung begonnen werden kann.

In der Umsetzungsphase finden die praktischen Tätigkeiten, deren Notwendigkeit sich aus der Konzeptionsphase ergibt, statt. Die Ergebnisse aus der Umsetzungsphase werden in der Integrationsphase auf der rechten Seite des V-Modells in die entsprechenden Systembausteine eingespielt. Diese Systembausteine werden nach Grässler und Hentze [37] schrittweise immer umfangreicher, bis das funktionale Gesamtsystem erreicht ist.

Zwischen den Systembausteinen in der Integrationsphase auf der rechten Seite und den korrespondierenden Systembausteinen in der Konzeptionsphase auf der linken Seite des Modells findet die Verifizierung statt. Dabei handelt es sich um eine laufende Überprüfung, ob die definierten Spezifikationen mit den Ergebnissen aus der Umsetzung eingehalten werden. Durch diesen Mechanismus wird ein Rückkopplungszyklus etabliert, der bereits auf der niedrigsten strukturellen Ebene potenzielle Schwachstellen und Fehler identifiziert.

Gleichzeitig findet bei jedem Systembaustein in der Integrationsphase eine Validierung gegenüber den globalen Anforderungen statt, sodass sichergestellt wird, dass dieser auch den geplanten Nutzen darstellt.

Grässler und Hentze [37] simplifizieren die Verifikation als „Haben wir es richtig gemacht?“ und die Validierung als „Haben wir das Richtige getan?“.

5 Der Digitale Produktpass für ein Spritzgussteil in der Asset Administration Shell

In diesem Kapitel wird zuerst ein Überblick über die verschiedenen Betrachtungsebenen im Umfang dieser Arbeit gegeben. Anschließend wird auf die Beschreibung der Wertschöpfungskette beginnend mit der Aufstellung einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und die Modellbildung inklusive der Erstellung der AAS eingegangen. Danach befasst sich dieses Kapitel mit der Erhebung der für den digitalen Produktpass notwendigen Daten am Beispiel der Bandsägemaschine. Abschließend folgt die Erklärung der für die Berechnungsmethodik verwendeten Programmieroberfläche Node-RED anhand eines Beispiels, konkret mit der Berechnung des entstandenen CO_{2e} durch den Energieverbrauch der Bandsäge während des Sägeprozesses.

5.1 Physische und digitale Betrachtungsebenen

Dieses Unterkapitel soll zum besseren Verständnis der folgenden beitragen. Die hier behandelten Ausführungen werden in weiterer Folge vertieft behandelt.

Grundsätzlich lässt sich die Arbeit „Erstellung eines digitalen Produktpasses für ein Spritzgussteil: Fokus auf den CO₂-Fußabdruck entlang der Wertschöpfungskette vom Werkzeugstahl bis zum Kunststoffprodukt“ auf drei Ebenen aufteilen.

Die physische Produktionsebene repräsentiert die durchgeführten Tätigkeiten, die verwendeten und produzierten Produkte und die verwendeten Ressourcen in den Produktionshallen.

Die digitale AAS Ebene beinhaltet die AAS sämtlicher Produkte, Prozesse und Ressourcen. In diesen AAS sind Informationen und Daten hinterlegt, welche das Asset beschreiben. Außerdem sind die AAS als digitale Abbilder ihrer physischen Gegenstücke miteinander entsprechend der physischen Prozesshierarchie verknüpft. Weiters werden die gemessenen Prozessdaten in die Prozess AAS eingespielt.

In der Berechnungsebene werden jene Daten den AAS entnommen, welche notwendig sind, um den CO₂-Fußabdruck der Produkte der jeweiligen Teilprozesse zu berechnen. Die entsprechenden Berechnungsoperationen werden durchgeführt und die Ergebnisse in die AAS der produzierten Produkte eingespielt.

In Abb. 6 sind die genannten Betrachtungsebenen exemplarisch für einen Teil der gesamten Wertschöpfungskette, dem Sägen des Werkzeugstahls, visualisiert.

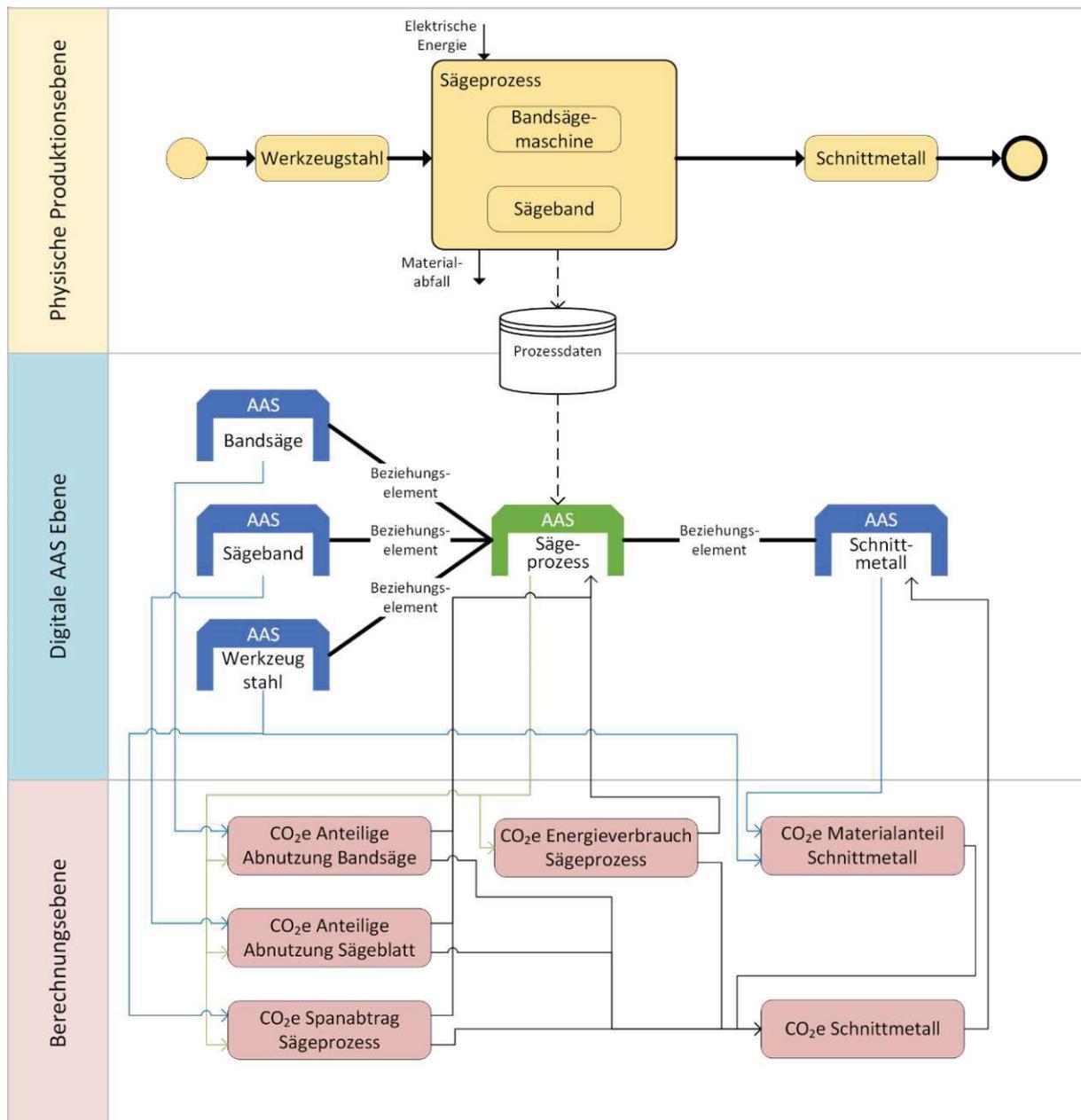


Abb. 6: Visualisierung der drei Betrachtungsebenen am Beispiel des Teilprozesses Bandsägen

5.2 Prozessbeschreibung und Modellbildung

5.2.1 Beschreibung der betrachteten Wertschöpfungskette in der Produktion

Die im Titel genannte Wertschöpfungskette „vom Werkzeugstahl zum Kunststoffprodukt“ beinhaltet die Produktion eines Inlays für ein bestehendes Spritzgusswerkzeug, welches anschließend wird und somit ein Teil der Kavität des Spritzgusswerkzeugs ist. Das Werkzeug selbst dient der Formgebung des Kunststoffbauteils während des Spritzgussprozesses. Bei dem Kunststoffbauteil

handelt es sich um zwei Prüfstäbe inklusive Angussgeometrie. Das Inlay definiert hierbei einen Teil des Fließkanals der Kunststoffschmelze vom Anguss zu den Anspritzpunkten der Prüfstäbe. Durch unterschiedliche Inlaygeometrien können somit entsprechende Anspritzpunktszenarien an den Prüfstäben realisiert werden können. Die beiden in der Wertschöpfungskette produzierten Bauteile sind in Abb. 7 ersichtlich

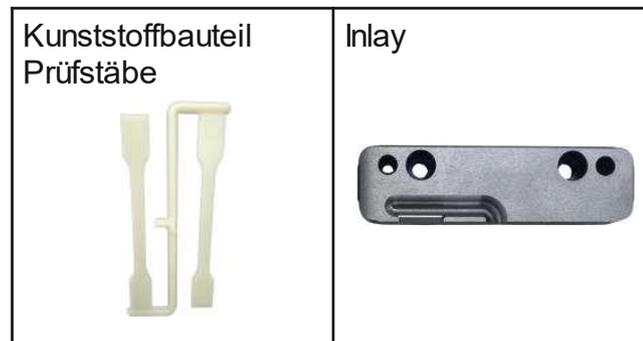


Abb. 7: Kunststoffbauteil Prüfstäbe und Inlay des Spritzgusswerkzeugs

Nachfolgend werden die Prozessschritte im Detail erklärt:

- 1) Zuschneiden des Halbzeugs, Werkzeugstahl 1.2842, mit den Dimensionen 750 x 50 x 25 mm in sechs Zuschnitte mit den Dimensionen 125 x 50 x 25 mm. Hierfür wird eine Bandsäge des Typs Behringer HBE321A (siehe Abb. 8, links) verwendet.
- 2) Einer der sechs Zuschnitte wird anschließend auf einer aerostatisch flächig geführten Präzisions-Fräsmaschine des Typs Präzoplan 300, siehe Abb. 8, mitte, gefräst.
- 3) Das fertige Inlay wird in dem Spritzgusswerkzeug montiert und der Spritzgussprozess auf einer Engel ES 600 / 100 HL SEL Spritzgussmaschine (siehe Abb. 8, rechts) durchgeführt.



Abb. 8: Eingesetzte Maschinen von links nach rechts: Behringer HBE321A, Präzoplan 300, Engel ES 600 / 100 HL SEL

Aktiv gemessene Daten, also Primärdaten aus dem Prozess stehen im Rahmen dieser Arbeit nur für den Sägeprozess zur Verfügung. Für die Betrachtung der beiden

weiteren Prozesse, dem Fräsen und dem Spritzgießen werden die zur Erstellung des digitalen Produktpasses und zur Berechnung des CO₂e des Spritzgussbauteils notwendigen Daten der Literatur entnommen.

5.2.2 Definierte Rahmenbedingungen für die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040

Um den CO₂-Fußabdruck eines Produkts während des Produktionsprozesses klar und präzise beschreiben zu können, muss festgelegt werden, welche Aspekte des Prozesses in die Analyse einbezogen werden und welche nicht. Dies ermöglicht eine klare Definition des Umfangs, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse und die Vermeidung von Unvollständigkeits- und Doppelerfassungen von Daten.

Gemäß DIN EN ISO 14040:2021-02 [11] werden Ökobilanzen erstellt, indem Produktsysteme als Modelle festgelegt werden, welche die wichtigsten Elemente physischer Systeme beschreiben. Der CO₂-Fußabdruck ist dabei ein Aspekt, der im Rahmen einer umfassenderen Ökobilanz betrachtet wird. Ein Produktsystem ist eine Abbildung aller relevanten Prozesse und Abläufe, die mit dem Produkt verbunden sind. Dies umfasst z. B. die Rohstoffgewinnung, den Herstellungsprozess, die Nutzung und die Entsorgung. Die Systemgrenze legt die Prozessmodule fest, die in das System einzubeziehen sind und definiert, welche Teile des gesamten Produktsystems in die Analyse einbezogen werden. Somit legt die Systemgrenze fest, welche Prozessschritte in die Analyse einbezogen werden und welche nicht.

Der gesamte Produktionsprozess kann in drei Prozessmodule unterteilt werden, welche jeweils selbst über Systemgrenzen verfügen. Die Festlegung der Systemgrenzen sind dabei laut ISO 14955-1:2017 [38] so zu definieren, dass ein System, das zu einem Bearbeitungsprozess fähig ist, betrachtet wird und die Systemgrenzen so gewählt werden, dass die Energieflüsse mit vertretbarem Aufwand gemessen werden können wobei die Werkzeugmaschine und die Peripheriegeräte sich innerhalb der Systemgrenzen befinden. Gemäß dieser Definition werden die Systemgrenzen der drei Prozessmodule wie folgt festgelegt:

Die Bandsägemaschine definiert die Systemgrenze des Sägeprozesses, das hat zur Folge, dass sich sowohl die Bandsäge als auch das Bandsägeblatt innerhalb der Systemgrenze befinden. Als Input in diesen Prozess gelten die zum Antrieb notwendige elektrische Energie und der Werkzeugstahl, welcher in die Maschine und somit in die Systemgrenze eingeführt wird. Als Output gilt der Materialabfall also die Späne, welche durch das Sägen anfallen und der zugeschnittene Werkzeugstahl, welcher die Maschine nach dem Sägen verlässt. Der notwendige Kühl- und Schmierstoff wird in der Maschine selbst in einem Kreislauf geführt und nur in

unregelmäßigen Abständen nachgefüllt. Somit ist dieser nicht mit vertretbarem Aufwand messbar und wird für den Prozess nicht herangezogen.

Der Fräsprozess verhält sich nahezu analog zum Sägeprozess. Hier bilden die elektrische Energie und der zugeschnittene Werkzeugstahl die Inputs. Materialabfall als Späne und das gefräste Werkzeuginlay bilden den Output. Der Kühl- und Schmierstoff sowie die im Prozess notwendige Druckluft werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Systemgrenze für den Spritzgussprozess unterscheiden sich insofern von den vorher genannten, als dass diese nicht bei der verarbeitenden Maschine enden, sondern auch ein Peripheriegerät zur Spritzgussmaschine miteinbezogen wird. Dabei handelt es sich um ein Temperiergerät, einen Wärmetauscher, welches die Werkzeugtemperatur regelt. Für die Systemgrenze dieses Subprozesses gilt, dass sowohl die Spritzgussmaschine als auch das Temperiergerät elektrische Energie als Input benötigen, diese also in die Systemgrenze von außen einfließt. Weitere Inputs sind das Werkzeuginlay, welches im Spritzgusswerkzeug montiert wird und das Kunststoffgranulat, welches in der Spritzgussmaschine verarbeitet wird. Der Output dieses Prozesses ist das Kunststoffbauteil Prüfstäbe.

In Abb. 9 sind die Systemgrenzen wie beschrieben visualisiert.

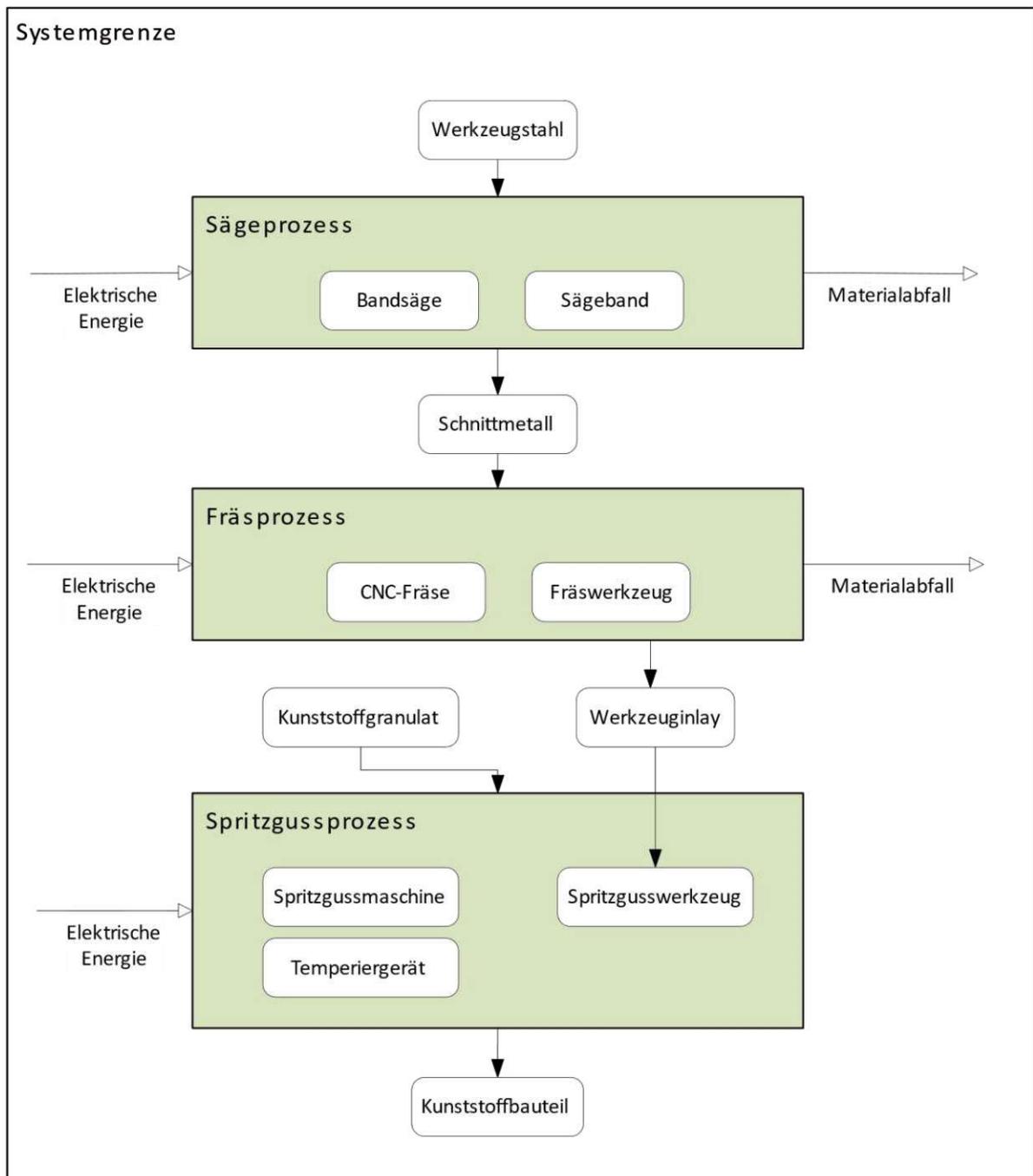


Abb. 9: Systemgrenze gemäß DIN EN ISO 14040:2021-02 [11] visualisiert in Anlehnung an ISO 14955-1:2017 [38]

Als funktionelle Einheit wird jeweils ein Stück festgelegt. So bezieht sich die folgende Berechnung des CO₂-Fußabdrucks zuerst auf die Herstellung von einem Schnittmetall und einem Werkzeuginlay. Danach wird der CO₂-Fußabdruck für ein Kunststoffteil berechnet.

Die verwendeten Daten setzen sich sowohl aus Primärdaten aus Messungen als auch Sekundärdaten aus der Literatur sowie Abschätzungen von Experten zusammen.

Ebenso werden Datenbanken verwendet. Die verwendeten Datenquellen sind in 5.3.3 ersichtlich.

Durch die Erweiterung der Systemgrenzen, beispielsweise durch Miteinbeziehung des Kühlschmierstoffs, sowie der Nutzung von Primärdaten anstelle von Literaturquellen für den Fräs- und den Spritzgussprozess kann die in dieser Arbeit durchgeführte Berechnung des CO₂-Fußabdrucks weiter präzisiert werden.

5.2.3 Visualisierung der Wertschöpfungskette mittels Asset Administration Shells

Durch die Festlegung der Systemgrenzen des Gesamtprozesses lassen sich die Assets identifizieren, welche an dem Prozess beteiligt sind. Alle im Anwendungsfall beschriebenen Produkte, Prozesse und Ressourcen werden als physische oder logische Objekte verstanden und als Assets mithilfe der AAS dargestellt. Die Wertschöpfungskette, dargestellt im Kontext der Produkt-Prozess-Ressource-Modellierung ist in Abb. 10 ersichtlich.

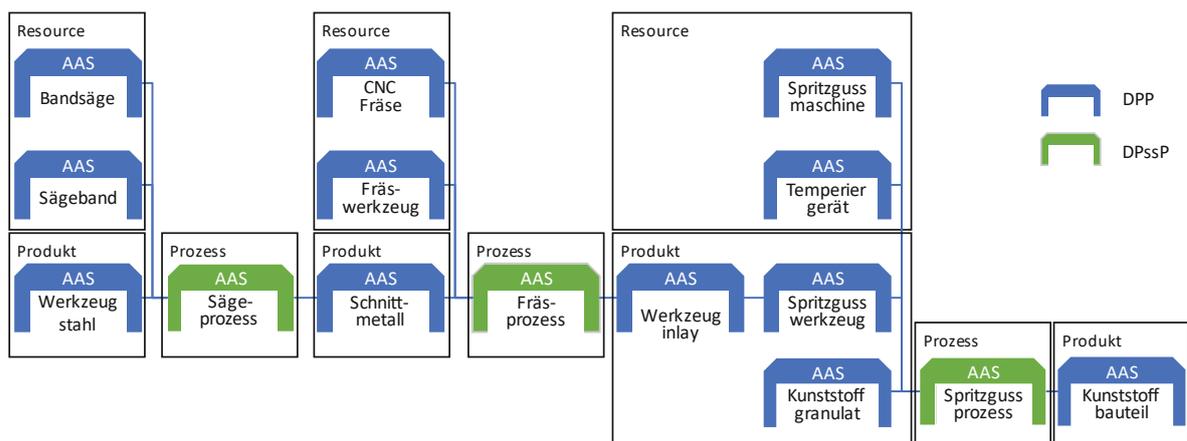


Abb. 10: Asset Administration Shell basierte Darstellung der Wertschöpfungskette im Kontext der Produkt-Prozess-Ressource-Modellierung, Abbildung ebenfalls in Trautner et al. [35]

Insgesamt werden 15 AAS, welche sich in zwölf Ressourcen und Produkte sowie drei Prozesse gliedern, benötigt, um den Gesamtprozess darzustellen. Zur besseren Veranschaulichung sind in Abb. 10 jene AAS welche einen Prozess innerhalb des Gesamtprozesses beschreiben grün eingefärbt. Jene die ein Produkt oder eine Ressource beschreiben sind blau eingefärbt. Die Produkt- und Ressourcen-AAS unterscheiden sich von den Prozess-AAS insofern, als dass diese AAS andere Submodelle beinhalten. Die in Abb. 10 blauen AAS beinhalten Submodelle, sodass dieser als DPP benutzt werden kann, die grünen AAS beinhalten Submodelle, sodass dieser als DPssP benutzt werden kann. Die für den DPP und DPssP verwendeten Submodelle sind folgend in 5.2.5 und 5.2.6 genauer erläutert.

5.2.4 Erstellung der Asset Administration Shells im AASX Package Explorer

Zunächst erfolgt die Erstellung einer Asset Administration Shell sowie die Zuweisung des zugehörigen Assets im AASX Package Explorer. Anschließend beginnt die zentrale Aufgabe der Modellierung der AAS, nämlich die Anreicherung mit Daten und Informationen. Dafür werden die entsprechenden Submodelle der jeweiligen AAS hinzugefügt. Ein Submodell besteht aus einer Menge von Submodellelementen, die jeweils bestimmte Merkmale, Parameter oder Zustände des Assets darstellen. Submodelle sind jene Module, die die AAS modular gestalten und eine flexible Anpassung an verschiedene Anwendungsfälle und Anforderungen ermöglichen. Diese Submodelle können im Rahmen des betrachteten Gesamtprozesses im vorherigen Unterkapitel unterschiedliche Arten von Informationen beinhalten, beispielsweise die technischen Daten einer Maschine, Informationen zur Integration von Zeitreihendatenbanken oder der CO₂-Fußabdruck eines Produkts.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, ein Submodell zu erstellen. Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Methoden verwendet:

- Manuelles Erstellen des Submodells von Grund auf
- Verwenden eines Plug-in-Submodells direkt aus dem AASX Package Explorer
- Importieren eines Submodells aus einer .aasx-Datei.
- Importieren eines Submodells aus ECLASS.

Das manuelle Erstellen eines Submodells von Grund auf ist die arbeitsintensivste Methode, da jedes Submodellelement und jede Konzeptbeschreibung manuell erstellt bzw. hinzugefügt werden müssen. Das Verwenden von im AASX Package Explorer hinterlegten Plug-in-Submodellen ist deutlich simpler und zeiteffizienter, da hier auf vorgefertigte Submodelle, sogenannte „Templates“, welche von der IDTA erstellt und veröffentlicht werden, zugegriffen werden kann. Die Auswahl ist jedoch begrenzt. Eine größere Auswahl an Templates, welche jedoch nicht direkt im AASX Package Explorer integriert sind, findet sich auf dem „admin-shell-io by IDTA“ GitHub [39]. Hier können die Templates direkt als .aasx-Dateien heruntergeladen werden. Die in den aasx-Dateien enthaltenen Submodelle und Submodellelemente können anschließend mittels einer im AASX Package Explorer enthaltener Kopierfunktion in die vom Anwender bearbeitete AAS eingefügt werden. Das direkte Importieren eines Submodells aus ECLASS ist entweder aus einer statischen .xml-Datei oder über den ECLASS Webservice möglich. Besonders für den Import einzelner Submodellelemente im Bereich der technischen Daten ist diese Methode theoretisch gut geeignet, da umfangreiche Informationen über das Submodellelement im

Datenstandard von ECLASS enthalten sind und direkt an die AAS übergeben werden. Praktisch erweist sich diese Methode jedoch aufgrund der Fehleranfälligkeit in Kombination mit dem AASX Package Explorer und der geringen Anwenderfreundlichkeit bei der Suche in ECLASS zum derzeitigen Stand als kaum nutzbar.

In dieser Arbeit wird der AASX Package Explorer in der Version 2024-02-27.alpha verwendet.

5.2.5 Modellierung der Asset Administration Shells für den digitalen Produktpass

Wie im Stand der Technik beschrieben, wird der DPP in der AAS in dieser Arbeit gemäß der Definition von Neligan et al. [22] modelliert und im Bedarfsfall um ein Submodell zur Beziehungsmodellierung zwischen den AAS erweitert.



Abb. 11: Darstellung der Schnittmetall Asset Administration Shell inklusive der vier Submodelle im AASX Package Explorer

Für die Modellierung der Assets der Ressourcen und Produkte im AASX Package Explorer werden folgende Submodelle verwendet (siehe Abb. 11). Die vier genannten Submodelle sind allesamt Submodellvorlagen der IDTA:

- IDTA 02006-2-0 Digital Nameplate for Industrial Equipment [40]
- IDTA 02003-1-2 Generic Frame for Technical Data for Industrial Equipment in Manufacturing [41]
- IDTA 02023-0-9 Carbon Footprint [42]
- IDTA 02011-1-1 Hierarchical Structures enabling Bills of Material [43]

Idealerweise sind sämtliche in den Submodellen hinterlegten Eigenschaften mit Datenkatalogen wie ECLASS oder dem IEC Common Data Dictionary abgestimmt.

Das Submodell „IDTA 02006-2-0 Digital Nameplate for Industrial Equipment“ zielt darauf ab, in der AAS ein digitales Typenschild für das jeweilige Asset zur Verfügung zu stellen. Der Zweck dieses Submodells ist, dass Identifikationsinformationen, wie beispielsweise Seriennummer, Kontaktadressen der Ansprechpartner oder das Baujahr von Assets interoperabel zwischen Partnern in einem Wertschöpfungsnetzwerk ausgetauscht werden können.

Das Submodell „IDTA 02003-1-2 Generic Frame for Technical Data for Industrial Equipment in Manufacturing“ hat die interoperable Bereitstellung technischer Daten zur Beschreibung des Assets der jeweiligen Asset Administration Shell zum Ziel. Im Gegensatz zum digitalen Typenschild, welches informelle Daten beinhaltet, sind hier technischen Daten des Assets im Fokus. Damit ähnelt dieses Submodell einem technischen Datenblatt des Assets.

Das Submodell „IDTA 02023-0-9 Carbon Footprint“ bietet die Möglichkeit den CO₂-Fußabdruck eines Assets bereitzustellen und diesen zwischen internen und externen Partner in der Wertschöpfungskette auszutauschen. Weiters können Zertifikate in diesem Submodell hinterlegt und bereitgestellt werden. Durch die interoperable Bereitstellung dieser Informationen wird Stakeholdern die Möglichkeit gegeben, den CO₂-Fußabdruck ihrer Güter zu dokumentieren, auszutauschen, zu bewerten oder zu optimieren.

Das Submodell „IDTA 02011-1-1 Hierarchical Structures enabling Bills of Material“ ermöglicht die Darstellung von Hierarchieebenen ähnlich einer Stückliste. Es stellt eine Art Index dar und ermöglicht eine detaillierte Nachverfolgung der Assets innerhalb einer Hierarchie. Eine detailliertere Ausführung zu diesem Submodell befindet sich in Kapitel 5.2.7.

5.2.6 Modellierung der Asset Administration Shells für den digitalen Prozesspass

Wie im Stand der Technik beschrieben, ist in der Literatur im Gegenteil zum DPP bis zu diesem Zeitpunkt noch kein Beispiel zur Modellierung eines DPssP mittels AAS vorhanden. Zwecks besserer Vereinheitlichung wird so weit wie möglich versucht bestehende Submodellvorlagen zu verwenden. Aufgrund des produktbasierten Ansatzes der AAS ist dies jedoch bis auf eine Ausnahme nicht möglich, da keine passenden Submodellvorlagen zur Verfügung stehen.

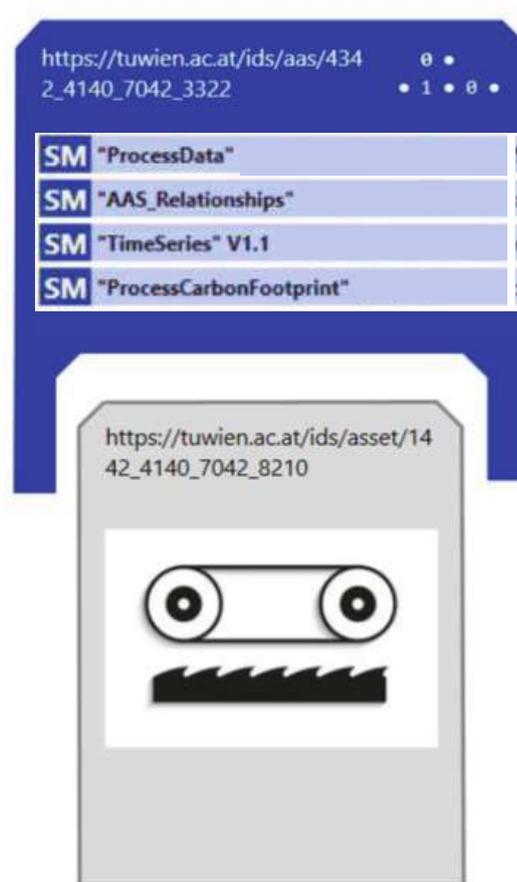


Abb. 12: Darstellung der Sägeprozess Asset Administration Shell inklusive der vier Submodelle im AASX Package Explorer

Für die Modellierung des DPssP als AAS im AASX Package Explorer werden folgende Submodelle verwendet (siehe Abb. 12).

- Process Data
- AAS Relationships
- IDTA 02008-1-1 Time Series Data [44]

- Process Carbon Footprint

Im Submodell „Process Data“ werden die für den Prozess relevanten Daten gespeichert. Hier kann es sich beispielsweise um prozessrelevante Einstellungen an einer Maschine, Start- und Endzeitpunkt des Prozesses oder um Informationen zum Maschinenführer handeln. Auf den ersten Eindruck hin ist dieses Submodell jenem der IDTA 02003-1-2 „Generic Frame for Technical Data for Industrial Equipment in Manufacturing“ sehr ähnlich. Bei genauerer Betrachtung wird jedoch klar, dass während sich im besagten IDTA Submodell rein statische, unveränderliche Maschineninformationen befinden, sich im Submodell „Process Data“ die Daten je nach funktioneller Einheit ändern können. Beispielsweise kann der Energieverbrauch der Bandsäge für jedes gesägte Produkt unterschiedlich hoch sein.

Das Submodell „AAS Relationships“ hat wie das Submodell „IDTA 02011-1-1 Hierarchical Structures enabling Bills of Material“ den Zweck der Nachverfolgung von am Prozess beteiligten Assets. Aufgrund der Konventionen der IDTA-Submodellvorlage ist diese jedoch nicht für den DPssP anwendbar und muss somit durch das eigens erstellte Submodell „AAS Relationships“ ersetzt werden. Im folgenden Unterkapitel wird darauf detailliert eingegangen.

Das Submodell „IDTA 02008-1-1 Time Series Data“ zielt auf die interoperable Beschreibung von Zeitreihendaten ab. Als Zeitreihe ist eine Reihe von Datenpunkten in chronologischer Reihenfolge zu verstehen. Beispielsweise die gemessene verbrauchte Energie einer Maschine zu definierten Zeitpunkten über einen bestimmten Zeitraum hinweg. Die Submodellvorlage gibt drei Möglichkeiten zur Bereitstellung von Zeitreihendaten vor: Unter „Internal Segment“ werden die Zeitreihendaten direkt in der AAS hinterlegt, „Linked Segment“ gibt den Endpunkt und die Abfrage an einer Zeitreihendatenbank, welche sich in einem externen System befindet an und „External Segment“ ermöglicht das Auffinden einer externen Datei in der Zeitreihendaten gespeichert sind.

Das Submodell „Process Carbon Footprint“ ist ebenfalls selbst erstellt und beinhaltet sämtliche im Prozess entstandene CO₂e. Während in dem IDTA 02023-0-9 Carbon Footprint Submodell nur ein einzelner CO₂-Fußabdruck enthalten ist, nämlich jener des Assets, werden hier mehrere beschrieben. Für den Sägeprozess sind dies beispielsweise die CO₂ Äquivalente des Energieverbrauchs, der anteiligen Abnutzung der Bandsäge, der anteiligen Abnutzung des Bandsägeblattes und jenes des Materialabfalls durch den Spanabtrag. Die Darstellung dieser vier CO₂e im Einzelnen anstatt einer Gesamtsumme erweist sich insofern als sinnvoll, als dass die jeweiligen Einflüsse auf den gesamten CO₂-Fußabdruck für den Betrachter klarer sichtbar werden. Dies erleichtert die Identifikation von Optimierungspotenzialen.

5.2.7 Beziehungsmodellierung zwischen den AAS

Um die gesamte Wertschöpfungskette mit AAS modellieren und nachverfolgen zu können, ist es zwingend notwendig, die realen Beziehungen, die zwischen den einzelnen Produkten, Prozessen und Ressourcen bestehen, ebenso in den AAS darzustellen [45].

Da das Verschachteln von AAS ineinander gemäß dem AAS-Metamodell nicht möglich ist, wird das Submodell „IDTA 02011-1-1 Hierarchical Structures enabling Bills of Material“ verwendet, um hierarchische Strukturen und Beziehungen zwischen AAS zu modellieren. Das Submodell zielt darauf ab, Systeme wie Baugruppen in ihre einzelnen Bestandteile zu zerlegen, die in der Regel jeweils eine eigene AAS besitzen, jedoch auch als einfache Entitäten modelliert werden können. Die Submodellvorlage ist generisch ausgelegt und definiert die Struktur der Asset Hierarchie, weshalb ihre Verwendung zur Modellierung der Prozesshierarchie ebenfalls vertretbar ist. Im Folgenden wird erläutert, warum dieses Submodell in den AAS der Produkte der entsprechenden Teilprozesse entlang der Wertschöpfungskette verwendet wird.

In dem Submodell „IDTA 02011-1-1 Hierarchical Structures enabling Bills of Material“, welches sich in der AAS des Produkts aus einem Prozess befindet, wird jedes Element, welches direkt in den Produktionsprozess involviert ist, als Entität erstellt. Diese Entität wird mit den zugehörigen Assets verknüpft. Die Beziehungen im Strukturbaum werden mittels Beziehungselementen, sogenannten Relationships definiert, wobei hier entweder die Hierarchieebene abwärts mit „hasPart“, aufwärts mit „isPartof“ oder lateral mit „sameas“ darstellbar ist. Das Beziehungselement enthält zwei Attribute, welche die Endpunkte der Beziehung beschreiben. Das erste Attribut nimmt die Rolle des Subjekts ein, während das zweite Attribut die Rolle des Objekts einnimmt. Die Endpunkte sind mit „first“ für das Subjekt und mit „second“ für das Objekt gekennzeichnet. Als Endpunkt dienen hierbei die Entitäten. Die beiden Endpunkte gemeinsam mit den Relationships sorgen für ein semantisches Tripel.

Weiters ist in dieser Submodellvorlage eine Property mit dem Namen „Archetype“ vorhanden, welche die Tiefe der dargestellten Beziehungen beschreibt und zwingend mit einer von drei in der Vorlage erläuterten Einträgen zu versehen ist. Diese drei Einträge lauten „Full“, „One-Down“ und „One-Up“. „Full“ gibt an, dass die gesamte hierarchische Struktur abwärts des Assets bis zur n-ten Ebene in diesem Submodell dargestellt wird. „One-Down“ und „One-Up“ geben an, dass jeweils nur die erste hierarchisch folgende Ebene in diesem Submodell dargestellt wird, entweder abwärts oder aufwärts. Zur Modellierung der Prozesshierarchie wird im Rahmen dieser Arbeit die Property „Archetype“ mit dem Eintrag „Full“ gewählt. Damit ist eine Beziehungsmodellierung vom finalen Produkt, dem Kunststoffbauteil bis hin zum Halbzeug des Werkzeugstahls direkt in dem „Hierarchical Structures enabling Bills of Material“ Submodell in der AAS „Kunststoffbauteil“ möglich.

Durch die Konvention der Submodellvorlage, die nicht erlaubt, gleichzeitig sowohl Beziehungen zur Hierarchieebene darüber als auch zur Hierarchieebene darunter zu modellieren, ist der Einsatz dieses Submodells auf die Produkte aus den Prozessen beschränkt. Verglichen mit Abb. 10 auf Seite 33 sind dies die AAS „Schnittmetall“, „Werkzeuginlay“, „Spritzgusswerkzeug“ und „Kunststoffbauteil“. Hierbei sei hervorgehoben, dass das Spritzgusswerkzeug kein direktes Produkt der in der Systemgrenze genannten Prozesse ist, jedoch das direkte Produkt, das Werkzeuginlay, physisch beinhaltet. Die Anwendung in den weiteren AAS der Produkte „Werkzeugstahl“ und „Kunststoffgranulat“ ist nicht zielführend, da die darunterliegenden Prozesshierarchieebenen außerhalb der gewählten Systemgrenze liegen. In Abb. 13 ist die hierarchische Struktur, welche durch das Plugin „Bill of Material – Graph Display“ im AASX Package Explorer erstellt werden kann dargestellt. In Abb. 14 ist das Hierarchial Structures Submodell und dessen Submodellelemente abgebildet.

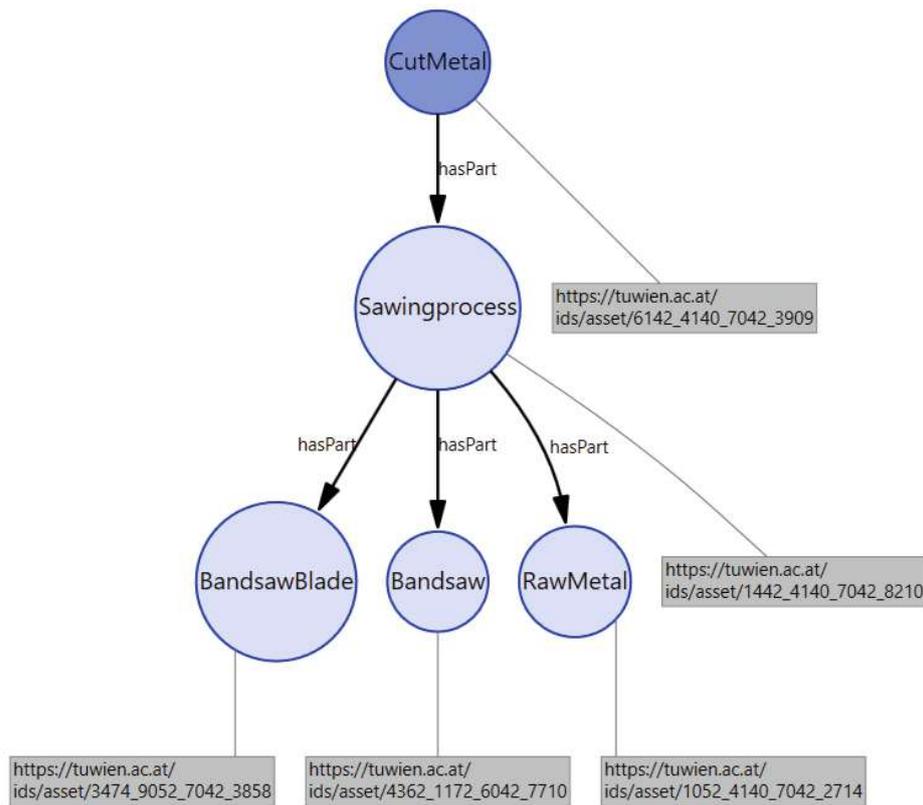


Abb. 13: Grafische Darstellung der Beziehungen im Submodell „Hierarchical Structures“ der Asset Administration Shell „Schnittmetall“ (engl. „CutMetal“) mit dem AASX Package Explorer

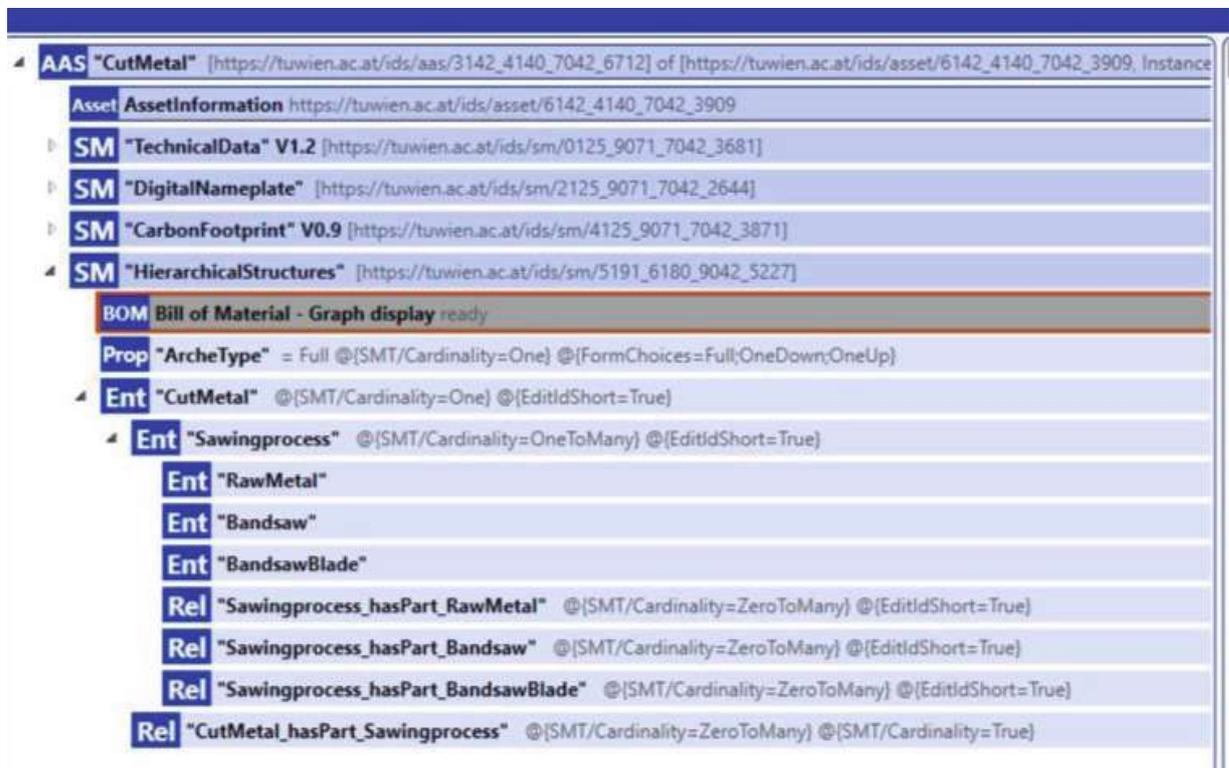


Abb. 14: Asset Administration Shell „Schnittmetall“ im AASX Package Explorer: Submodell Hierarchical Structures

Um für einen Prozess gemäß dem PPR-Modell in Abb. 15 eine lückenlose Nachverfolgbarkeit in der AAS zu gewährleisten ist es unumgänglich, nicht nur die Beziehungen zu den aus hierarchischer Sicht darunterliegenden Produkten und Ressourcen zu erstellen, sondern auch zu jenen Produkten, die aus den Prozessen entstehen. Daher ist für die AAS der Prozesse das Submodell „IDTA 02011-1-1 Hierarchical Structures enabling Bills of Material“ aufgrund seiner Konventionen nicht geeignet und muss durch ein eigens erstelltes Submodell ersetzt werden. Dieses Submodell, genannt „AAS Relationships“ verwendet die gleichen Submodellelemente, nämlich Entitäten und Beziehungselemente. Es werden analog zu dem „Hierarchical Structures“ Submodell semantische Tripel geschaffen, auch in die darüberliegende Hierarchieebene. In Abb. 16 ist das entsprechende Submodell des Sägeprozesses im AASX Package Explorer dargestellt. Sämtliche Beziehungen, wie sie in Abb. 15 zu finden sind, werden dort modelliert. Eine grafische Darstellung des Strukturbaums analog zu dem „Hierarchical Structures“ Submodell direkt im AASX Package Explorer ist in dem eigens geschaffenen Submodell nicht möglich.

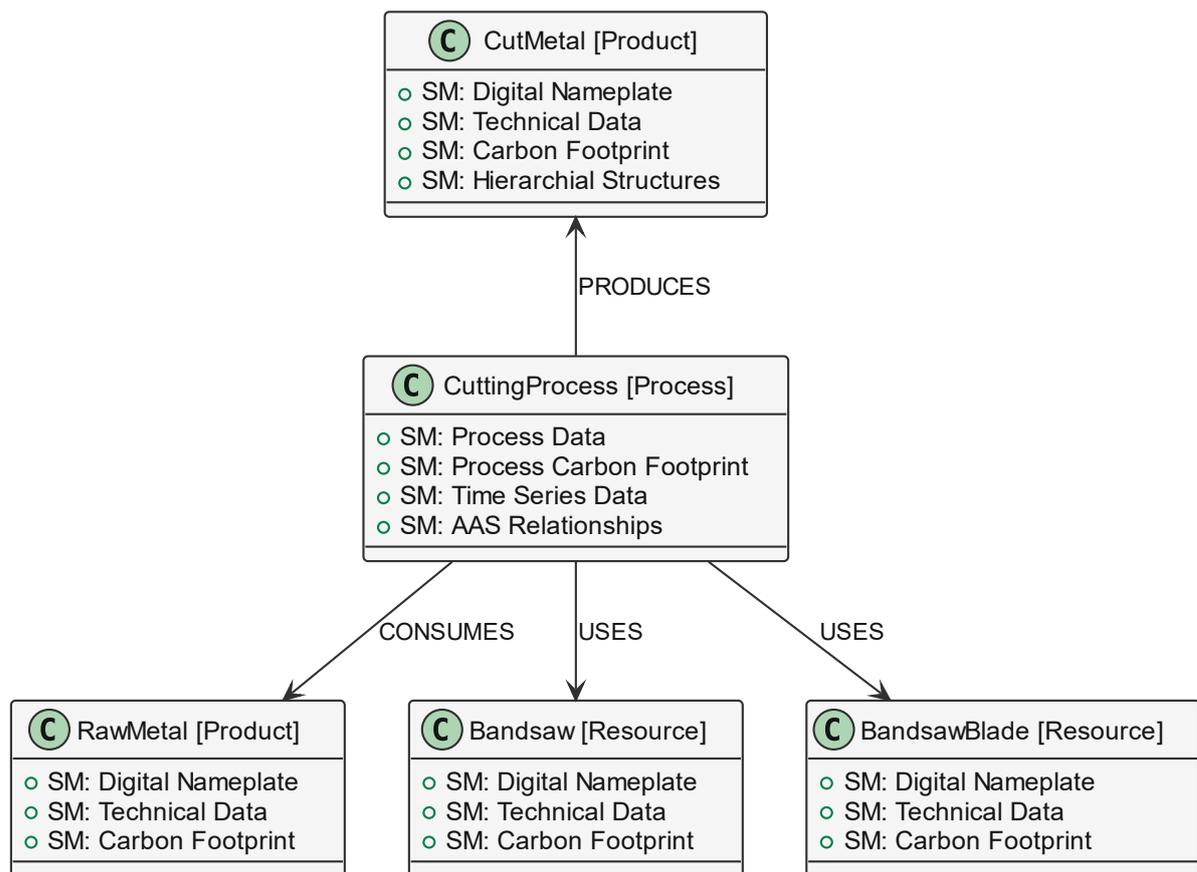


Abb. 15: Darstellung der Beziehungen der Asset Administration Shell des Sägeprozesses mittels Produkt-Prozess-Ressourcen-Modell, modifizierte Abbildung aus Trautner et al. [35]

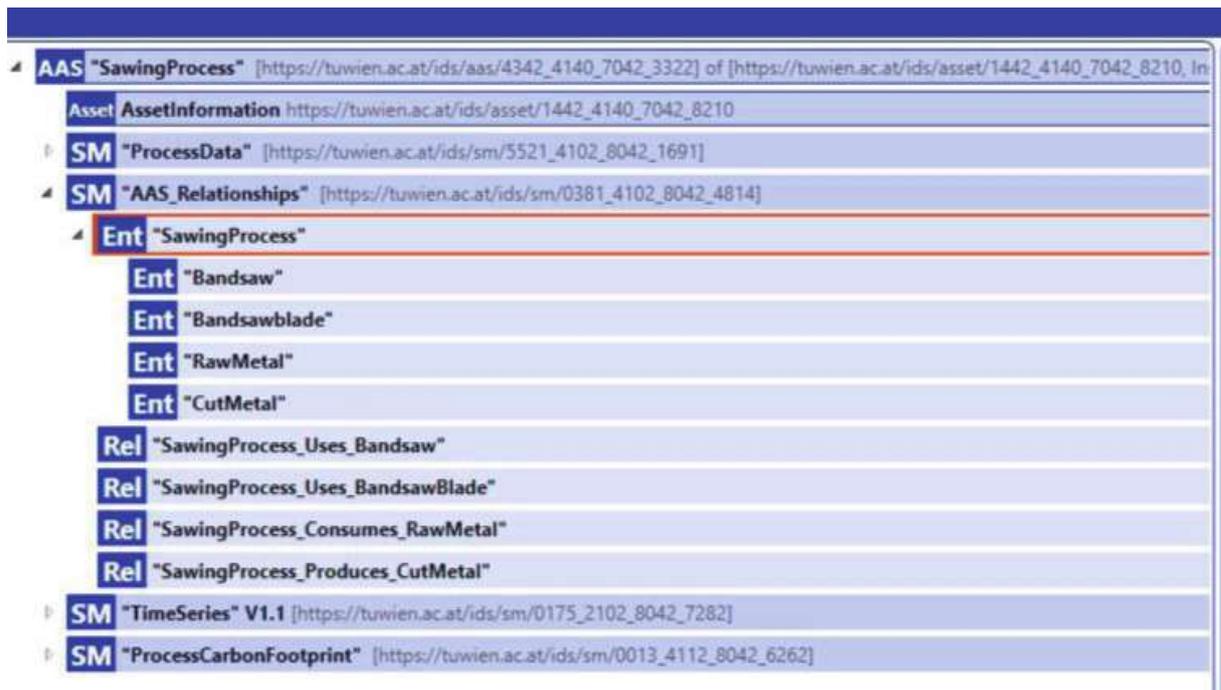


Abb. 16: Asset Administration Shell „Sägeprozess“ im AASX Package Explorer: Submodell AAS Relationships

5.2.8 Breitstellung von Asset Administration Shells auf lokalem Server mittels AASX Server

Für die Interaktion mit den Daten aus den erstellten .aasx-Dateien sowie für die anschließende Durchführung von Berechnungen müssen diese für andere Anwendungen zugänglich gemacht werden. Die ursprünglich statischen Typ 1 AAS, die im AASX Package Explorer erstellt werden, müssen in reaktive Typ 2 AAS umgewandelt werden.

Um eine reaktive AAS, eine Typ 2 AAS zu erhalten ist es notwendig diese in einer externen Anwendung zu hosten, um die Kommunikation zu und von der AAS zu ermöglichen. Diese externe Anwendung ist in diesem Fall der AASX Server, der den Zugriff über eine API ermöglicht.

Der AASX Server besitzt eine browserbasierte Bedienoberfläche, welche in Abb. 17 ersichtlich ist. Auf der linken Seite sind sämtliche am Server befindlichen AAS aufgelistet, auf der rechten Seite befinden sich die Informationen zu der jeweils ausgewählten AAS, Submodellen oder Submodellelementen.

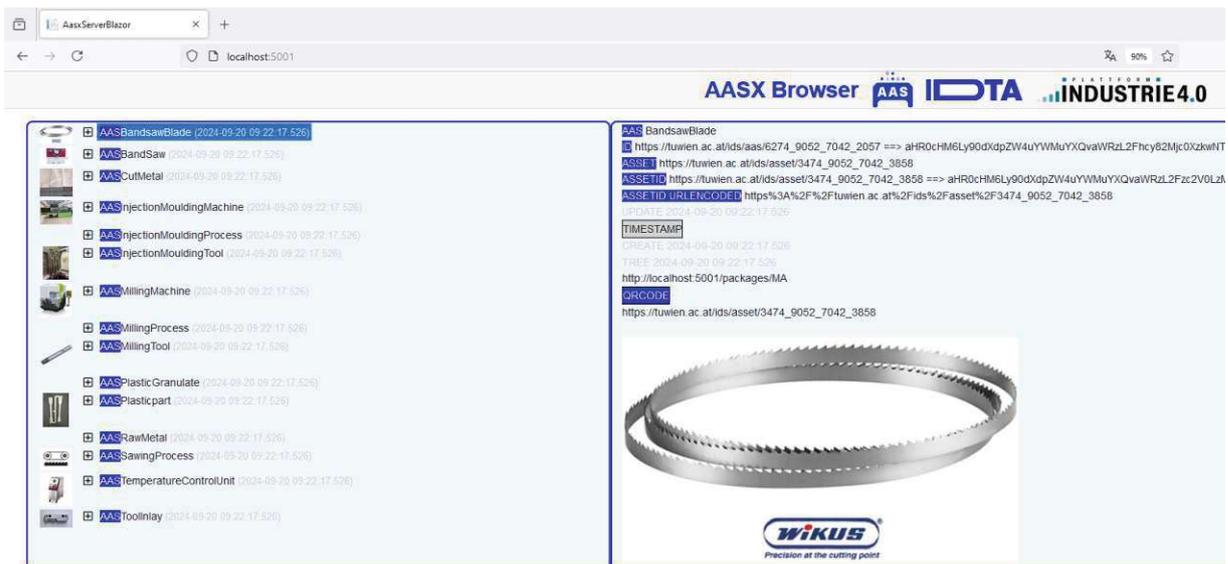


Abb. 17: Browserbasierte Bedienoberfläche des AASX Servers

In der Praxis ist mit den verwendeten Versionen des AASX Package Explorers (2024-02-27.alpha) und des AASX Servers (v.0.3.1.86) die direkte Kommunikation zwischen den beiden Anwendungen nicht möglich. Diese Kommunikation wird mit dem Befehl *File → AASX File Repository → Connect HTTP/REST repository* im AASX Package Explorer etabliert, in dem der Endpunkt des Servers bereitgestellt wird. Da der AASX Server im Rahmen dieser Arbeit lokal auf dem Rechner ausgeführt wird, ist der standardmäßige Endpunkt `http://localhost:5001`.

In älteren Versionen des AASX Package Explorers, welche auf die Verwendung des AAS-Metamodells Version 2 der AAS ausgelegt sind, ist dies jedoch möglich. Entsprechende „Issues“ sind bereits auf GitHub vorhanden, und es ist davon auszugehen, dass dieser Fehler zeitnah behoben wird.

Dieses Kommunikationsproblem kann dadurch umgangen werden, als dass die am AASX Server gehosteten Dateien nach jeder Änderung im AASX Package Explorer neu in jenem lokalen Verzeichnis gespeichert werden, auf welches der AASX Server zugreift. Danach muss ein Neustart des AASX Servers erfolgen.

5.3 Erhebung der Prozessdaten

5.3.1 Messaufbau zur Energiemessung an der Bandsäge Behringer HBE 321A

Zur Erfassung des Energieverbrauchs der Bandsäge wird ein Siemens SentronPAC 4200 Energiemessgerät eingesetzt. Das SentronPAC wird im 3P3W-Verfahren (drei Phasen, drei Leiter) an die Bandsäge angeschlossen. Dabei handelt es sich um eine Anschlussart, welche ohne Neutralleiter arbeitet und für die Messung in dreiphasigen

Systemen mit unsymmetrischer Last verwendet wird. Weiters werden drei Stromwandler des Typs Gossen Metrawatt SC30 mit einem Umsetzverhältnis von 60/1A verwendet, um die hohen Betriebsströme der Bandsäge auf einen für das Messgerät geeigneten Wert zu reduzieren.

Das Siemens SentronPAC 4200 ist mit einem Edge-Device vom Typ Intel NUC i5 via Ethernet Kabel verbunden. Daran angeschlossen ist ein Router vom Typ FL MGuard 1102, welcher die Datenübertragung ins Netzwerk erlaubt.

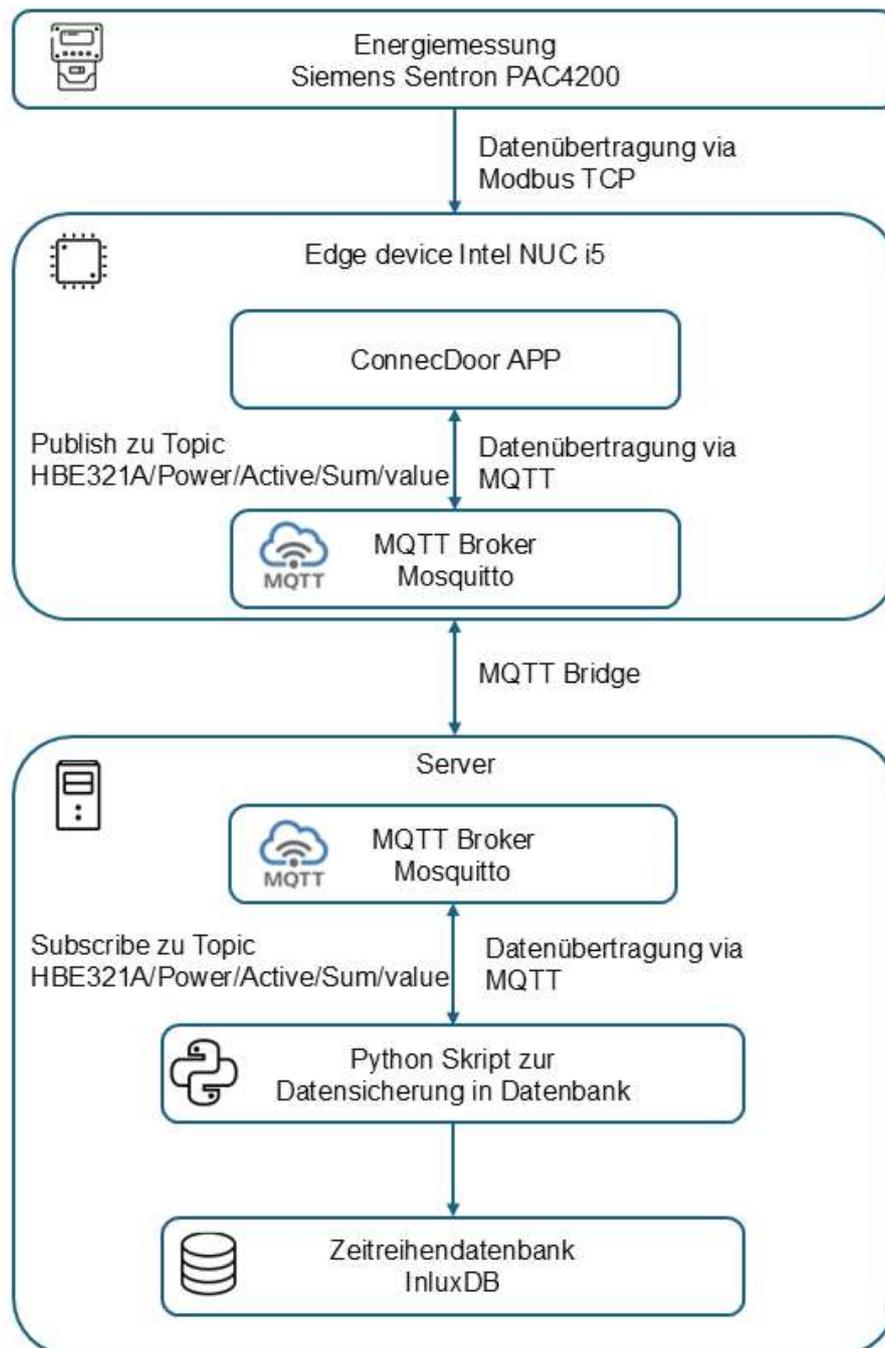


Abb. 18: Visualisierung der Datenverarbeitung

In Abb. 18 ist ersichtlich, wie die gemessenen Energiedaten verarbeitet werden. Die von dem Energiemessgerät gemessenen Daten werden via Modbus Transmission Control Protocol (TCP) an das Edge Device übertragen und durch die ConnecDoor App mittels MQTT an den MQTT Broker weitergeleitet. Beide Applikationen befinden sich auf dem Edge Device. Mittels MQTT Bridge werden die MQTT Daten an einen weiteren MQTT Broker auf einem Server übergeben. Ein Skript abonniert das entsprechende MQTT Topic am zweiten Broker und pflegt die Daten in die Zeitreihendatenbank ein.

5.3.2 Abfrage der Datenbank inklusive Datenverarbeitung mittels Python Skript

Die gemessenen Energiedaten werden in eine Zeitreihendatenbank (InfluxDB) eingespielt. In Abb. 19 ist die gemessene Leistungsaufnahme der Bandsäge als Plot abgebildet.

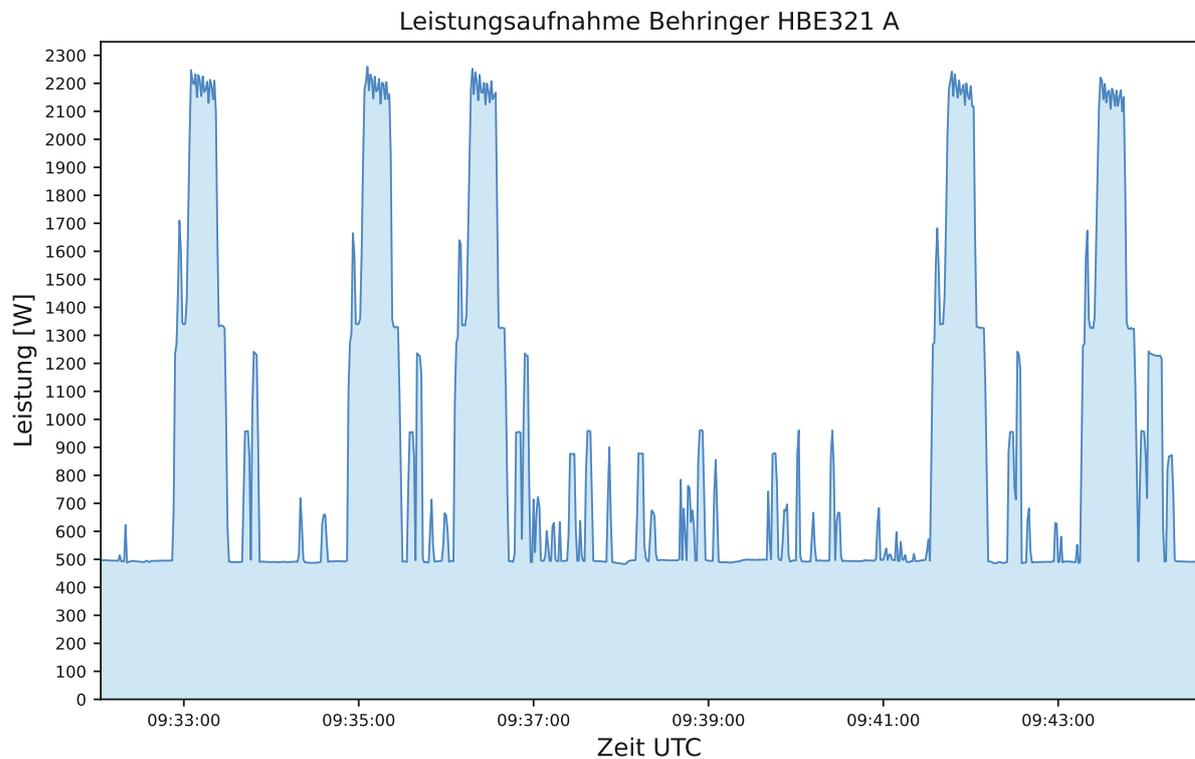


Abb. 19: Grafische Ausgabe der Leistungsdaten der Behringer Bandsäge während des Sägeprozesses

Um die für die weitere Berechnung notwendige Energie zu erhalten, muss die Leistung über die Zeit integriert werden. Dies geschieht mittels Python Skripts, welches die entsprechenden Informationen aus der Datenbank abfragt und gleichzeitig die Integrationsoperation durchführt. Hierbei muss im Skript ein Start- und Endzeitpunkt der Abfrage manuell angegeben werden.

Durch die Einführung von Schwellwerten kann dafür Sorge getragen werden, dass nur jene Energie berechnet wird, die für den Schneidprozess aufgewendet wird. Die beiden Schwellwerte liegen hier bei einer Leistung > 500 Watt über einen Zeitraum von > 20 Sekunden. Damit werden nur die fünf markanten Peaks aus Abb. 19 berücksichtigt.

Da das Rohmaterial nur eine Länge von 750 mm aufweist, ist es nicht möglich, alle 5 Schnitte an der Maschine im automatischen Betriebsmodus, welcher das Ausspannen, die Materialförderung und das Einspannen beinhaltet, durchzuführen. Dieser Prozess

dauert manuell deutlich länger, weshalb sich die ungleichmäßigen Zeitabstände zwischen den Peaks erklären lassen, und hat zur Folge, dass der Energieverbrauch durch die längere Leerlaufzeit höher ist. Zwischen dem zweiten und dem dritten Peak in Abb. 19 befindet sich die Maschine im Automatikmodus. Da diese Zeitspanne für einen industriellen Bandsägeprozess deutlich aussagekräftiger ist als jene im manuellen Betrieb, wird die Energie zwischen diesen genannten Peaks ebenfalls mittels Python Skripts berechnet, weiterfolgend als konstant angenommen und jeweils mit den 5 Schnittenergien summiert. Die Messergebnisse des Energieverbrauchs des Bandsägeprozesses sind in Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1 Ergebnisse der Datenauswertung Energieverbrauch Bandsägeprozess aus Python Skript

Schnitt	Energie pro Schnitt	Energie Einspannen & Materialförderung	Energie gesamt	Einheit
1	18,295	12,758	31,053	Wh
2	18,249	12,758	31,007	Wh
3	18,087	12,758	30,845	Wh
4	18,792	12,758	31,549	Wh
5	18,680	12,758	31,438	Wh
Durchschnitt	18,421	12,758	31,179	Wh

Der Durchschnittswert der fünf Sägeprozesse von 31,179 Wh wird in der AAS „SawingProcess“ im Submodell „ProcessData“ in der Property „EnergyconsumptionPerCut“ hinterlegt.

5.3.3 Weitere notwendige Daten zur Berechnung des CO₂e entlang der Wertschöpfungskette

In dieser Arbeit steht nicht die exakte Berechnung des CO₂-Fußabdrucks des Kunststoffteils im Vordergrund, sondern vielmehr die ganzheitliche Darstellung der Wertschöpfungskette, einschließlich der innerhalb der Systemgrenzen befindlichen Produkte, Prozesse und Ressourcen als AAS. Diese digitale Abbildung mit den darin enthaltenen Daten dienen als Grundlage für die Entwicklung einer nachfolgend beschriebenen Berechnungslogik. Die zur Berechnung herangezogenen Daten sind daher nicht exakt, sondern basieren auf einer bestmöglichen Schätzung und Abstraktion aus der Literatur. Da im Zuge dieser Arbeit kein Zugang zu einer vollumfänglichen Life Cycle Assessment Datenbank bestand, wurden die Daten nach bestem Wissen und Gewissen ermittelt. Die Herangehensweise wird nachfolgend an einem Beispiel erläutert.

Zu einer Abschätzung des CO_{2e} der Fräsmaschine Präzoplan 300 wird die Arbeit von Diaz et al. [46] herangezogen, in der die notwendige Energie zur Herstellung einer Fräsmaschine ähnlicher Baugröße vom Typ Mori Seiki DuraVertical 5060 ermittelt wird. Der Energiebedarf beläuft sich auf 100.000 MJ, was 27.778 kWh entspricht. Dabei ist die Materialgewinnung der energieintensivste Prozess, auf den etwa 70 % des gesamten Energieverbrauchs bei der Herstellung entfallen. Zum Zeitpunkt des Baujahres der Präzoplan Maschine im Jahr 2015 lag der CO₂-Intensitätsfaktor in der Stromerzeugung in Deutschland bei 503 g/kWh [47]. Auf Basis dieser Daten lässt sich das CO_{2e} der Präzoplan Maschine auf 14.000 kg abschätzen.

Als weiteres Beispiel für die Ermittlung der in dieser Ökobilanz verwendeten Daten soll die Arbeit von Agarski et al. [48] dienen. Die Autoren haben in ihrer Arbeit zur Ökobilanz von Spritzgusswerkzeugen den CO₂-Fußabdruck von vier Spritzgusswerkzeugen bestimmt. Anhand der Ergebnisse von Agarski et al. [48] wurde das CO_{2e} des Spritzgusswerkzeugs in dieser Arbeit mit 553 kg definiert.

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind sämtliche in der Berechnung des CO_{2e} entlang der Wertschöpfungskette verwendeten Daten zu finden.

Tabelle 2: Verwendete Daten zur Berechnung der CO_{2e} der über die Wertschöpfungskette hinweg inklusive Beschreibung und Quelle

Daten für nachfolgende Berechnung	Wert	Beschreibung	Quelle
Prozessübergreifend			
CO ₂ Intensität	0,111 kg _{CO2} /kWh	CO ₂ Intensität der Energieerzeugung in Österreich 2023.	Statista [49]
Spezifischer CO _{2e} Werkzeugstahl	1,0803 kg _{CO2} /kg	CO _{2e} des Kaltarbeitsstahls C45, ähnliche chemische Zusammensetzung gemäß Stahlgruppen Werkstoff Tabelle zum verwendeten 1.2842 Stahl.	Idemat 2024 Datenbank [50], Stahlgruppen Werkstoff Tabelle [51]
Dichte Werkzeugstahl	7.850 kg/m ³		Datenblatt [52]
Sägeprozess			

CO ₂ e Werkzeugstahl (spezifisch)	8,269 kg	Masse des verwendeten Werkzeugstahlhalbzeugs mit dem CO ₂ e von C45.	Idemat 2024 Datenbank [50]
CO ₂ e Bandsäge	5.000 kg	Abschätzung gemäß Masse der Maschine im Vergleich zu der ermittelten Fräsmaschine aus Diaz et al.	Diaz et al. [46]
CO ₂ e Bandsägeblatt	2,88 kg	Masse des Bandsägeblattes mit dem CO ₂ e von 1 kg 50CrV4 Vergütungsstahl inklusive 100 % Aufschlag für Herstellung.	Idemat 2024 Datenbank [50]
Lebensdauer Bandsäge	15.000 h	Nominale Lebensdauer auf Basis von 8 Jahren Betrieb im Einschichtbetrieb 8 Stunden täglich, nur Werktags	Annahme
Lebensdauer Bandsägeblatt	30 h	Nominale Lebensdauer im Eingriff.	Expertenmeinung TU Wien IFT
Energieverbrauch Bandsägeprozess pro Stück	31,179 Wh	Messung mittels Siemens SentronPac siehe Kapitel 5.3.1	Messung Siemens SentronPac
Dauer Bandsägeprozess pro Stück	0,0203 h	Messung mittels Siemens SentronPac siehe Kapitel 5.3.1	Messung Siemens SentronPac
Masse Werkzeugstahl	7,654 kg		Messung, Wiegen
Masse Schnittmetall	1,259 kg		Messung, Wiegen

Fräsprozess

CO ₂ e Fräsmaschine	14.000 kg	Vergleich zu der ermittelten Fräsmaschine aus Diaz et al. und der entsprechenden CO ₂ -Intensität in Deutschland im Baujahr 2015.	Diaz et al. [46], Statista [47]
--------------------------------	-----------	--	---------------------------------

CO _{2e} Fräswerkzeug	0,57 kg	CO _{2e} eines Hartmetall-Spiralbohrers mit TiAlN-Beschichtung in Kashyap et al.	Kashyap et al. [53]
Lebensdauer Fräsmaschine	15.000 h	Nominale Lebensdauer auf Basis von 8 Jahren Betrieb im Einschichtbetrieb 8 Stunden täglich, nur Werktags	Annahme
Lebensdauer Fräswerkzeug	1,25 h	Nominale Lebensdauer im Eingriff, Richtwert aus Alauddin et al.	Alauddin et al. [54]
Spezifischer Energieverbrauch Fräsen	8,7E-6 kWh/mm ³	Durchschnittswert der Versuche aus Campatelli et al., spezifischer Energieverbrauch pro mm ³ abgetragenes Material während des Fräsprozesses, Umrechnung von J auf kWh.	Campatelli et al. [55]
Dauer Fräsprozess	0,167 h	Abschätzung der reinen Bearbeitungszeit.	Expertenmeinung TU Wien IFT
Masse Inlay	0,2661 kg		Messung, Wiegen

Spritzgussprozess

CO _{2e} Spritzgussmaschine	10.000 kg	Abschätzung gemäß bekannter vergleichbarer Maschinenbaugröße	Expertenmeinung TU Wien IFT
CO _{2e} Temperiergerät	100 kg	Annahme gemäß Masse des Temperiergeräts von 31 kg	Annahme
CO _{2e} Spritzgusswerkzeug	553 kg	Berechnung des CO _{2e} für ein Spritzgusswerkzeug ähnlicher Dimensionen in Agarski et al.	Agarski et al. [48]
Lebensdauer Spritzgussmaschine	15.000 h	Nominale Lebensdauer auf Basis von 8 Jahren Betrieb im Einschichtbetrieb 8 Stunden täglich, nur Werktags	Annahme

Lebensdauer Temperiergerät	15.000 h	Nominale Lebensdauer auf Basis von 8 Jahren Betrieb im Einschichtbetrieb 8 Stunden täglich, nur Werktags	Annahme
Lebensdauer Spritzgusswerkzeug	1.000.000 Schuss	Üblicher Wert der zur Berechnung diverser Kennzahlen im Bereiche Spritzgusswerkzeug herangezogen wird.	Huang et al. [56]
Lebensdauer Inlay	200.000 Schuss	Geringere Lebensdauer als das Werkzeug aufgrund wiederholt Montage und Demontage.	Annahme
Spezifischer Energieverbrauch Spritzgießen	0,405 kWh/kg	Wert aus Thiriez und Gutowski, spezifischer Energieverbrauch pro kg verarbeiteten Kunststoff auf einer vollelektrischen Spritzgussmaschine, Umrechnung von MJ auf kWh.	Thiriez und Gutowski [57]
CO _{2e} Kunststoff ABS	3,1 kg _{CO2} /kg	Wert für ABS aus Idemat 2024 Datenbank mit Verweis auf die Plastics Europe LCI database.	Idemat 2024 Datenbank [50]
Schussgewicht Spritzgussteil	0,0289 kg	Masse an Kunststoff pro Spritzgusszyklus	Messung, Wiegen
Zykluszeit	0,00833 h	Dauer zur Herstellung des Kunststoffbauteils	Expertenmeinung TU Wien IFT

5.4 Berechnung des CO₂-Fußabdrucks entlang der Wertschöpfungskette

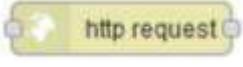
Gemäß der Systemgrenze können alle Einflussparameter auf den CO₂-Fußabdruck des Endproduktes der Wertschöpfungskette abgeleitet werden. So verfügt beispielsweise jede eingesetzte Maschine und jedes eingesetzte Werkzeug über einen CO₂-Fußabdruck und eine angenommene Lebensdauer. Durch die Nutzungsdauer bei der Herstellung eines Produktes geht dieser CO₂-Fußabdruck anteilig als Abnutzung der Maschine oder des Werkzeugs in das Produkt ein. Ebenso besitzt das Rohmaterial, welches zur Herstellung der Produkte verwendet wird, ein spezifisches

CO_{2e} welches in der Literatur in kg_{CO2} pro kg Rohmaterial angegeben wird. Mithilfe der Primärdaten aus dem Sägeprozess sowie Sekundärdaten für den Fräs- und den Spritzgussprozess wird das CO_{2e} des Energieverbrauchs der Prozesse ermittelt.

5.4.1 Detaillierte Betrachtung am Beispiel Energieverbrauch Sägeprozess mittels Node-RED

Wie in 2.8.3 beschrieben basiert die Programmierumgebung Node-RED auf der Verwendung von Knoten welche bestimmten Funktionen mitbringen. Tabelle 3 erklärt die in weiterer Folge in Abb. 20 verwendeten Knoten.

Tabelle 3: Beschreibung/Funktion der einzelnen Node-RED Knoten im Kontext des Beispiels in Abb. 20

Node-RED Knoten	Beschreibung/Funktion
	Der Inject Knoten dient als „Startknopf“ um manuell den Ablauf des Programms, den sogenannten Flow zu starten.
	Der HTTP Request Node ermöglicht es Daten vom AASX Server abzurufen (GET) und an den Server zu senden (PUT). Die Daten der GET-Abfrage werden als JSON Objekt zur Verfügung gestellt. Die Berechnungsergebnisse werden via PUT-Befehl an den Server gesendet und dort als Wert in der entsprechenden AAS dargestellt.
	Im Function Knoten werden Variablen definiert und Berechnungsoperationen durchgeführt.
	Der Join Knoten wird verwendet, um die Payloads (Nachrichten) aus mehreren Datenquellen zu einer einzelnen Nachricht zusammenzufassen, damit diese gesammelt weiterverarbeitet werden können.
	Der Change Knoten ist wie ein einfaches Werkzeug, mit dem Daten in einem Flow ohne Programmieraufwand umbenannt, ersetzt oder verändert werden können. Dies vereinfacht die weitere Berechnungsmethodik da die Ergebnisse der Berechnungen der einzelnen Flows gesammelt für die Weiterverarbeitung, dem summieren für den gesamten (Teil)Prozess, bereitgestellt werden.

Die Berechnung des CO_{2e} des Sägeprozesses mittels Node-RED (Abb. 20) soll exemplarisch für die deutlich umfangreichere Gesamtberechnung dienen.

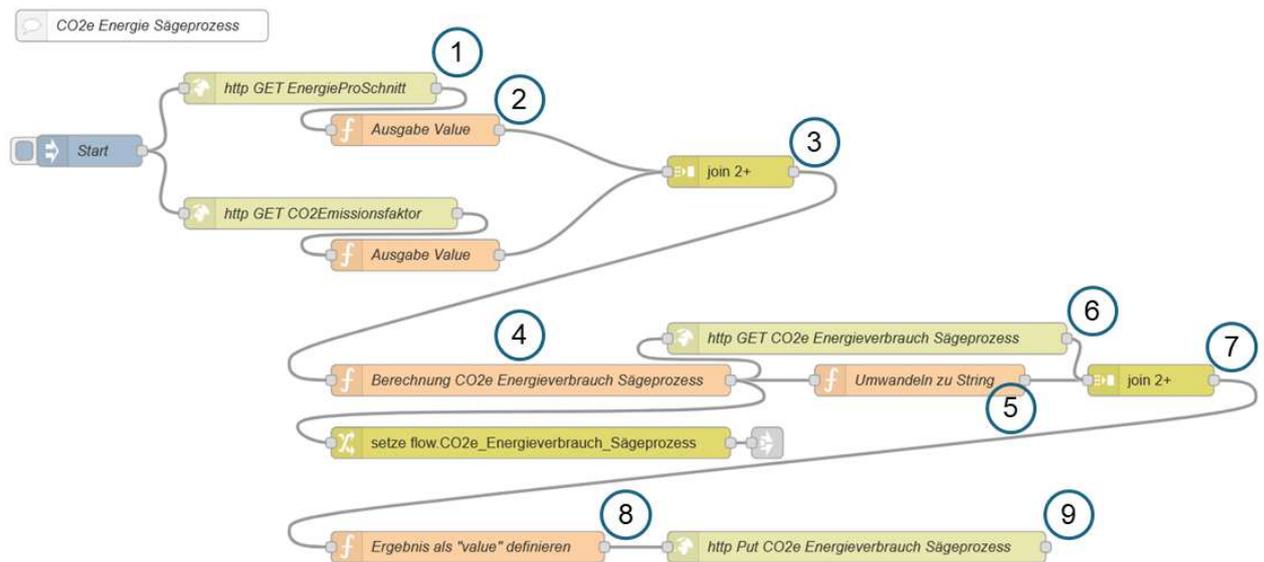


Abb. 20: Beispielhafte Berechnung des CO₂ Äquivalents des Energieverbrauchs des Sägeprozesses mittels Node-RED

Der in Abb. 20 dargestellten Flow wird im Folgenden näher erläutert. Die nummerierte Reihenfolge der Knoten in der Grafik entspricht der nachfolgenden Aufzählung:

- 1) Die beiden HTTP GET Knoten rufen die jeweiligen Properties, in diesem Beispiel die Energie Pro Schnitt und den CO₂ Emissionsfaktor von dem AASX Server ab und geben diese als JSON Objekt als Payload aus. Jede Property ist durch eine eigene Uniform Resource Locator (URL) am AASX Server eindeutig identifizierbar. Beide Properties befinden sich in diesem Fall in der AAS des Sägeprozesses im Submodell „ProcessData“. Dies ist nicht zwangsläufig der Fall, da des Öffteren auch Properties aus unterschiedlichen AAS für die jeweiligen Berechnungen notwendig sind.
- 2) Das JSON Objekt beinhaltet u. a. den Wert der jeweiligen Property als String. Damit nachfolgende Berechnungsoperationen möglich sind, wird der Wert in dem Funktionsknoten „Ausgabe Value“ in eine Gleitkommazahl umgewandelt. Außerdem werden die Payloads für die Weiterverarbeitung eindeutig benannt.
- 3) Im Join Knoten werden die beiden Payloads aus den beiden Funktionen zu einer einzigen Nachricht zusammengefasst.
- 4) Im Funktionsknoten „Berechnung CO₂e Energieverbrauch Sägeprozess“ werden zuerst den beiden Payloads Variablennamen zugewiesen. In diesem Beispiel lauten die beiden Variablen *energy_per_cut* und *co2ef*. Anschließend wird die Ergebnisvariable *co2e_energy_cuttingproces* definiert und die Berechnungsoperation durchgeführt. Die entsprechende Berechnungsformel (1) lautet:

$$co2e_energy_cuttingproces = energy_per_cut \times co2ef \quad (1)$$

Dabei bedeutet:

co2e_energy_cuttingproces = CO_{2e} des Energieverbrauchs des Sägeprozesses in Kilogramm

co2ef = CO₂-Intensität der Energieerzeugung in Gramm CO₂ pro erzeugter Kilowattstunde

energy_per_cut = Energieverbrauch während des Sägeprozesses in Kilowattstunden

Die beiden Variablen *co2ef* und *energypercut* werden anschließend direkt in diesem Knoten gelöscht, da sie sie für die weitere Vorgehensweise keine Verwendung mehr haben.

- 5) Im Funktionsknoten „Umwandeln zu String“ wird das errechnete Ergebnis des vorherigen Knotens von einer Gleitkommazahl wieder in einen String umgewandelt. Die Begründung dafür erfolgt in 8).
- 6) Der HTTP GET Knoten ruft jene Property vom AASX Server ab, welche das Ergebnis der vorangegangenen Berechnung beinhalten soll. In diesem Fall ist diese das CO_{2e} des Energieverbrauchs des Sägeprozesses, welche sich im Submodell „ProcessCarbonFootprint“ der AAS des Sägeprozesses befindet. Das abgerufene JSON Objekt gilt hierbei als Schablone für die weitere Vorgehensweise da dieses sämtlichen Konventionen des Servers entspricht.
- 7) Im Join Knoten werden die beiden Payloads, also das JSON Objekt aus dem HTTP GET und das Ergebnis aus der Berechnung als String zusammengefasst.
- 8) Das JSON Objekt welches in 6) abgerufen wird beinhaltet zwar sämtliche Informationen über die Property wie beispielsweise die ID Short hat jedoch keinen Wert als „value“ zugewiesen. Dies begründet sich daraus, als dass der Wert, welcher hier hinterlegt werden soll in der vorherigen Berechnung ermittelt wurde. Aus diesem Grund ist die Umwandlung des Ergebnisses zu einem String in 5) notwendig. Der Funktionsknoten definiert den String *co2e_energy_cuttingproces* unter dem Namen „value“ gemäß der Konvention des JSON Objekts und löscht *co2e_energy_cuttingproces* anschließend. Damit ist das Berechnungsergebnis im JSON Objekt hinterlegt.
- 9) Das bearbeitete JSON Objekt des Properties CO_{2e} des Energieverbrauchs des Sägeprozesses wird im HTTP PUT Knoten an den Server übergeben und beinhaltet das Ergebnis, welches auf dem AASX Server dargestellt wird.

Das Berechnungsergebnis wird außerdem an einen weiteren Flow übergeben, welcher sämtliche für den Sägeprozess relevanten CO_{2e} Berechnungen aggregiert. Innerhalb der Systemgrenzen handelt es sich hierbei für den Sägeprozess um folgende CO_{2e}:

- Energieverbrauch Sägeprozess
- Anteilige Abnutzung Bandsägeblatt
- Anteilige Abnutzung Bandsägemaschine
- Spanabtrag Sägeprozess
- Materialanteil des Werkzeugstahls, der als Halbzeug in den Prozess eingebracht wird

Diese fünf CO_{2e} werden summiert und bilden das CO_{2e} des Produkts des Prozesses, in diesem Fall des Schnittmetalls.

5.4.2 Zusammenfassung der weiteren Berechnungslogik

Insgesamt werden 19 Berechnungsoperationen ähnlich zu dem Beispiel aus 5.4.1 in Node-RED entlang der Wertschöpfungskette durchgeführt. Die Berechnungen der einzelnen CO_{2e} sind in Tabelle 4 beschrieben. Die dafür verwendeten Daten sind Tabelle 3 in 5.3.3 zu finden.

Tabelle 4: Berechnungslogik der CO₂-Äquivalente

CO ₂ -Äquivalente	Berechnungslogik
Sägeprozess	
Energieverbrauch Sägeprozess	Siehe 5.4.1, Produkt aus Intensität der Energieerzeugung und Energieverbrauch beim Sägeprozess für ein Stück.
Anteilige Abnutzung Bandsäge	Produkt aus CO _{2e} Bandsäge und Dauer Bandsägeprozess pro Stück dividiert durch Lebensdauer Bandsäge.
Anteilige Abnutzung Bandsägeblatt	Produkt aus CO _{2e} Bandsägeblatt und Dauer Bandsägeprozess pro Stück dividiert durch Lebensdauer Bandsägeblatt.
Spanabtrag	Differenz zwischen Masse Werkzeugstahlhalbzeug und aller Schnittmetalle (6 Stück). Das Ergebnis daraus wird nachfolgend dividiert durch die Anzahl der Stücke und multipliziert mit dem spezifischen CO _{2e} des Werkzeugstahls.

Materialanteil Werkzeugstahl	Produkt aus Masse des Schnittmetalls und dem spezifischen CO _{2e} des Werkzeugstahls.
Schnittmetall	Summe aus den fünf darüber genannten CO _{2e} aus dem Sägeprozess

Fräsprozess

Energieverbrauch Fräsprozess	Berechnung des Volumens des Spanabtrags mittels Differenz zwischen Masse Schnittmetall und Masse Inlay sowie der Dichte des Werkzeugstahls. Volumen des Spanabtrags multipliziert mit spezifischen Energieverbrauch Fräsen und Intensität der Energieerzeugung.
Anteilige Abnutzung Fräsmaschine	Produkt aus CO _{2e} Fräsmaschine und Dauer Fräsprozess dividiert durch Lebensdauer Fräsmaschine.
Anteilige Abnutzung Fräswerkzeug	Produkt aus CO _{2e} Fräswerkzeug und Dauer Fräsprozess dividiert durch Lebensdauer Fräswerkzeug.
Spanabtrag	Differenz zwischen Masse Schnittmetall und Masse Inlay. Nachfolgend multipliziert mit dem spezifischen CO _{2e} des Werkzeugstahls.
Materialanteil Werkzeugstahl	Produkt aus Masse des Inlays und dem spezifischen CO _{2e} des Werkzeugstahls.
Inlay	Summe aus den fünf darüber genannten CO _{2e} aus dem Fräsprozess und den CO _{2e} aus dem Sägeprozess exklusive dem Materialanteil aus dem Sägeprozess

Spritzgussprozess

Energieverbrauch Spritzgussprozess	Produkt aus spezifischen Energieverbrauch Spritzgießen, Intensität der Energieerzeugung und Masse Kunststoffteil
Anteilige Abnutzung Spritzgussmaschine	Produkt aus CO _{2e} Spritzgussmaschine und Zykluszeit Spritzgussprozess dividiert durch Lebensdauer Spritzgussmaschine.
Anteilige Abnutzung Temperiergerät	Produkt aus CO _{2e} Temperiergerät und Zykluszeit Spritzgussprozess dividiert durch Lebensdauer Temperiergerät.
Anteilige Abnutzung Spritzgusswerkzeug	CO _{2e} Spritzgusswerkzeug dividiert durch Lebensdauer Spritzgusswerkzeug (Berechnungsbasis Schuss).

Anteilige Abnutzung Inlay	CO _{2e} Inlay dividiert durch Lebensdauer Inlay (Berechnungsbasis Schuss).
Materialanteil Kunststoffteil	Produkt aus Masse des Kunststoffteils und dem spezifischen CO _{2e} des Kunststoffes.
Kunststoffteil	Summe aus den sechs darüber genannten CO _{2e} aus dem Spritzgussprozess.

6 Ergebnisse

6.1 Ergebnisse der Berechnung des CO₂-Fußabdrucks

Abb. 21 zeigt die Zusammensetzung der einzelnen Bestandteile aus der CO₂-Fußabdruckberechnung in Form eines Sankey-Diagramms. Die Berechnung des Inlays umfasst acht CO₂e, von denen fünf durch den Sägeprozess in das Produkt „Schnittmetall“ einfließen. Ergänzt werden diese durch drei weitere Werte aus dem Fräsprozess, die zusammen den CO₂-Fußabdruck des Inlays ergeben. Der Anteil des Inlays an der Produktion einer funktionalen Einheit, dem Kunststoffprodukt, sowie fünf weitere CO₂e aus dem Spritzgussprozess bestimmen den CO₂-Fußabdruck des Kunststoffteils.

Laut den Berechnungen beträgt der CO₂-Fußabdruck des Inlays 1,75 kg. Der größte Anteil von 77,8 % entfällt auf den CO₂-Fußabdruck des Materialanteils des verwendeten Werkzeugstahls (siehe Abb. 22). Zudem zeigt sich, dass sowohl der Energieverbrauch als auch die anteiligen Abnutzungen der Maschine und des Werkzeugs im Fräsprozess deutlich stärker ins Gewicht fallen als im Sägeprozess. Dies lässt sich durch die erheblich längere Prozessdauer des Fräsens im Vergleich zum Sägen erklären (601 Sekunden gegenüber 73 Sekunden).

Erklärend soll zu Abb. 21 und Abb. 22 angemerkt werden, dass der Spanabtrag im Fräsprozess keinen Einfluss auf das CO₂-Fußabdruck des Inlays hat, da das entfernte Material bereits durch das CO₂e des Materialanteils Werkzeugstahl des Schnittmetalls abgegolten ist. Dies steht im Gegensatz zu dem Spanabtrag im Sägeprozess, da dort aus einem Werkzeugstahl Halbzeug sechs Zuschnitte produziert werden und dementsprechend der Spanabtrag berücksichtigt werden muss.

Der CO₂-Fußabdruck des Kunststoffbauteils beträgt 0,10 kg. Der überwiegende Anteil, der auf das verarbeitete Material zurückzuführen ist, macht mit knapp 90 % den größten Beitrag aus (siehe Abb. 23). Dies ist wenig überraschend, da die eingesetzten Maschinen, das Werkzeug sowie das Inlay für die Herstellung von mehreren zehntausend Stück ausgelegt sind. Daher ist es nachvollziehbar, dass beispielsweise der Verschleiß der Spritzgussmaschine nur einen sehr geringen Einfluss auf das einzelne Kunststoffbauteil hat.

Der Beitrag des Inlays am CO₂-Fußabdruck des Kunststoffbauteils, basierend auf dem CO₂-Fußabdruck des Inlays und dessen Abnutzung über 200.000 Spritzgusszyklen, beträgt $8,1 \cdot 10^{-6}$ kg und macht somit lediglich einen Gesamtanteil von 0,01 % aus. Dies verdeutlicht, dass eine Reduktion des CO₂-Fußabdrucks des Inlays, etwa durch eine Optimierung des Fräsprozesses, keinen signifikanten Einfluss auf den CO₂-Fußabdruck des Kunststoffbauteils hat.

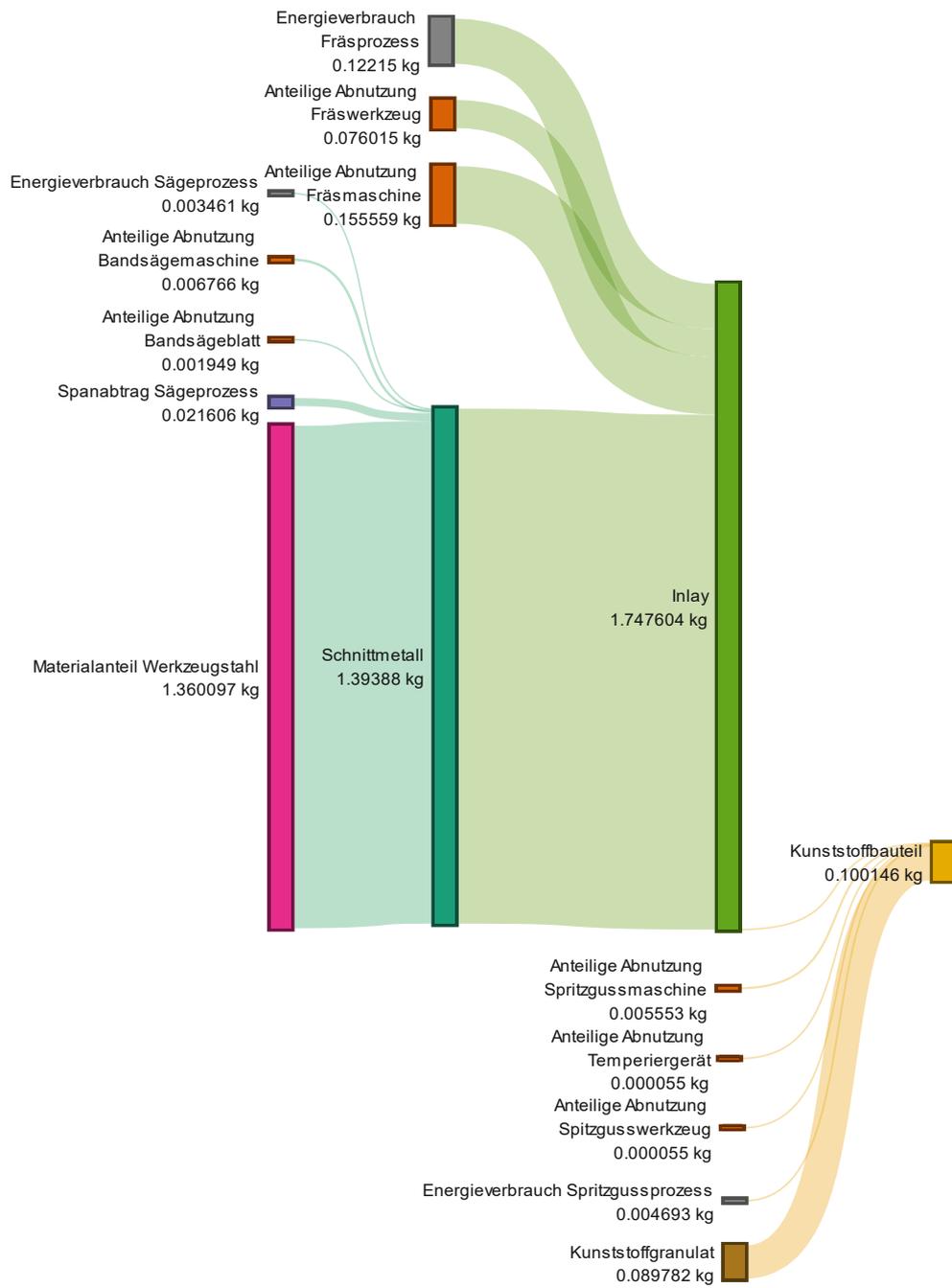


Abb. 21: Sankey-Diagramm der Zusammensetzung der CO₂-Fußabdrücke

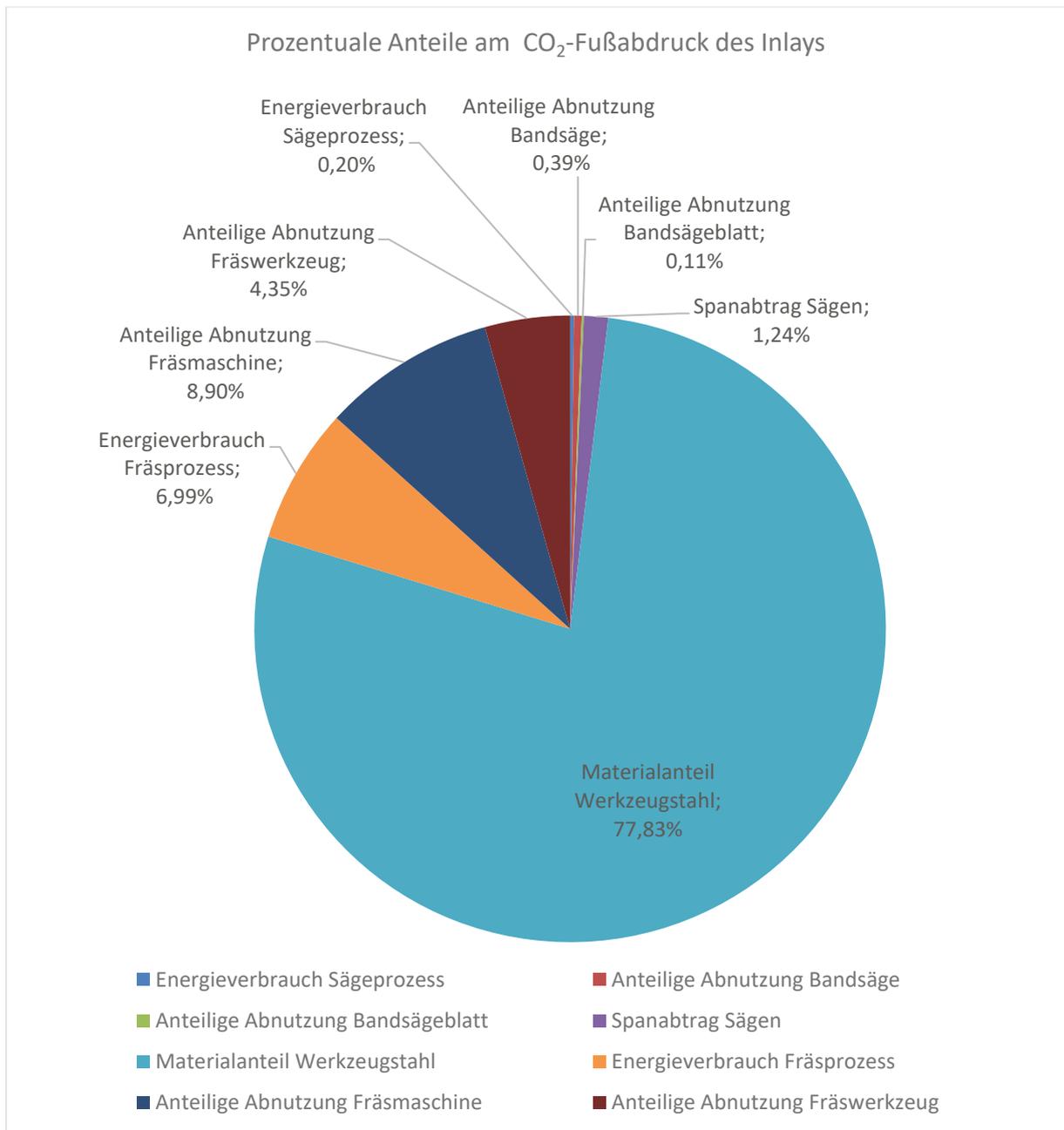


Abb. 22: Kreisdiagramm der prozentualen Anteile am CO₂-Fußabdruck des Inlays

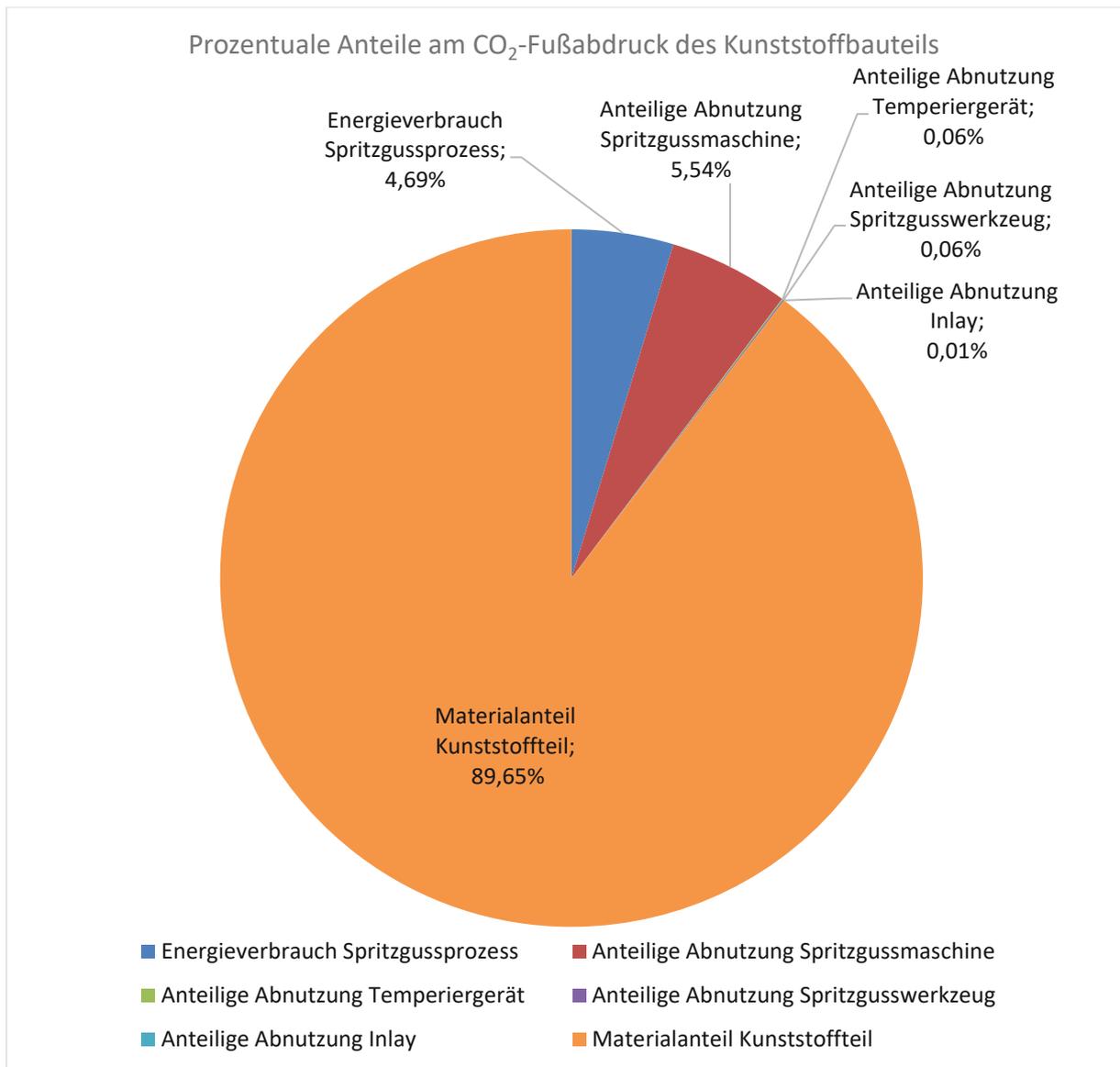


Abb. 23: Kreisdiagramm der prozentualen Anteile am CO₂-Fußabdruck des Kunststoffbauteils

6.2 Integration der CO₂-Berechnungsergebnisse in die Asset Administration Shell

Neben den quantitativen Ergebnissen der CO₂-Fußabdrucksberechnung stellt das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Framework der Modellierung der Wertschöpfungskette mittels AAS, welche als DPP und DPssP dienen, inklusive der damit verbundenen Berechnungsoperation ein weiteres wichtiges Ergebnis dar.

Nach Festlegung der Systemgrenzen und der funktionellen Einheit werden die AAS der am Gesamtprozess beteiligten Produkte, Prozesse und Ressourcen im AASX Package Explorer erstellt. Diese werden als DPP bzw. DPssP modelliert und anhand von Beziehungen gemäß der Prozesshierarchie miteinander verknüpft. Anschließend

werden diese AAS mit den notwendigen Daten befüllt. Im Falle AAS der Prozesse, welche als DPssP modelliert sind werden Primärdaten für den Sägeprozess sowie Sekundärdaten für den Fräs- und den Spritzgussprozess verwendet. Die Primärdaten für den Sägeprozess werden in dieser Arbeit mithilfe eines Python Skript von einer bestehenden Datenbank abgefragt und verarbeitet. Diese werden anschließend manuell in dem Submodell „Process Data“ hinterlegt.

Im nächsten Schritt werden sämtliche AAS am AASX Server gehostet, wodurch die passiven Typ 1 AAS zu reaktiven Typ 2 AAS werden. Die API des Servers erlaubt den Zugriff einer externen Umgebung, in diesem Fall Node-RED. In Node-RED wird die Berechnungsoperation für den CO₂-Fußabdruck modelliert. Alle für die Berechnung relevanten Daten aus den AAS auf dem AASX Server werden durch Ausführung der Operation in Node-RED eingelesen, und die Berechnung wird durchgeführt.

In Abb. 24 ist das Submodellelement des CO₂-Fußabdrucks des Kunststoffbauteils vor der Ausführung der Berechnung in Node-RED am AASX Server dargestellt. Vor der Berechnung ist das Submodellelement zwar in der AAS vorhanden, jedoch wird darin kein Wert ausgegeben. In Abb. 25 ist das Submodellelement des CO₂-Fußabdrucks des Kunststoffbauteils vor nach Ausführung der Berechnung in Node-RED am AASX Server dargestellt.

Das entwickelte Framework, das durch die modulare Struktur von AAS und Node-RED flexibel erweiterbar ist, ermöglicht eine Anpassung sowohl durch erweiterte Systemgrenzen als auch durch die Verbesserung der Datenqualität, z. B. durch die Verwendung von Primärdaten für alle Prozesse. Gleichzeitig dient das Framework als exemplarisches Modell zur CO₂-Fußabdruckberechnung eines Endprodukts über verschiedene Produktionsprozesse hinweg mittels AAS und kann auf andere Anwendungsfälle übertragen werden.



Abb. 24: CO₂-Fußabdruck des Kunststoffteils am AASX Server vor dem Ausführen der Node-RED Berechnung



Abb. 25: CO₂-Fußabdruck des Kunststoffteils am AASX Server nach dem Ausführen der Node-RED Berechnung

7 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die legislativen Vorgaben im Zusammenhang mit dem „European Green Deal“ kann der DPP zukünftig zwar einen wertvollen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele der europäischen Union leisten, die konkrete Umsetzung ist jedoch noch zu einem erheblichen Teil unklar. Die Unklarheiten resultieren insbesondere aus den zahlreichen noch nicht geklärten Fragen bezüglich der Standardisierung, Datenverfügbarkeit und technischen Integration. Als Beispiel soll zur Verdeutlichung genannt sein, dass keiner der Hersteller der verwendeten Maschinen und Werkzeuge (Bandsägemaschine, Sägeband, Spritzgussmaschine, Temperiergerät) den CO₂-Fußabdruck des eigenen Produktes auf Nachfrage bereitstellen konnte.

In der Einleitung wurde die Frage formuliert, wie die Modellierung eines Produktionsprozesses mithilfe von AAS gestaltet werden kann, sodass diese entlang der Wertschöpfungskette als DPP bzw. DPssP genutzt werden und die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks des Endprodukts ermöglichen. Diese Frage wird im Folgenden beantwortet.

Beginnend wird auf Basis einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 die Systemgrenze des Gesamtprozesses vom Werkzeugstahl zum Kunststoffbauteil, die betrachtete funktionelle Einheit sowie die notwendige Datenqualität bestimmt und eine Unterteilung des Gesamtprozesses in einzelne Prozessmodule durchgeführt. Bei den verwendeten Daten handelt es sich um Primärdaten aus der Energiemessung des Sägeprozesses sowie um Sekundärdaten hinsichtlich der weiteren Prozesse und der Materialdaten.

Sämtliche AAS sind so modelliert, dass sie als DPP gemäß der Definition von Neligan et al. [22] bzw. als DPssP in eigener Definition in Anlehnung an Alt et al. [1], [2] verwendet werden können. Dies geschieht durch Verwendung des AASX Package Explorers der IDTA. Damit liegen die an der Wertschöpfungskette beteiligten und innerhalb der Systemgrenzen befindlichen Produkte, Prozesse und Ressourcen gemäß der Ökobilanz in Form von AAS vor. Diese werden insofern verknüpft, als dass eine Beziehungsmodellierung in den entsprechenden AAS gemäß der Prozesshierarchie stattfindet. Durch das Hosten der erstellten .aasx-Dateien auf dem AASX Server werden die Typ1 AAS definitionsgemäß zu Typ 2 AAS und sind damit für externe Anwendungen über die API des Servers zugänglich.

Anschließend wird die Leistungsaufnahme der Bandsäge während des Bandsägeprozesses am realen Bauteil gemessen und automatisiert in einer Datenbank hinterlegt. Diese Leistungsdaten werden mittels Python Skript abgefragt und mittels einer Integrationsoperation über die Zeit in Energiedaten zu umgewandelt. Diese Energiedaten werden in dem DPssP des Bandsägeprozesses hinterlegt.

Weitere für die Berechnung des CO₂-Fußabdrucks notwendigen Daten werden entweder der Literatur und frei verfügbaren Datenbanken als Sekundärdaten entnommen oder auf Basis dessen gemäß der am Gesamtprozess beteiligten Produkte, Prozesse und Ressourcen abgeschätzt. Diese Daten werden in den entsprechenden AAS hinterlegt.

Zur Berechnung des CO₂-Fußabdrucks ist die Entwicklung einer Berechnungslogik in einer externen Umgebung notwendig, da das AAS Framework keine Mechanismen zur Durchführung von Operationen beinhaltet. Diese Logik wird in Node-RED erstellt. Via HTTP Get werden die Daten aus den AAS am AASX Server in Node-RED eingelesen und gemäß der erstellten Berechnungslogik verarbeitet. Die Ergebnisse der Berechnung werden den entsprechenden Submodellelementen der AAS via HTTP Put zugefügt und werden visuell am AASX Server dargestellt. Damit gilt der CO₂-Fußabdruck des Kunststoffbauteils als berechnet und ist in der AAS des Produkts, welche wie beschrieben als DPP des Produkts verwendet wird, vermerkt.

Die mit der verwendeten Version des AASX Package Explorers (2024-02-27.alpha) erstellten AAS als .aasx-Dateien sind mit der verwendeten Version des AASX Servers (v.0.3.1.86) kompatibel. Bei der Verwendung von weiteren Versionen der beiden Programme ist diese Kompatibilität nur teilweise bzw. gar nicht gegeben. Möglicherweise ist die Erstellung und das Hosten der AAS mit anderen Tools vorteilhaft, im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nicht darauf eingegangen.

Die verwendeten Methoden zur Modellierung der Beziehungen zwischen den AAS sind zum derzeitigen Zeitpunkt nicht einheitlich und intuitiv. Auf der Website der IDTA, im Bereich der Submodellvorlagen, wird angegeben, dass sich derzeit eine spezifische Submodellvorlage für die Erstellung von Prozesshierarchien, genannt „Bill of Process“, in Entwicklung befindet. Beschrieben wird diese insofern, als dass alle notwendigen und grundlegenden Informationen für eine digitale Prozessbeschreibung im Bereich der Produktion in diesem Submodell bereitgestellt werden sollen [58]. Damit kann davon ausgegangen werden, dass die in dieser Arbeit getätigte Umgehungslösung zur Modellierung der Prozesshierarchie zukünftig nicht mehr notwendig sein wird.

Um genauere Ergebnisse zu errechnen, ist es notwendig, dass auch der Fräs- und der Spritzgussprozess durch konkrete Energiemessungen erfasst werden. Dies ermöglicht es, ausschließlich auf primäre Prozessdaten zurückzugreifen und die Berechnungen zum CO₂-Fußabdruck weiter zu präzisieren. Durch diese Datenerhebung kann die Verwendung von sekundäre Datenquellen vermieden und die Genauigkeit der Analyse entlang der gesamten Wertschöpfungskette verbessert werden. Weiters kann die gesamte Ökobilanz noch um die Faktoren Kühl- und Schmierstoff sowie Pneumatik für die spanenden Fertigungsprozesse erweitert werden. Durch die modulare Natur von

Node-RED kann die Berechnung entsprechend weiteren Anforderungen erweitert werden.

Die Ergebnisse der Datenbankabfrage hinsichtlich der Primärdaten werden manuell in dem DPssP des Sägeprozesses hinterlegt. Automatisierte Lösungen zur Datenbankabfrage auf Basis von Ereignissen wie erhöhter Leistungsaufnahme der Maschine könnten eine nahtlose Integration der Daten aus den Datenbanken ermöglichen.

Nach dem Ausführen der Berechnung gemäß der einwickelten Berechnungslogik entlang der Wertschöpfungskette in Node-RED wird der berechnete CO₂-Fußabdruck in der AAS des Kunststoffteils hinterlegt und kann im Submodell „Carbon Footprint“ am AASX Server eingesehen werden. Die Darstellung der Ergebnisse direkt im AASX Package Explorer ist zum derzeitigen Stand nicht möglich. Wie in 5.2.8 beschrieben, ist der Kommunikationsaufbau zwischen den beiden Programmen in den verwendeten Versionen nicht möglich.

Zusammengefasst ist anzumerken, dass die Modellierung von Produkten, Ressourcen und Prozessen entlang der Wertschöpfungskette als Aas für eine Verwendung als DPP und DPssP eine entscheidende Rolle bei der Berechnung des CO₂-Fußabdrucks entlang einer Wertschöpfungskette spielen kann. Dies ist dann möglich, wenn Lieferanten von Ressourcen und Produkten, wie Rohstoffen, Halbzeugen und Maschinen, den DPP ebenfalls in Form von AAS bereitstellen. Die AAS und damit der DPP wird genauso wie die physische Ressource an den Käufer bzw. Verarbeiter übergeben. Jede dieser AAS stellt die Informationen bereit, welche notwendig sind, um nach weiterführenden Prozessen, den CO₂-Fußabdruck des Endprodukts zu ermitteln. Die Interoperabilität der AAS und der damit einhergehenden Daten erlauben somit eine simple, automatisierbare und nachvollziehbare Berechnung, welche direkt in der AAS des Endprodukts, welche als dessen DPP fungiert, hinterlegt werden kann. Die Datenerhebung der durchgeführten Prozesse und die damit verbundene Erstellung einer AAS, welche als DPssP fungiert, obliegt dem Verarbeiter.

8 Literaturverzeichnis

- [1] C. Plociennik *u. a.*, „Connecting Producers and Recyclers: A Digital Product Passport Concept and Implementation Suitable for End-of-Life Management“, *Procedia CIRP*, Bd. 122, S. 831–836, 2024, doi: 10.1016/j.procir.2024.02.026.
- [2] S. Alt, V. Schorr, N. Kamenev, und D. Werth, „Digitaler Prozesspass: Auftragsgenaue Ermittlung des Ressourcenverbrauchs“, *Inform. Spektrum*, Bd. 46, Nr. 3, S. 155–162, Juni 2023, doi: 10.1007/s00287-023-01540-0.
- [3] S. Alt, V. Schorr, A. Vocke, und D. Werth, „Status and Future of Real-Life Application of the Digital Process Passport in Germany“, *Circ. Econ. Sustain.*, Bd. 3, Nr. 4, S. 2255–2266, Dez. 2023, doi: 10.1007/s43615-023-00275-0.
- [4] Europäische Union, *Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG Text von Bedeutung für den EWR*. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX:32024R1781>
- [5] J. Walden, A. Steinbrecher, und M. Marinkovic, „Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy“, *Chem. Ing. Tech.*, Bd. 93, Nr. 11, S. 1717–1727, Nov. 2021, doi: 10.1002/cite.202100121.
- [6] „Kreislaufwirtschaft: Digitaler EU-Produktpass für Batterien“, Fraunhofer. Zugegriffen: 14. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2024/april-2024/kreislaufwirtschaft-digitaler-eu-produktpass-fuer-batterien.html>
- [7] T. Pellegrini *u. a.*, „DPP4ALL – A Digital Product Passport for All“, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, Okt. 2023.
- [8] F. Psarommatis und G. May, „Digital Product Passport: A Pathway to Circularity and Sustainability in Modern Manufacturing“, *Sustainability*, Bd. 16, Nr. 1, S. 396, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16010396.
- [9] S. Ajdinović, M. Strlijic, A. Lechler, und O. Riedel, „Interoperable Digital Product Passports: An Event-Based Approach to Aggregate Production Data to Improve Sustainability and Transparency in the Manufacturing Industry“, in *2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, Ha Long, Vietnam: IEEE, Jan. 2024, S. 729–734. doi: 10.1109/SII58957.2024.10417487.
- [10] *ISO 14067:2018 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification*, Schweiz., August 2018.
- [11] *DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020*, Berlin., 2021. doi: 10.31030/3179655.
- [12] Plattform Industrie 4.0, „The Asset Administration Shell: Implementing digital twins for use in Industrie 4.0“. Zugegriffen: 20. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/VWSiD%20V2.0.pdf?__blob=publicationFile&v=1

- [13] M. Hoffmeister, „Die Industrie 4.0-Komponente“, Zugegriffen: 15. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2015/april/Die_Industrie_4.0-Komponente/Faktenblatt-Die-Industrie-4_0-Komponente.pdf
- [14] Industrial Digital Twin Association, „Asset Administration Shell Specification - Part 1: Metamodel“. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://industrialdigitaltwin.org/en/wp-content/uploads/sites/2/2024/06/IDTA-01001-3-0-1_SpecificationAssetAdministrationShell_Part1_Metamodel.pdf
- [15] X. Ye, S. H. Hong, W. S. Song, Y. C. Kim, und X. Zhang, „An Industry 4.0 Asset Administration Shell-Enabled Digital Solution for Robot-Based Manufacturing Systems“, *IEEE Access*, Bd. 9, S. 154448–154459, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3128580.
- [16] M. Jacoby, F. Volz, C. Weisenbacher, und J. Muller, „FA³ ST Service – An Open Source Implementation of the Reactive Asset Administration Shell“, in *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Stuttgart, Germany: IEEE, Sep. 2022, S. 1–8. doi: 10.1109/ETFA52439.2022.9921584.
- [17] E. Sølvsberg, C. D. Øien, S. Dransfeld, R. J. Eleftheriadis, und O. Myklebust, „Analysis-oriented structure for runtime data in Industry 4.0 asset administration shells“, *Procedia Manuf.*, Bd. 51, S. 1106–1110, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.155.
- [18] T. Götz, T. Adisorn, und L. Tholen, „Der Digitale Produktpass als Politik-Konzept: Kurzstudie im Rahmen der Umweltpolitischen Digitalagenda des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)“, Wuppertal Institut, 21, 2021. doi: 10.48506/OPUS-7694.
- [19] C. Plociennik u. a., „Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy“, *Procedia CIRP*, Bd. 105, S. 122–127, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.021.
- [20] M. Pourjafarian u. a., „A Multi-Stakeholder Digital Product Passport Based on the Asset Administration Shell“, in *2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Sinaia, Romania: IEEE, Sep. 2023, S. 1–8. doi: 10.1109/ETFA54631.2023.10275715.
- [21] J. Reinschmidt, S. Grüner, A. Orzelski, und K. Garrels, „DPP 4.0: An Architecture Proposal for a DPP- System to implement the EU Digital Product Passport for Industrial Products“, Dez. 2023, Zugegriffen: 5. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Themen/Industrie/Fachverband_Automati on/2023-12_Discussion_Paper_DPP4.0_Architecture_v1.1.pdf
- [22] A. Neligan, C. Schleicher, B. Engels, und T. Kroke, „Digitaler Produktpass - Enabler der Circular Economy: Relevanz und Umsetzbarkeit durch Unternehmen“, Berlin/Köln, 47/2023, 2023.
- [23] D. Werth und S. Alt, „Digitaler Produktpass - Ein prozessbezogener CO₂-Ausweis für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft“, IM+io. Zugegriffen: 18. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.im-io.de/der-digitale-produktpass/>
- [24] ZVEI e. V. Electro and Digital Industry Association, „Implementing Level 2 of the ZVEI-Show-Case PCF@Control Cabinet“. 14. April 2023. Zugegriffen: 8. April 2024.

- [Online]. Verfügbar unter:
https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Themen/Industrie/PCF%40ControlCabine/White-Paper_Implementing-Level-2-of-the-ZVEI-Show-Case.pdf
- [25] A. Al Assadi, L. Waltersmann, R. Miehe, M. Fechter, und A. Sauer, „Automated Environmental Impact Assessment (EIA) via Asset Administration Shell“, in *Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application*, P. Weißgraeber, F. Heieck, und C. Ackermann, Hrsg., in ARENA2036., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, S. 45–52. doi: 10.1007/978-3-662-62962-8_6.
- [26] „Eclipse AASX Package Explorer“, Eclipse AASX Package Explorer. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/eclipse-aaspe/package-explorer>
- [27] „Eclipse AASX Server“, Eclipse AASX Server. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/eclipse-aaspe/server>
- [28] Industrial Digital Twin Association, „IDTA 01002-3-0-2 SpecificationAssetAdministrationShell Part2 API“. Juni 2024.
- [29] M. Arvana, N. Freitas, A. D. Rocha, und J. Barata, „Asset Administration Shell Approach for Modular and Configurable Internet of Things Devices“, in *Navigating Unpredictability: Collaborative Networks in Non-linear Worlds*, Bd. 726, L. M. Camarinha-Matos, A. Ortiz, X. Boucher, und A.-M. Barthe-Delanoë, Hrsg., in IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 726., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, S. 224–239. doi: 10.1007/978-3-031-71739-0_15.
- [30] „Node-RED“. Zugegriffen: 2. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://nodered.org/>
- [31] M. Schleipen, A. Lüder, O. Sauer, H. Flatt, und J. Jasperneite, „Requirements and concept for Plug-and-Work: Adaptivity in the context of Industry 4.0“, - *Autom.*, Bd. 63, Nr. 10, S. 801–820, Okt. 2015, doi: 10.1515/auto-2015-0015.
- [32] A. F. Cutting-Decelle, R. I. M. Young, J. J. Michel, R. Grangel, J. Le Cardinal, und J. P. Bourey, „ISO 15531 MANDATE: A Product-process-resource based Approach for Managing Modularity in Production Management“, *Concurr. Eng.*, Bd. 15, Nr. 2, S. 217–235, Juni 2007, doi: 10.1177/1063293X07079329.
- [33] J. Pfrommer, M. Schleipen, und J. Beyerer, „PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource“, in *2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, Cagliari, Italy: IEEE, Sep. 2013, S. 1–4. doi: 10.1109/ETFA.2013.6648114.
- [34] *ISO 10303-2:2024(en) Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 2: Vocabulary*, 2024.
- [35] T. Trautner, R. Gerstbauer, L. Harutyunyan, N. Loidolt, S. Dumss, und F. Bleicher, „An Auditable PPR Framework for the Digital Product Passport using AAS-based Process Passports“, in *TWIN TRANSITION IN MANUFACTURING*, Wien, 2024, S. 68. doi: 10.5281/zenodo.1388634.
- [36] Verein Deutscher Ingenieure e.V., Hrsg., „VDI/VDE 2206 - Entwicklung cyber-physischer mechatronischer Systeme (CPMS)“. Beuth Verlag, September 2020.
- [37] I. Graessler und J. Hentze, „The new V-Model of VDI 2206 and its validation“, - *Autom.*, Bd. 68, Nr. 5, S. 312–324, Mai 2020, doi: 10.1515/auto-2020-0015.

- [38] ISO 14955-1:2017 *Machine tools - Environmental evaluation of machine tools: Design methodology for energy-efficient machine tools*, London. doi: 10.3403/30333287.
- [39] „IDTA Submodel templates“, IDTA Submodel templates. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/admin-shell-io/submodel-templates>
- [40] Industrial Digital Twin Association e. V., „IDTA-02006-2-0 Submodel Digital-Nameplate“. 2022. Zugegriffen: 16. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/admin-shell-io/submodel-templates/blob/main/published/Digital%20nameplate/2/0/IDTA%2002006-2-0_Submodel_Digital%20Nameplate.pdf
- [41] Industrial Digital Twin Association e. V., „IDTA-02003-1-2 Submodel TechnicalData“. 2022. Zugegriffen: 16. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/admin-shell-io/submodel-templates/blob/main/published/Technical_Data/1/2/IDTA%2002003-1-2_Submodel_TechnicalData.pdf
- [42] Industrial Digital Twin Association e. V., „IDTA-2023-0-9- Submodel CarbonFootprint“. 2023. Zugegriffen: 16. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/admin-shell-io/submodel-templates/blob/main/published/Carbon%20Footprint/0/9/IDTA%202023-0-9%20_Submodel_CarbonFootprint.pdf
- [43] Industrial Digital Twin Association e. V., „IDTA 02011-1-0 Submodel HierarchicalStructuresEnablingBoM“. 2024. Zugegriffen: 16. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/admin-shell-io/submodel-templates/blob/main/published/Hierarchical%20Structures%20enabling%20Bills%20of%20Material/1/1/IDTA%2002011-1-1_Submodel_HierarchicalStructuresEnablingBoM.pdf
- [44] Industrial Digital Twin Association e. V., „IDTA 02008-1-1 Submodel TimeSeriesData“. 2023. Zugegriffen: 16. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/admin-shell-io/submodel-templates/blob/main/published/Time%20Series%20Data/1/1/IDTA%2002008-1-1_Submodel_TimeSeriesData.pdf
- [45] „Relationships between I4.0 Components – Composite Components and Smart Production“. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi).
- [46] N. Diaz, M. Helu, S. Jayanathan, Yifen Chen, A. Horvath, und D. Dornfeld, „Environmental analysis of milling machine tool use in various manufacturing environments“, in *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*, Arlington, VA, USA: IEEE, Mai 2010, S. 1–6. doi: 10.1109/ISSST.2010.5507763.
- [47] Ember, „Carbon intensity of the power sector in Germany from 2000 to 2023 (in grams of CO₂ per kilowatt-hour) [Graph]“, Statista. Zugegriffen: 5. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/1290224/carbon-intensity-power-sector-germany/>
- [48] B. Agarski, I. Budak, M. I. Micunovic, und D. Vukelic, „Life cycle assessment of injection moulding tools and multicomponent plastic cap production“, *J. Clean. Prod.*, Bd. 413, S. 137450, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137450.

- [49] Ember, „Carbon intensity of the power sector in Austria from 2000 to 2023 (in grams of CO₂ per kilowatt-hour) [Graph]“, Statista. Zugegriffen: 5. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statista.com/statistics/1289218/carbon-intensity-power-sector-austria/>
- [50] „Idemat 2024“. Online, 2024. Zugegriffen: 15. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ecocostsvalue.com/data-tools-books/download-of-databases/>
- [51] Stauber GmbH Metalltechnologie, „Stahlgruppen-Werkstoff-Tabelle“. Zugegriffen: 4. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stauberstahl.com/fileadmin/landingpage/werkstoffuebersicht/Stahlgruppen-Werkstoff-Tabelle.pdf>
- [52] Stauber GmbH Metalltechnologie, „Werkstoff-1.2842-Datenblatt“. Zugegriffen: 4. Juli 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stauberstahl.com/fileadmin/Downloads/werkstoffe/Werkstoff-1.2842-Datenblatt.pdf>
- [53] N. Kashyap, R. A. Rahman Rashid, und N. Khanna, „Carbon emissions, techno-economic and machinability assessments to achieve sustainability in drilling Ti6Al4V ELI for medical industry applications“, *Sustain. Mater. Technol.*, Bd. 33, S. e00458, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.susmat.2022.e00458.
- [54] M. Alauddin, M. A. El Baradie, und M. S. J. Hashmi, „Prediction of tool life in end milling by response surface methodology“, *J. Mater. Process. Technol.*, Bd. 71, Nr. 3, S. 456–465, Nov. 1997, doi: 10.1016/S0924-0136(97)00111-8.
- [55] G. Campatelli, L. Lorenzini, und A. Scippa, „Optimization of process parameters using a Response Surface Method for minimizing power consumption in the milling of carbon steel“, *J. Clean. Prod.*, Bd. 66, S. 309–316, März 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.10.025.
- [56] R. Huang *u. a.*, „Environmental and Economic Implications of Distributed Additive Manufacturing: The Case of Injection Mold Tooling“, *J. Ind. Ecol.*, Bd. 21, Nr. S1, Nov. 2017, doi: 10.1111/jiec.12641.
- [57] A. Thiriez und T. Gutowski, „An Environmental Analysis of Injection Molding“, in *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006.*, Scottsdale, AZ, USA: IEEE, 2006, S. 195–200. doi: 10.1109/ISEE.2006.1650060.
- [58] „AAS Submodel Templates“. Zugegriffen: 17. September 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://industrialdigitaltwin.org/en/content-hub/submodels>

9 Abbildungsverzeichnis

<i>Abb. 1: Aufbau einer Asset Administration Shell</i>	13
<i>Abb. 2: Unterschiedliche Typen der Asset Administration Shell aus Jacoby et al. [16]</i>	14
<i>Abb. 3: Digitaler Produktpass mittels Asset Administration Shell: Auswahl der Submodelle gemäß Neligan et al. [22]</i>	17
<i>Abb. 4: Produkt-Prozess-Ressource Konzeptmodell aus Schleipen et al. [31]</i>	22
<i>Abb. 5: Methodische Vorgangsweise in Anlehnung an das V-Model VDI/VDE 2206</i>	25
<i>Abb. 6: Visualisierung der drei Betrachtungsebenen am Beispiel des Teilprozesses Bandsägen</i>	28
<i>Abb. 7: Kunststoffbauteil Prüfstäbe und Inlay des Spritzgusswerkzeugs</i>	29
<i>Abb. 8: Eingesetzte Maschinen von links nach rechts: Behringer HBE321A, Präzoplan 300, Engel ES 600 / 100 HL SEL</i>	29
<i>Abb. 9: Systemgrenze gemäß DIN EN ISO 14040:2021-02 [11] visualisiert in Anlehnung an ISO 14955-1:2017 [37]</i>	32
<i>Abb. 10: Asset Administration Shell basierte Darstellung der Wertschöpfungskette im Kontext der Produkt-Prozess-Ressource-Modellierung</i>	33
<i>Abb. 11: Darstellung der Schnittmetall Asset Administration Shell inklusive der vier Submodelle im AASX Package Explorer</i>	35
<i>Abb. 12: Darstellung der Sägeprozess Asset Administration Shell inklusive der vier Submodelle im AASX Package Explorer</i>	37
<i>Abb. 13: Grafische Darstellung der Beziehungen im Submodell „Hierarchial Structures“ der Asset Administration Shell „Schnittmetall“ (engl. „CutMetal“) mit dem AASX Package Explorer</i>	41
<i>Abb. 14: Asset Administration Shell „Schnittmetall“ im AASX Package Explorer: Submodell Hierarchial Structures</i>	41
<i>Abb. 15: Darstellung der Beziehungen der Asset Administration Shell des Sägeprozesses mittels Produkt-Prozess-Ressource-Modell</i>	42
<i>Abb. 16: Asset Administration Shell „Sägeprozess“ im AASX Package Explorer: Submodell AAS Relationships</i>	43
<i>Abb. 17: Browserbasierte Bedienoberfläche des AASX Servers</i>	44
<i>Abb. 18: Visualisierung der Datenverarbeitung</i>	46
<i>Abb. 19: Grafische Ausgabe der Leistungsdaten der Behringer Bandsäge während des Sägeprozesses</i>	47

<i>Abb. 20: Beispielhafte Berechnung des CO₂ Äquivalents des Energieverbrauchs des Sägeprozesses mittels Node-RED</i>	54
<i>Abb. 21: Sankey-Diagramm der Zusammensetzung der CO₂-Fußabdrücke</i>	60
<i>Abb. 22: Kreisdiagramm der prozentualen Anteile am CO₂e des Inlays</i>	61
<i>Abb. 23: Kreisdiagramm der prozentualen Anteile am CO₂e des Kunststoffbauteils</i> .62	
<i>Abb. 24: CO₂-Fußabdruck des Kunststoffteils am AASX Server vor dem Ausführen der Node-RED Berechnung</i>	64
<i>Abb. 25: CO₂-Fußabdruck des Kunststoffteils am AASX Server nach dem Ausführen der Node-RED Berechnung</i>	64

10 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 Ergebnisse der Datenauswertung Energieverbrauch Bandsägeprozess aus Python Skript</i>	48
<i>Tabelle 2: Verwendete Daten zur Berechnung der CO₂e der über die Wertschöpfungskette hinweg inklusive Beschreibung und Quelle</i>	49
<i>Tabelle 3: Beschreibung/Funktion der einzelnen Node-RED Knoten im Kontext des Beispiels in Abb. 20</i>	53
<i>Tabelle 4: Berechnungslogik der CO₂-Äquivalente</i>	56

Anhang

Anhang A – Ergebnisse aus der Berechnungslogik in tabellarischer Form

CO ₂ e	Berechnungslogik	CO ₂ e in kg
Sägeprozess		
Energieverbrauch Sägeprozess	Siehe 5.3.1, Produkt aus Intensität der Energieerzeugung und Energieverbrauch beim Sägeprozess für ein Stück.	0,0034609
Anteilige Abnutzung Bandsäge	Produkt aus CO ₂ e Bandsäge und Dauer Bandsägeprozess pro Stück dividiert durch Lebensdauer Bandsäge.	0,0067666
Anteilige Abnutzung Bandsägeblatt	Produkt aus CO ₂ e Bandsägeblatt und Dauer Bandsägeprozess pro Stück dividiert durch Lebensdauer Bandsägeblatt.	0,0019487
Spanabtrag	Differenz zwischen Masse Werkzeugstahl und aller Schnittmetalle (6 Stück). Das Ergebnis daraus wird nachfolgend dividiert durch die Anzahl der Stück und multipliziert mit dem CO ₂ e Werkzeugstahl.	0,0216060
Materialanteil Werkzeugstahl	Produkt aus Masse des Schnittmetalls und dem spezifischen CO ₂ e des Werkzeugstahls.	1,3600970
Schnittmetall	Summe aus den fünf darüber genannten CO ₂ e aus dem Sägeprozess	1,3938800
Fräsprozess		
Energieverbrauch Fräsprozess	Berechnung des Volumens des Spanabtrags mittels Differenz zwischen Masse Schnittmetall und Masse Inlay sowie der Dichte des Werkzeugstahls. Volumen des Spanabtrags multipliziert mit spezifischen Energieverbrauch Fräsen und Intensität der Energieerzeugung.	0,1221500
Anteilige Abnutzung Fräsmaschine	Produkt aus CO ₂ e Fräsmaschine und Dauer Fräsprozess dividiert durch Lebensdauer Fräsmaschine.	0,1555587

Anteilige Abnutzung Fräswerkzeug	Produkt aus CO _{2e} Fräswerkzeug und Dauer Fräsprozess dividiert durch Lebensdauer Fräswerkzeug.	0,0760152
Spanabtrag	Differenz zwischen Masse Schnittmetall und Masse Inlay. Nachfolgend multipliziert mit CO _{2e} Werkzeugstahl.	1,0726700
Materialanteil Werkzeugstahl	Produkt aus Masse des Inlays und dem spezifischen CO _{2e} des Werkzeugstahls.	0,2874200
Inlay	Summe aus den fünf darüber genannten CO _{2e} aus dem Fräsprozess und den CO _{2e} aus dem Sägeprozess exklusive dem Materialanteil aus dem Sägeprozess	1,7476320

Spritzgussprozess

Energieverbrauch Spritzgussprozess	Produkt aus spezifischen Energieverbrauch Spritzgießen, Intensität der Energieerzeugung und Masse Kunststoffteil	0,0046935
Anteilige Abnutzung Spritzgussmaschine	Produkt aus CO _{2e} Spritzgussmaschine und Zykluszeit Spritzgussprozess dividiert durch Lebensdauer Spritzgussmaschine.	0,0055530
Anteilige Abnutzung Temperiergerät	Produkt aus CO _{2e} Temperiergerät und Zykluszeit Spritzgussprozess dividiert durch Lebensdauer Temperiergerät.	0,0000553
Anteilige Abnutzung Spritzgusswerkzeug	CO _{2e} Spritzgusswerkzeug dividiert durch Lebensdauer Spritzgusswerkzeug (Berechnungsbasis Schuss).	0,0000553
Anteilige Abnutzung Inlay	CO _{2e} Inlay dividiert durch Lebensdauer Inlay (Berechnungsbasis Schuss).	0,0000081
Materialanteil Kunststoffteil	Produkt aus Masse des Kunststoffteils und dem spezifischen CO _{2e} des Kunststoffes.	0,0897816
Kunststoffteil	Summe aus den sechs darüber genannten CO _{2e} aus dem Spritzgussprozess.	0,1001480