



Technische
Universität
Braunschweig



INSTITUT FÜR
KONSTRUKTIONSTECHNIK

Entwicklung eines ontologie-basierten Kostenmodells für Produktneuentwicklungen

Masterarbeit

Anna Johanna Duden

Matr.-Nr.: 4574002

Dezember 2021

(erstellt in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),
Institut für Datenwissenschaften)

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Anna Johanna Duden, durch meine Unterschrift, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel "Entwicklung eines ontologie-basierten Kostenmodells für Produktneuentwicklungen" selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Insbesondere sind auch solche Inhalte gekennzeichnet, die von betreuenden wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Konstruktionstechnik eingebracht wurden.

Die Arbeit oder Auszüge daraus haben noch nicht in gleicher oder ähnlicher Form dieser oder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ich versichere außerdem, dass die zur Plagiatsprüfung hochgeladene Version meiner Arbeit mit der hier eingereichten, gebundenen Version identisch ist.

Mir ist bewusst, dass eine inhaltliche Abweichung beider Versionen (mit Ausnahme der evtl. Anonymisierung meines Namens bzw. meiner Matrikelnummer) bzw. Verstöße gegen die Grundsätze der Selbstständigkeit als Täuschung betrachtet und entsprechend der Prüfungsordnung geahndet werden.

Datum, Unterschrift

Inhaltsangabe

Mit der vorliegenden Masterarbeit wird die Kosten- und Zeitermittlung eines Neuproduktes in der Entwicklungsphase betrachtet. Dabei liegt der Fokus auf den Fertigungskosten und -zeiten, auf den Komponenten eines Produktes sowie bei der Einzelfertigung. In diesem Kontext wird ein Kostenmodell entwickelt. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass es die Produktinformationen aus einem Wissensgraphen bezieht. Das Modell selbst entspricht einem integrierten Ansatz im Sinne der Kombination einer intuitiven und analogischen Methode. Dabei ist eine analytische Methode indirekt durch die Berücksichtigung der Kosten- und Zeitstruktur integriert. Folglich wird im ersten Teil des Kostenmodells das neuentwickelte Bauteil mit bereits gefertigten Bauteilen verglichen. Im zweiten Teil werden sowohl für das neue Bauteile als auch für die ähnlichsten Bauteile, die im ersten Teil definiert worden sind, die Kosten und Zeiten mithilfe einer Regressionsmethode ermittelt. Im letzten und dritten Teil werden mithilfe eines Korrekturfaktors die Ergebnisse des zweiten Teils entsprechend der Genauigkeit der Regressionsmethode für die ähnlichsten Bauteile angepasst. Das entwickelte Kostenmodell wird mithilfe eines Testdatensatzes evaluiert. Dabei kann die entwickelte Methode gute Ergebnisse erzielen.

Abstract

This thesis examines cost and time estimations of a new developed product in the design phase. The production cost and time, as well as, the components of the product for single production, are targeted. Therefore, a cost model is developed and investigated. Product information as part of a knowledge graph is used. The model is of an integrated nature and utilizes intuitive and analogical methods. Besides, the model includes cost and time structure of a product and thus, an analytical approach. In the beginning, the model compares the new component with previous ones and defines similar components. In the second part, production cost and time of the new component are estimated by defined component features. The estimation is implemented by a regression method and is also done for the similar components. In the last and third part, the results of the second part for the new component are calculated by a correction factor, which includes the precision of estimation results for the similar components. Finally, the developed cost model is evaluated by a test dataset. The evaluation results in a good performance for the introduced method.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Selbstständigkeitserklärung | iii |
| Inhaltsangabe | iv |
| Abstract | v |
| Abkürzungsverzeichnis | viii |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Ausgangslage und Problemstellung | 1 |
| 1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise | 2 |
| 2. Theoretische Grundlagen | 3 |
| 2.1. Kosten- und Zeitbeeinflussung in der Produktentwicklung | 3 |
| 2.1.1. Struktur der fertigungsbezogenen Zeiten | 4 |
| 2.1.2. Struktur der fertigungsbezogenen Kosten | 7 |
| 2.1.3. Kostenmanagement in der Produktentwicklung | 11 |
| 2.2. Grundelemente einer Ontologie | 15 |
| 2.3. Maschinelles Lernen und Data Mining | 16 |
| 3. Stand der Technik | 18 |
| 3.1. Herausforderungen und Trends in der Entwicklungsphase | 18 |
| 3.2. Methoden der Ähnlichkeitsbestimmung von Bauteilen | 19 |
| 3.3. Ansätze und Methoden der frühzeitigen Kostenermittlung | 20 |
| 3.4. Ansätze und Methoden der frühzeitigen Zeitermittlung | 24 |
| 4. Konzeptionelle Gestaltung | 25 |
| 4.1. Aufbau des bestehenden Wissensgraphen | 25 |
| 4.2. Entwicklung einer Methodik | 26 |
| 4.2.1. Anforderungen und Rahmenbedingungen | 27 |
| 4.2.2. Eingrenzungen der Konzeptmöglichkeiten | 28 |
| 4.2.3. Bewertung und Auswahl eines Konzeptes | 31 |
| 4.3. Ausarbeitung der Konzeptbestandteile | 35 |
| 4.3.1. Festlegung eines Ähnlichkeitsmaßes | 35 |
| 4.3.2. Festlegung einer Regressionsmethode | 38 |
| 5. Implementierung | 41 |
| 5.1. Aufbau der Ontologie ManOnPerformance | 41 |
| 5.2. Programmierung des Algorithmus | 44 |
| 5.2.1. Allgemeine Funktionsweise | 44 |
| 5.2.2. Funktionsweise der Ähnlichkeitsanalyse | 47 |
| 5.2.3. Funktionsweise der Prozessanalyse | 51 |
| 5.2.4. Zusammenführung der Ähnlichkeits- und Prozessanalyse | 54 |
| 5.3. Ausführung des Algorithmus anhand von Testdaten | 55 |
| 6. Kritische Diskussion | 61 |

| | |
|---|------------|
| 7. Zusammenfassung und Ausblick | 64 |
| Literaturverzeichnis | I |
| Abbildungsverzeichnis | V |
| Tabellenverzeichnis | VI |
| Anhang | VII |
| A. Klassifizierung der Literaturanalyse | VII |
| B. Szenarienbetrachtung zur Auswahl einer Distanzmetrik | XI |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|--|
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| DLZ | Durchlaufzeit |
| DM | Data Mining |
| DPKidK | Digitale Prozessketten in der Konstruktion |
| EKK | Entwicklungs- und Konstruktionskosten |
| FGK | Fertigungsgemeinkosten |
| FK | Fertigungskosten |
| FLK | Fertigungslohnkosten |
| HK | Herstellkosten |
| ManOn | Manufacturing Technology Capabilities Ontology |
| MEK | Materialeinzelkosten |
| MF | ManOn:ManufacturingFeature |
| MGK | Materialgemeinkosten |
| MK | Materialkosten |
| ML | Maschinelle Lernen |
| OLS | Ordinary Least Square |
| SEF | Sondereinzelkosten der Fertigung |
| SEV | Sondereinzelkosten des Vertriebs |
| VVGK | Vertriebs- und Verwaltungsgemeinkosten |
| VVK | Vertriebs- und Verwaltungskosten |

1. Einleitung

Im Folgenden wird mit Kapitel 1.1 einleitend auf die Ausgangslage der Arbeit eingegangen. Daneben wird mit Kapitel 1.2 die Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit erläutert.

1.1. Ausgangslage und Problemstellung

Der vermehrte Ausbau der globalen Wirtschaft führt zu einem signifikanten Anstieg des Konkurrenzkampfes. Die daraus resultierenden Herausforderungen werden mit der VUCA-Welt beschrieben. Demnach herrschen volatility (Unbeständigkeit), uncertainty (Unsicherheit), complexity (Komplexität) und ambiguity (Mehrdeutigkeit). (vgl. Mack und Khare)

Die Unternehmen müssen ihre Geschäftsmodelle dem aktuellen Geschehen anpassen. Ein erforderliches Umdenken wird neben der steigenden Vernetzung ebenfalls anhand der Digitalisierung und der aktuellen Covid-19-Pandemie deutlich. Dabei ist die Digitalisierung vor allem ein Hilfsmittel um als Unternehmen konkurrenzfähig zu bleiben.

Für die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens sind die Kosten und die Gewinnerzielung von Bedeutung. Daneben werden Lieferzeiten ebenfalls zunehmend relevanter. Beispielsweise wird durch die Vernetzung und die Komplexität von Zulieferketten eine Liefergenauigkeit vorausgesetzt.

Der kosten- und zeitbezogene Anteil der Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens ist in dieser Arbeit im Fokus. Dabei wird die Raumfahrtindustrie betrachtet. Sie unterscheidet sich von anderen Industrien unter anderem durch eine verringerte Marktgröße. Der Anstieg an privaten Marktteilnehmern wie SpaceX von Elon Musk und auch das zunehmende Interesse an Raumfahrttourismus zeigt, dass auch diese Industrie zunehmend von der VUCA-Welt betroffen ist.

Die raumfahrttechnische Produkte unterscheiden sich gegenüber anderer Industrien vor allem durch ihre Individualität bzw. ihre Alleinstellungsmerkmale und die deutlichen Projekt- bzw. Entwicklungslaufzeiten. Die frühzeitige Auskunft über Produktkosten und die Einhaltung eines gewünschten Lieferzeitraumes werden somit nicht nur zunehmend relevant sondern auch marktentscheidend.

Das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) führt mit der Technischen Universität Ilmenau das Kooperationsprojekt Digitale Prozessketten in der Konstruktion (DPKidK) durch, um den Ansatz einer ontologie-basierten Produktionsplattform auf die Produktentwicklung von Raumfahrzeugen zu untersuchen. Dabei steht insbesondere die frühzeitige Ableitung relevanter Entscheidungen ausgehend von der Entwicklungs- und Konstruktionsphase eines Produktes im Fokus. Die vorliegende Arbeit ist hinsichtlich einer Kosten- und Zeitermittlung Teil dieses Projektes.

Die frühzeitige Kosten- und Zeitermittlung ist keine neuartige Problematik. Dennoch bestehen neben vielseitiger und individueller Ansätze keine idealen Lösungen. In der Industrie sind demnach Expertenmeinungen immer noch essentiell. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020)

Die Digitalisierung und die daraus resultierenden neuartigen Möglichkeiten geben neue Perspektiven auf die Bewältigung der Problematik der frühzeitigen Ermittlung. Insbesondere der verringerte Aufwand und die erhöhte Genauigkeit aufgrund einer Automatisierung sind Vorteile, die aus einer digitalen Lösung hervorgehen können. In Bezug zu den dargelegten Marktzusammenhängen, kann eine Lösung zudem als marktrelevant angesehen werden.

1.2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Dieser Arbeit liegen grundlegende Produktinformationen, die ontologie-basiert in einem Wissensgraphen abgelegt sind, zugrunde. Folglich ist es das Ziel dieser Arbeit einen Algorithmus zu entwerfen, der die produktbezogenen Kosten und Zeiten auf Basis eines Wissensgraphen und im Rahmen eines Kostenmodells ermöglicht. Das Kostenmodell soll dabei die produktbezogenen Zeiten mit einschließen.

Für die Entwicklung des Kostenmodells soll das Maschinelle Lernen und eine Ähnlichkeitsbestimmung integriert werden. Daneben liegt die Anwendung in der Raumfahrtindustrie, sodass der Bezug auf eine geringe Losgröße ebenfalls einen Sonderfall darstellt.

Das übergeordnete Projekt bezieht sich auf die Herstellung eines Raumfahrzeuges als Ganzes. Demnach sollen in diesem Zusammenhang die vollständigen Kostenstrukturen und die Produktlieferzeit nicht vernachlässigt werden. Die Arbeit versucht diesen übergeordneten Zusammenhang aufzugreifen. Aufgrund der Komplexität der Thematik liegt der Fokus auf den Fertigungskosten und -zeiten. Der Algorithmus beschränkt sich in seiner Ausarbeitung ebenfalls auf diesen Bereich.

Infolge der dargelegten Ausgangslage werden in Kapitel 2 relevante theoretische Aspekte für ein vertieftes Verständnis der Arbeit aufgezeigt. Daran anschließend wird in Kapitel 3 auf den Stand der Technik und die bestehende Literatur näher eingegangen. Es folgt mit dem Kapitel 4 die Konzeptionierung des Algorithmus des Kostenmodells. In dem Kapitel 5 wird auf die Implementierung des Konzeptes und auf den Algorithmus eingegangen. Abschließend wird das Kostenmodell in Kapitel 6 kritisch hinterfragt und in Kapitel 7 ein Ausblick auf Anwendungs- und Optimierungsmöglichkeiten der entwickelten Methode gegeben.

2. Theoretische Grundlagen

Zu Beginn werden für die Arbeit relevante theoretische Aspekte erläutert. Dazu wird in Kapitel 2.1 auf die Produktentwicklung insbesondere im Zusammenhang mit der Kosten- und Zeitermittlung während der Produktentstehungsphase, sowie nachfolgend in Kapitel 2.2 auf das Modell der Ontologie und in Kapitel 2.3 auf das Maschinelle Lernen eingegangen.

2.1. Kosten- und Zeitbeeinflussung in der Produktentwicklung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Produktentwicklung. Folglich ist die Eingliederung in den Kontext des Produktlebenszyklus relevant für das übergeordnete Verständnis.

Der *Produktlebenszyklus* befasst sich mit einem Produkt eines Unternehmens. Dabei wird unter einem Produkt ein Erzeugnis zur Befriedigung von Kundenwünschen und -anforderungen verstanden. In der Zeit, in der die Produkte vom Unternehmen angeboten werden, durchlaufen sie verschiedene Phasen. Diese werden anhand des Produktlebenszyklus wiedergegeben. Zu den Phasen gehört die Produktentstehung, die wiederum die Produktentwicklung beinhaltet. (vgl. VDI 2221 Blatt 1:2019-11, 2019, S. 8f.)

Die *Produktentwicklung* ist von zentraler Bedeutung für den Unternehmenserfolg. Sie unterliegt neben den Anforderungen und den Zielen des Unternehmens den globalen Anforderungen des jeweiligen Marktes. Es handelt sich um einen Unternehmensprozess, der in einem marktfähigen Produkt resultiert. (vgl. VDI 2221 Blatt 1:2019-11, 2019, S. 8)

Die zukünftigen Anforderungen und Ziele eines Unternehmens variieren je nach Perspektive. Dabei lässt sich mitunter zwischen der Kunden-, Markt- und Produktsicht differenzieren.

Aus der Kunden- und Marktsicht ergeben sich in den nächsten Jahren unter anderem ein verstärkter (Knowhow-)Wettbewerb, verkürzte Lieferzeiten, sowie gesteigerte Transparenz in der Wertschöpfungskette. Daraus resultiert das Ziel einer „flexible[n], wirtschaftliche[n] und schnelle[n] Anpassung an Kundenwünsche[n]“ (Gottmann, 2019, S. 12).

Aus der Produktsicht sind neben eines gesteigerten Wettbewerbs, ein gesteigerter Kostendruck, sowie eine erhöhte Variantenvielfalt zu erwarten. Analog zu den verkürzten Lieferzeiten ergeben sich zusätzlich reduzierte Produktlebenszyklen und reduzierte Produktentwicklungszeiten. (vgl. Gottmann, 2019, S. 12f.)

Folglich ist eine “flexible, wirtschaftliche und schnelle Anpassung an Produktvarianten” (Gottmann, 2019, S. 13) ein weiteres Ziel zur Bewältigung zukünftiger Anforderungen. Infolge der gesteigerten Variantenvielfalt sind unter anderem Auswirkungen in Hinblick der Standardisierung und der Komplexität von Prozessen, sowie der Wirtschaftlichkeit zu erwarten (vgl. Gottmann, 2019, S. 137).

Neben der Variantenvielfalt eines Produktes kann dieses hinsichtlich seiner Neuartigkeit näher differenziert werden. Dazu können die Bestandteile eines (Neu-)Produktes innerhalb eines Unternehmens bzw. einer Produktentwicklung in Gleich-, Wiederhol-, Norm-, Kauf-, Ähnlich- und Neuteile unterteilt werden (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 483). In den Unterteilungen ist eine gewisse Ähnlichkeit zwischen den Produkten enthalten.

Die Betrachtung der Ähnlichkeit zwischen Produkten ist Teil der entwickelten Methode und wird folglich näher erläutert.

Unter einer *Ähnlichkeit* wird meist ein Ähnlichkeitsmaß verstanden (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 486). Diese Ähnlichkeit lässt sich in eine geometrische Ähnlichkeit und eine geometrische Halbähnlichkeit unterteilen.

Unter einer geometrischen Ähnlichkeit versteht man eine Variation von Produkten in ihrer Skalierung. Die betrachteten Produkte sind dadurch folglich proportional zueinander. Infolgedessen kann ihre Ähnlichkeit zueinander beispielsweise anhand ihrem Längenverhältnis beschrieben werden. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 497)

Daneben entspricht die geometrische Halbähnlichkeit einer Variation der Produkte mit unterschiedlichen Abhängigkeiten zwischen ihren Produkteigenschaften. Gegenüber der zuvor beschriebenen Ähnlichkeit hängt diese Halbähnlichkeit von mindestens einer weiteren Eigenschaft ab. Beispielsweise kann die Ähnlichkeit zwischen zwei unterschiedlichen Walzen durch die verschiedenen Verhältnisse von Durchmesser und Walzbreite beschrieben werden. Zudem lässt sich eine fertigungstechnische Ähnlichkeit zwischen Produkten aufstellen. Diese Ähnlichkeit wird beispielsweise anhand der verwendeten Werkzeuge oder Maschinen definiert. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 498)

2.1.1. Struktur der fertigungsbezogenen Zeiten

In dem zu entwickelnden Kostenmodell der Arbeit werden neben den Kosten die Zeiten betrachtet. Infolgedessen werden in diesem Kapitel die Zeiten im Fertigungskontext näher erläutert und auf die Zeitermittlung im Allgemeinen eingegangen.

Die Zeit kann im Kontext der Fertigung als Produktionsfaktor, Stell- und Kontrollgröße verstanden werden. Zeitbezogenen Kennzahlen in den Bereich der Stell- und Kontrollgrößen. Im Sinne von Produktionsfaktoren wird die Zeit innerhalb der Fertigung und Produktion unterschieden in Ist-, Soll-, Vorgabe- und Planzeiten. (vgl. Sihm et al., 2016, S. 365ff.)

Die *Ist-Zeiten* beschreiben die tatsächlich gebrauchten Zeiten für einen Fertigungsabschnitt bspw. einem Arbeitsvorgang oder eines einzelnen Arbeitsschrittes. Im Gegensatz dazu beschreiben die *Soll-Zeiten* die aus vergangenen Ist-Zeiten abgeleiteten Zeiten als Richt- und Vorgabewert für einen Fertigungsabschnitt. Dabei stellen sogenannte *Normalzeiten* einen Sonderfall der Soll-Zeiten dar und entsprechen der durchschnittlichen vergangenen Ist-Zeiten. Zudem bestehen die *Planzeiten*, die basierend auf Soll-Zeiten definiert und mithilfe von Einflussgrößen bestimmt werden. Die *Vorgabezeiten* beschreiben eine weitere Abwandlung der Soll-Zeiten. Sie beziehen sich auf Abschnitte, die durch eine Person oder einem Betriebsmittel, bspw. einer Maschine, ausgeführt werden. Infolgedessen beinhalten Vorgabezeiten Zeiten für nicht bis gering vorhersagbare Vorgänge. (vgl. Sihm et al., 2016, S. 367f.)

Die in der Arbeit betrachteten Zeiten fokussieren sich als Input für die entwickelte Methode auf die Ist-Zeiten. Die berechneten Zeiten entsprechen als Output insbesondere den Normal- und Planzeiten. Daneben sind die Zeiten auf die Durchlaufzeit (DLZ) bezogen. Im Folgenden wird diese näher erläutert.

Die *Durchlaufzeit (DLZ)* ist definiert als “die Gesamtdauer [...] zur Erfüllung einer Aufgabe in einem oder mehreren Arbeitssystemen”(Sihn et al., 2016, S. 89). Folglich kann zwischen verschiedenen Durchlaufzeiten unterschieden werden. Unter anderem besteht die DLZ eines Fertigungsauftrages, die DLZ eines Arbeitsvorgangs und die DLZ eines Kundenauftrages.(vgl. Sihn et al., 2016, S. 89)

In dieser Arbeit wird die DLZ eines Arbeitsvorgangs und eines Fertigungsauftrages betrachtet. Die DLZ des Kundenauftrags ist dabei nur übergeordnet von Bedeutung.

Eine geringe Durchlaufzeit kann bedeuten, dass die Produktion Kundenwünsche und -anforderungen schnell umsetzt. In der Folge kommt es, bspw. aufgrund verfügbarer Liegeplätze, zu keiner Blockierung der Produktion. Außerdem wird durch die zeitnahe Auftragsbearbeitung das gebundene Kapital gering gehalten. Dies wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens aus.

Im Gegensatz dazu kann eine hohe Durchlaufzeit auf eine Belastung der Produktion und auf ineffiziente Prozesse hinweisen. Im Falle von Auftragsabbrüchen und gebundenem Kapital kann sich dies wiederum negativ auf die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens auswirken.(vgl. Gottmann, 2019, S. 183)

Die DLZ kann in verschiedene Bestandteile und Zeitarten aufgeteilt werden. Im Allgemeinen besteht die DLZ aus einer Durchführungs- und Übergangszeit. Dabei wird im Sinne der Durchführungszeit entweder eine Auftrags- oder eine Belegungszeit gemeint. Die Übergangszeit schließt insbesondere die Liegezeiten ein. Dabei kann die Transportzeit aufgrund des Liegens vor und nach dem Transportauftrag als eigenständige Auftragszeit angesehen werden.(vgl. Sihn et al., 2016, S. 89f.)

Mit Abbildung 2.1 ist die DLZ für einen Arbeitsvorgang mit ihren Bestandteilen schematisch dargestellt. Diese DLZ ist wiederum Teil der DLZ eines Fertigungsauftrags, da dieser Auftrag eine Folge verschiedener Arbeitsvorgänge darstellt(vgl. Sihn et al., 2016, S. 89).

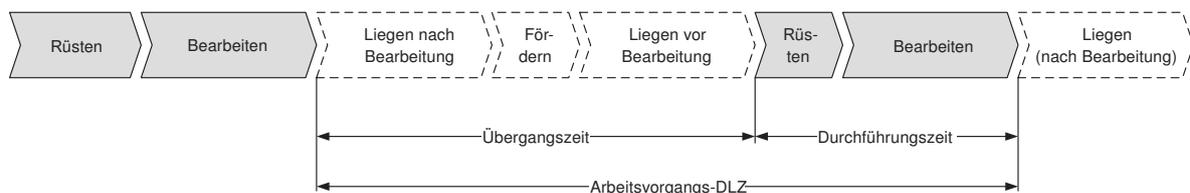


Abbildung 2.1.: Bestandteile der DLZ eines Arbeitsvorgangs(vgl. Sihn et al., 2016, S. 89).

Die Darstellung verdeutlicht, dass sich die Durchführungszeit aus einer Rüst- und einer Bearbeitungszeit zusammensetzt. Im Zusammenhang mit der Vorgabezeit ergeben sich unterschiedliche Aufteilungen und Definitionen dieser beiden Zeiten. Mit Betrachtung eines Betriebsmittels handelt es sich bei der Vorgabezeit um die Belegungszeit und bezogen auf eine Person um die Auftragszeit.(vgl. Sihn et al., 2016, S. 368)

Mithilfe der erläuterten Zeiten lässt sich eine *Zeitstruktur* für die Durchlaufzeit aufstellen. Die daraus resultierende Struktur ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

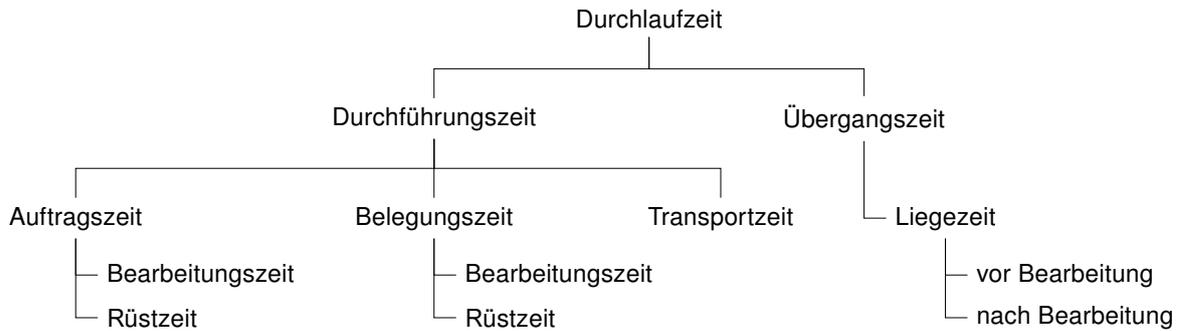


Abbildung 2.2.: Struktur und Aufteilung der Durchlaufzeit in die Bestandteile(vgl. Sihn et al., 2016, S. 369ff.).

Für die Ermittlung der DLZ und der weiteren Zeitarten bestehen verschiedene Methoden. Diese werden insbesondere durch den Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung, genannt REFA, entwickelt. Die Methoden lassen sich in folgende Kategorien unterteilen(vgl. Sihn et al., 2016, S. 372f.):

- Ist-Zeiten erfassen,
- Soll-Zeiten ermitteln und festlegen und
- Anteile von Zeitarten ermitteln.

Das *Erfassen der Istzeiten* wird auch *Zeiterfassung* genannt und wird in Erfassung durch Messungen und Erfassungen durch Befragungen differenziert(vgl. Sihn et al., 2016, S. 372f.).

Daneben wird die *Ermittlung der Sollzeiten* Zeitbestimmung genannt. Darunter wird das Ermitteln dieser Zeiten durch Berechnungen, Schätzungen und Simulationen, sowie durch das Zusammensetzen aus Ist-, Plan- oder systemisch vorbestimmter Zeiten verstanden.(vgl. Sihn et al., 2016, S. 372f.)

Die *Ermittlung der Zeitartenanteile* kann ebenfalls näher beschrieben werden. Zu diesen Ermittlungsmethoden zählen unter anderem das Schätzen, das Befragen, das Vereinbaren, die Verteilzeitaufnahme und die Multimoment-Häufigkeitsverfahren.(vgl. Sihn et al., 2016, S. 372f.)

Die Auswahl einer geeigneten Methode hängt von dem jeweiligen Anwendungsgebiet und der verbundenen Genauigkeitsanforderung ab.(vgl. Sihn et al., 2016, S. 372f.)

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Ermittlung der Zeitartenanteile. Folglich ist mit Zeitermittlung diese Kategorie gemeint. Außerdem werden die Ermittlungsmethoden nachfolgend näher erläutert.

Das *Schätzen und Vergleichen* kann in drei Verfahren unterteilt werden. Zu den Verfahren zählen das summarische und das analytische Schätzen, sowie das Zeitklassenverfahren.(vgl. Sihn et al., 2016, S. 380f.)

Beim *summarischen Verfahren* handelt es sich um das Ermitteln von Sollzeiten basierend auf dem Vergleichen eines Fertigungsablaufes mit einem ähnlichen Ablauf.(vgl. Sihn et al., 2016, S. 380f.)

Im Gegensatz dazu werden beim *analytischen Schätzen* Teilaufgaben von Arbeitsabläufen definiert und mit bekannten Teilaufgaben verglichen, sodass auf Basis von Mehr- oder Minderzeitbedarfen dessen Ergebnis abgeschätzt werden kann. Die vermehrten Schätzungen, aufgrund der Zerlegung, führen zu einer Verringerung des Ergebnisfehlers.

Die *Zeitklassenverfahren* entsprechen den analytischen Schätzungen. Dabei werden im Gegensatz zu denen anstelle von punktuellen Schätzungen Intervallschätzungen angewendet. (vgl. Sihn et al., 2016, S. 380f.)

Hinsichtlich der *Zeitermittlung mittels Systeme vorbestimmter Zeiten*, auch Prozessbausteinsysteme genannt, werden Aufgaben in Elemente zerlegt. Basierend auf der Zerlegung werden sogenannte Elementarzeiten ermittelt und tabellarisch festgehalten.

Eine Vorhersage der Zeit erfolgt auf einer Synthese von Elementarzeiten von Elementen einer Arbeitsaufgabe. Zu den Verfahren der Prozessbausteinsysteme zählen das Methods-Time Measurement MTM-Verfahren und das Work-Factor WF-Verfahren.

Beim MTM-Verfahren hängt die Zeit einer Arbeitsaufgabe von der gewählten Methode dieser ab. Im Gegensatz zum MTM-Verfahren, das auf qualitativen Einflussgrößen beruht, werden beim WF-Verfahren quantitative Einflussgrößen berücksichtigt. (vgl. Sihn et al., 2016, S. 382ff.)

Neben den genannten Methoden wird die Durchlaufzeit anhand der Durchlauf- und Kapazitätsterminierung geplant.

Bei der *Durchlaufterminierung* werden die Arbeitsschritte eines Fertigungsauftrages in eine zeitliche Reihenfolge gebracht und anhand dessen die voraussichtliche DLZ bestimmt. Die Dauer eines Arbeitsschrittes wird dabei mithilfe der Methoden der Zeitermittlung generiert.

Bei der *Kapazitätsterminierung* werden auf Basis der Durchlaufterminierung die Belastungen der verschiedenen Aufträge auf die Produktion ermittelt. Basierend auf den Kapazitätsbedarfen wird innerhalb der Terminierung ein Belastungsabgleich und -gleichgewicht angestrebt. Diese unterliegen dem Ziel die DLZ gering zu halten und die Kapazitäten der Produktion optimal zu nutzen. (vgl. Sihn et al., 2016, S. 93ff.)

2.1.2. Struktur der fertigungsbezogenen Kosten

Während im vorherigen Kapitel die Zeitermittlung thematisiert ist, liegt im Folgenden der Fokus auf der Kostenermittlung. Dabei werden die Kosten im Produkt- und Fertigungskontext betrachtet.

Für eine Kontrolle der Wirtschaftlichkeit, sowie der Ermittlung der tatsächlich angefallenen und voraussichtlichen Kosten, wird eine *Kostenrechnung* angewandt. Die Kostenrechnung befasst sich mit der Kostenerfassung, -verteilung und -zurechnung. Dabei werden die Kosten mithilfe einer Vorkalkulation im Voraus bzw. mithilfe einer Nachkalkulation nach Auftreten sämtlicher Kosten berechnet. (vgl. VDI 2234:1990-01, 1990, S. 13)

Zum Berechnen der Kosten bestehen verschiedene Verfahren. Im Sinne der Kostenzurechnung wird zwischen einer *Vollkostenrechnung*, die die Kosten verursachungsgerecht auf Kostenträger zuordnet, und einer *Teilkostenrechnung*, die insbesondere nur die variablen Kosten auf Kostenträger zuordnet, unterschieden. (vgl. VDI 2234:1990-01, 1990, S. 13ff.)

Daneben erfolgt eine Unterscheidung der Berechnungen anhand des Zeitbezuges der Kosten. Analog zu den Zeiten entsprechen die Kosten entweder den Ist-, Normal- oder den Plankosten. (vgl. VDI 2234:1990-01, 1990, S. 13ff.)

Dabei sind mit den *Istkosten* die tatsächlich angefallenen Kosten und mit den *Normalkosten* die durchschnittlichen Kosten vergangener Perioden gemeint. Die *Plankosten* stehen für die aus einer Kostenplanung hervorgehenden im Voraus geplanten Kosten und beruhen im Gegensatz zu den Normalkosten nicht auf vergangenen Istkosten. (vgl. VDI 2234:1990-01, 1990, S. 13ff.)

Je nach Verwendung werden die Kosten aus den folgenden unterschiedlichen Perspektiven betrachtet (vgl. VDI 2234:1990-01, 1990, S. 10):

- Art der Verrechnung,
- Abhängigkeit vom Beschäftigungsgrad,
- Art der Verursachung und
- Stelle der Entstehung.

Bei den Kosten aus der Sicht der *Art der Verrechnung* handelt es sich um die Differenzierung der Kosten in Einzel- und Gemeinkosten. Die Einzelkosten werden auch direkte Kosten genannt und beschreiben die Kosten, die sich vollständig auf ein einziges Produkt zurechnen lassen. Dagegen beschreiben die Gemeinkosten die Kosten, die durch gemeinsam genutzte Leistungen entstehen und folglich mehreren Produkten zugeordnet werden können. Sie werden überdies als indirekte Kosten bezeichnet.

Die Kosten in *Abhängigkeit des Beschäftigungsgrades* entsprechen einer Zerlegung der betrachteten Kosten in fixe und variable Kostenanteile. Fixe Kosten beschreiben überwiegend zeitabhängige Kosten, während variable Kosten durch eine Mengenabhängigkeit charakterisiert werden. Die Gemeinkosten können sowohl variable als auch fixe Kosten enthalten. Dagegen handelt es sich bei den Einzelkosten um reine variable Kosten. (vgl. VDI 2234:1990-01, 1990, S. 10f.)

Die Kosten, die anhand der *Art der Verursachung* charakterisiert werden, werden sogenannten Kostenarten zugeordnet und stehen in einem engen Bezug zu der Kostenartenrechnung eines Unternehmens. Bei der *Kostenartenrechnung* werden die Gesamtkosten auf die Kostenarten verteilt. Die Kostenarten können dabei Kostenartengruppen zugeordnet werden. Beispielsweise stellen die Materialeinzelkosten eine Kostenart dar und gehören der Gruppe der Materialkosten an. (vgl. VDI 2234:1990-01, 1990, S. 16)

Aus der Perspektive der *Stelle der Entstehung* handelt es sich um Kosten, die Kostenstellen zugeordnet sind. Eine Kostenstelle ist je nach Struktur eines Unternehmens definiert. Zum Beispiel kann eine Abteilung oder ein Fertigungsbereich eine Kostenstelle darstellen. Dabei ist die Kostenstelle von einem Kostenträger, beispielsweise ein Produkt oder ein Fertigungsauftrag, abzugrenzen (vgl. VDI 2234:1990-01, 1990, S.22).

Die Kosten der Kostenstellen stehen in einem Zusammenhang mit der *Kostenstellenrechnung*, die die Gemeinkosten auf die Kostenstellen verteilt. Eine Kostenstelle selbst kann Einzel- und Gemeinkosten besitzen. Allerdings werden diese in Form der Gemeinkosten auf einen Kostenträger bzw. auf ein Produkt verrechnet. (vgl. VDI 2234:1990-01, 1990, S. 19f.)

Eine Durchführung der Kostenrechnung beginnt mit der Aufstellung einer Kostenartenrechnung gefolgt von einer Kostenstellenrechnung und endet mit einer Kostenträgerrechnung (vgl. VDI 2234:1990-01, 1990, S. 15).

Diese Zusammenhänge insbesondere die verschiedenen Perspektiven sind Bestandteil eines Kostenmodells und relevant für das Verständnis nachfolgender Kostenbetrachtungen. Diese Erläuterungen werden vor allem mit den nachfolgenden Produktgesamtkosten verknüpft.

Die Kosten, die im Kontext eines Produktes über den Verlauf des Produktlebenszyklus (siehe Kapitel 2.1) bzw. der Produktlebensdauer anfallen, werden Produktgesamtkosten oder *Lebenslaufkosten* genannt (vgl. VDI 2235:1987-10, 1987, S. 7). Dabei wird ein Anteil durch den Hersteller und der restliche Kostenanteil durch den Nutzer verursacht. Dieser Zusammenhang ist mit einer vereinfachten Darstellung in Abbildung 2.3 veranschaulicht. Die gekennzeichneten Investitionskosten entsprechen dem Kaufpreis des Nutzers bzw. dem Verkaufspreis des Produktes. Dieser besteht aus den Selbstkosten und einer Gewinnmarge des Herstellers.

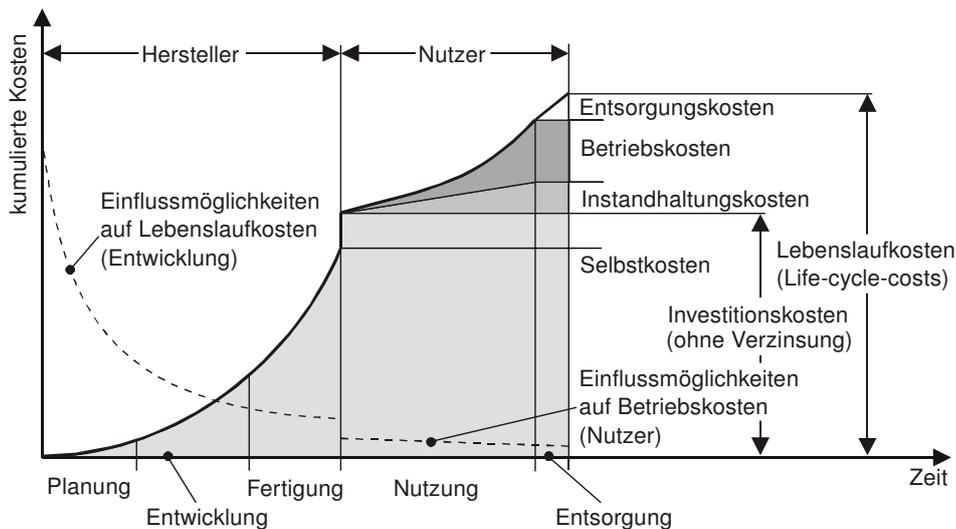


Abbildung 2.3.: Entwicklung der allgemeinen Produktkosten entlang des Produktlebenszyklus (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 126).

Diese Darstellung kann als Grundlage für die Einordnung der Arbeit in den Produktentstehungsprozess verstanden werden. Dabei werden an dieser Stelle die Lebenslaufkosten und ihre Beeinflussung nicht näher betrachtet. Vielmehr liegt der Fokus auf dem Bestandteil der Selbstkosten und somit den Kosten seitens des Herstellers.

Die *Selbstkosten* sind definiert als "die Summe aus Herstellkosten, Entwicklungs- und Konstruktionskosten sowie Vertriebs- und Verwaltungskosten" (Ehrlenspiel et al., 2020, S. 143). Folglich werden unter den Selbstkosten sämtliche Kosten, die im Zusammenhang eines Produktes in einem Unternehmen anfallen, verstanden.

Die Entwicklungs- und Konstruktionskosten (EKK), die von der Produktentwicklung verursacht werden, nehmen mit etwa 9 % einen verhältnismäßig kleinen Teil der Selbstkosten ein (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 145). Die restlichen Selbstkosten werden hingegen von der Produktentwicklung beeinflusst. Dies ist ebenfalls in Abbildung 2.3 angedeutet.

Daneben nehmen die Herstellkosten (HK) den größten Anteil der Selbstkosten ein. Sie sind definiert als die "Summe aus de[n] Material- und Fertigungskosten (Teilefertigung und Montage)" (Ehrlenspiel et al., 2020, S. 167).

Die Vertriebs- und Verwaltungskosten (VVK) entsprechen den restlichen Kosten. Demzufolge sind dies Kosten, die nicht direkt der Fertigung oder Entwicklung zugewiesen werden können.

Eine detailliertere und zugleich allgemeine Aufteilung der Selbstkosten ist mit Abbildung 2.4 veranschaulicht. Dabei werden die HK und die VVK weiter unterteilt.

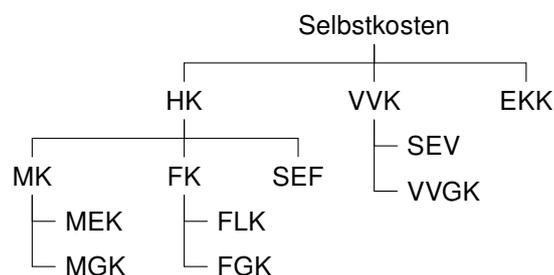


Abbildung 2.4.: Struktur und Aufteilung der Selbstkosten in die Bestandteile (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 170).

Die VVK werden in Sondereinzelkosten des Vertriebs (SEV) und Vertriebs- und Verwaltungskosten (VVGK) differenziert. Daneben sind die HK in Anlehnung an ihre Definition in Materialkosten (MK) und Fertigungskosten (FK) aufgeteilt. Zusätzlich werden die Sondereinzelkosten der Fertigung (SEF) in die HK miteingerechnet. Im Rahmen der SEF können Kosten beispielsweise durch die Beschaffung von Sonderwerkzeug zugeordnet werden.

Des Weiteren werden sowohl die MK als auch die FK zwischen Einzel- und Gemeinkosten unterschieden. Infolgedessen bestehen die Materialeinzelkosten (MEK) und Materialgemeinkosten (MGK) für die MK. Die FK werden in Fertigungslohnkosten (FLK) und Fertigungsgemeinkosten (FGK) differenziert.

Die jeweiligen Kosten berechnen sich als die Summe ihrer untergeordneten Kosten bzw. ihrer Kostenbestandteile (vgl. die Struktur in Abbildung 2.4).

Wie bereits erwähnt nehmen die HK den größten Teil der Selbstkosten ein. Auf die FK der HK wirken sich unter anderem die Stückzahl und die Fertigungsverfahren aus. Daneben werden die MK durch die Materialien beeinflusst. Dabei machen die MK etwa 38 % und die FK etwa 28 % der Selbstkosten aus (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 225).

Die FK können noch detaillierter betrachtet werden. Folglich werden diese Kosten zwischen den Kosten für die Teilefertigung und den Kosten für die Montage unterschieden. Diese beinhalten wiederum einen FLK- und FGK-Anteil. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 230)

Die Erfassung der Produktgesamtkosten mit einer Kostenrechnung kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Zu den möglichen Umsetzungen zählen die Zuschlagskalkulation und die Prozesskostenrechnung.

Die *Zuschlagskalkulation* wird der verursachungsgerechten Kostenrechnung zugeordnet. Dabei kann zwischen einer summarischen und einer differenzierenden Zuschlagskalkulation unterschieden werden. Bei der summarischen Kalkulation wird ein allgemeiner Gemeinkostenzuschlagssatz generiert und das Unternehmen infolge als eine Kostenstelle betrachtet. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 447) Demgegenüber werden bei der differenzierenden Kalkulation verschiedene Kostenstellen angenommen und verschiedene Zuschlagssätze berechnet. Dazu zählt der Materialgemeinkostenzuschlagssatz, der generell zwischen 5 und 20 % angenommen wird. Daneben wird ein Fertigungsgemeinkostenzuschlagssatz im Allgemeinen zwischen 200 und 500 % angenommen. Diese Zuschlagssätze werden mit den jeweiligen Einzelkosten multipliziert und ergeben die zu verwendenden jeweiligen Gemeinkosten. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 449ff.)

Die *Prozesskostenrechnung* zählt ebenfalls zu der verursachungsgerechten Kostenrechnung und unterliegt dem Ziel eine höhere Kostentransparenz zu schaffen. Dafür werden die Gemeinkosten anhand von Bezugsgrößen vermehrt runtergebrochen, sodass die Kosten verursachungsgerechter zugewiesen werden können. Beispielsweise entstehen dadurch im Fertigungsbereich weitere Kostensätze wie die Kosten pro Fertigungszeiteinheit oder die Kosten pro Gewichtseinheit. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 465f.) Des Weiteren kann die Prozesskostenrechnung im Zusammenhang einer prozessorientierten Kalkulation angewendet werden. Bei dieser werden die Tätigkeiten eines Prozesses betrachtet und anhand von Bezugsgrößen bzw. Kostensätzen aus der Prozesskostenrechnung berechnet. (vgl. Gottmann, 2019, S. 140)

Diese Unterscheidung ist grundlegend und eher übergreifend für die vorliegende Thematik. Allerdings kann festgehalten werden, dass der Ansatz dieser Arbeit die Prozesskostenrechnung integriert sowie zum Teil Zuschlagskalkulationen.

2.1.3. Kostenmanagement in der Produktentwicklung

Im Folgenden wird mithilfe der zuvor dargestellten Zusammenhänge näher auf die Kosten und Zeiten in der Produktentstehungsphase und auf die traditionellen Methoden der Abschätzung dieser eingegangen.

Wie bereits erwähnt, werden in der Produktentwicklung die meisten Kosten verursacht. Zusammen mit der Fertigungsplanung werden folglich etwa 90 % der Kosten festgelegt (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 16). In dem Kontext besteht das Kostenmanagement der Produktentwicklung.

Ein *Kostenmanagement* entspricht im Allgemeinen einer Steuerung der Kosten mit dem Ziel einer nachhaltigen Steigerung des Unternehmenserfolges. In der Produktentwicklung gilt es insbesondere den Produktentstehungsprozess anhand von drei Forderungen kosteneffizienter zu gestalten. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 21ff.)

Zu den Forderungen zählt die *Entwicklung marktgerechter Produkte*. Folglich ist zu gewährleisten, dass ein Produkt Gewinn erzielt. Gleichzeitig sind Kundenanforderungen zu erfüllen, sodass für die Gewinnerzielung eine ausreichend große Absatzmenge vorliegt.

Die *Entwicklung kostengünstiger Produkte* entspricht der zweiten Forderung. "Produkte sind dann kostengünstig, wenn mit ihnen Gewinn gemacht werden kann, d. h. wenn ihre Selbstkosten deutlich unter den am Markt erzielbaren Verkaufspreisen liegen"(Ehrlenspiel et al., 2020, S. 24).

Als dritte Forderung gilt es einen *kosteneffizienten Entwicklungsprozess* zu schaffen. Dafür ist insbesondere die Durchlaufzeit von Entwicklungsvorhaben zu betrachten und zu minimieren.(vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 21ff.)

Das hier zu entwickelnde Kostenmodell ist folglich direkt dem Kostenmanagement zuzuordnen bzw. in seinem Bestreben gleichzusetzen. Nachfolgend werden Methoden zur frühzeitigen Kostenermittlung grundlegend aufgezeigt.

Für die Steuerung der Kosten kommen im Kostenmanagement verschiedene Organisationsformen, Methoden und Werkzeuge zum Einsatz. Diese variieren in ihrer Anwendung je nach Ausgangslage. Die Werkzeuge beinhalten *Hilfsmittel zur Kostenfrüherkennung* in der Produktentwicklung. Diese entwicklungsbegleitenden Kalkulationen können wie folgt untergliedert werden(vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, 78ff.):

- Schätzen,
- Unterschiedskostenkalkulation,
- Such- und Ähnlichteilkalkulation,
- Gewichtskostenkalkulation,
- Materialkostenmethode,
- Bemessungsgleichungen,
- Einflussgrößenkalkulation,
- Kostenwachstumsgesetze und
- rechnergestützte Kalkulation.

Mit Ausnahme des Schätzens, der Unterschiedskostenkalkulation und der rechnergestützten Kalkulation können die Hilfsmittel unter dem Begriff der Kurzkalkulationen zusammengefasst werden.

Kurzkalkulationen umfassen alle Hilfsmittel, die ein Verfahren zur Kostenermittlung darstellen und dabei von definierbaren Einflussgrößen abhängen. Beispielsweise basiert das Schätzen auf Erfahrungen und wird dementsprechend nicht als Kurzkalkulation definiert.(vgl. VDI 2235:1987-10, 1987, S. 31) Des Weiteren grenzen sich die Kurzkalkulationen ab, indem sie aufgrund des Zeitpunktes der Anwendung auf unbekanntem Fertigungsgrößen beruhen. Folglich basieren sie nicht auf einer vollständigen Produktdokumentation und sind beispielsweise von den Verfahren der Arbeitsvorbereitung abzugrenzen.(vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 485)

Die *Kostenschätzung* wird in unterteilendes Schätzen, Schätzung durch mehrere Personen, Kombination von Schätzung und genauer Kostenermittlung, sowie vergleichendes Schätzen differenziert. Das Schätzen ist hinsichtlich der Schnelligkeit und des geringen Aufwands vorteilhaft. Dagegen wirken sich die Personenabhängigkeit und die schwer kommunizierbare Rationalität der Ergebnisse negativ auf die Schätzergebnisse aus.

Um die Genauigkeit zu erhöhen besteht beim unterteilenden Schätzen die Schätzung aus mehreren Teilschätzungen. Bei der Schätzung durch mehrere Personen ergibt sich die Schätzung aus mehreren unabhängigen Schätzungen durch Experten. Dadurch soll wiederum eine größere Genauigkeit erreicht werden. Mit der Kombination von Schätzung und genauer Kostenermittlung werden insbesondere die Kosten von Kleinteilen geschätzt und die Kosten der restlichen Bestandteile genau berechnet. Beim vergleichenden Schätzen gilt es die Schätzung anhand von Stützpunkten zu verbessern. Zu den Stützpunkten zählen beispielsweise die Kosten ähnlicher Teile.(vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 484f.)

Die *Unterschiedskostenkalkulation* berechnet die Kosten eines Produktes anhand von Abweichungen gegenüber einer bisherigen Lösungsvariante. Dabei unterliegt die Berechnung der Annahme, dass die Kosten gleicher Teilbereiche dieselben sind. Hinsichtlich der Unterteilungen von Produkten werden die Kosten bis auf den Kosten von Ähnlich- und Neuteilen als bekannt angenommen. Folglich werden nur die abweichenden Kosten berechnet und mit den bestehenden Kosten der Lösungsvariante verrechnet. Durch die eingegrenzte Kalkulation kann der Aufwand gering gehalten werden.(vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 483)

Bei der *Such- und Ähnlichteilkalkulation* werden analog zum vergleichenden Schätzen die Kosten anhand von bereits gefertigten Produkten verglichen und darauf aufbauend berechnet. Das Suchen nach infrage kommenden Produkten geht dem Vergleichen voraus und erfordert eine umfassende Betrachtung der Fertigungshistorie. Dabei kann die Ähnlichkeitssuche rechnergestützt durchgeführt werden.(vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 486)

Die *Einflussgrößenkalkulation* entspricht der Kostenermittlung auf Basis von definierten Einflussgrößen. Diese Kalkulationen liegen der Annahme zugrunde, dass eine einzige Einflussgröße die Kosten maßgeblich bestimmt.(vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 487)

Demzufolge werden der Kalkulation insbesondere die Gewichtskostenkalkulation, Materialkostenmethode, Kurzkalkulation über leistungsbestimmende Größen und die Bemessungsgleichungen zugeordnet. Zudem lassen sich Kalkulationen mit mehreren Einflussgrößen durchführen. Dabei wird ein statistischer Zusammenhang gesucht, sodass auf diesem die Kosten eines neuen Produktes berechnet werden können.(vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 90)

Die *Gewichtskostenkalkulation* berechnet die Herstellkosten eines Produktes anhand des Gewichtes. In Anlehnung an die Ähnlichteilkalkulation wird ein sogenannter Gewichtskostensatz für ein ähnliches Produkt berechnet. Dieser Kostensatz entspricht dem Verhältnis aus den Herstellkosten und dem Gewicht des ähnlichen Produktes. Unter der Annahme, dass sich die unbekanntenen Kosten proportional zu den Kosten des ähnlichen Produktes verhalten, wird der Gewichtskostensatz mit dem Gewicht des neuen Produktes multipliziert. Das resultierende Ergebnis entspricht den Produktkosten. Die Genauigkeit der Kalkulationsergebnisse beruht auf einer Gleichartigkeit und Vergleichbarkeit der Produkte, sowie auf einem idealerweise höheren Materialkostenanteil. Des Weiteren kann das Verfahren anstelle eines linearen Kostenzusammenhangs mit einem Degressiven verbessert werden. Demzufolge werden die Kosten mit steigendem Gewicht weniger stark wachsen.(vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 487f.)

Bei der *Materialkostenmethode* werden die Materialkosten mit den Herstellkosten eines ähnlichen Produktes in ein Verhältnis gesetzt und für die Kostenberechnung herangezogen. Dieses Verhältnis wird auch Materialkostenanteil genannt. Die Herstellkosten des neuen Produktes ergeben sich aus dem Verhältnis der Materialkosten des neuen Produktes und dem Materialkostenanteil. Dabei gelten für diese Kalkulation die Bedingungen der Gewichtskalkulation. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 488f.)

Neben der Gewichtskosten- und der Materialkostenkalkulation lassen sich die Kosten über leistungsbestimmende Größen berechnen. Dabei werden anstelle des Gewichtes oder des Materials beispielsweise Leistungsbedarfe herangezogen. Diese können unter anderem anhand grafisch ermittelter Kurven für andere Leistungsdaten abgelesen und für die Kostenermittlung herangezogen werden. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 489)

Mithilfe von *Bemessungsgleichungen* werden die Kosten eines Produktes mit den wesentlichen Einflussgrößen kombiniert und als eine geschlossene Formel festgehalten. Während das Verfahren die Abhängigkeiten der Einflussgrößen hochwertig darstellt und zu einer kostenoptimalen Lösung führen kann, wirkt sich der zugrundeliegende Aufwand und der Schwierigkeitsgrad der Formelfindung negativ aus. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 490)

Ein *Kostenwachstumsgesetz* wird auch Ähnlichkeitsgesetz oder Ähnlichkeitsbeziehung genannt. Infolgedessen werden die Kosten als eine Funktion der Ähnlichkeit verstanden. Daneben werden die Kostenwachstumsgesetze in Summarische und Differenzierte unterschieden. Die summarischen Kostenwachstumsgesetze werden für das Erkennen von Kostenabhängigkeiten und zum Ableiten von Regeln verwendet. Im Gegensatz dazu werden bei einem differenzierten Kostenwachstumsgesetz im Sinne einer verursachungsgerechten Kostenerfassung die Fertigungszeiten für die Aufstellung des Gesetzes verwendet.

Folglich werden je Arbeitsschritt bzw. je verwendetem Fertigungsverfahren und den dazugehörigen Fertigungszeiten Kostenwachstumsgesetze aufgestellt. Die Kombination dieser ergibt die berechneten HK des Neuproduktes. Die daraus resultierenden Ergebnisse entsprechen in ihrer Genauigkeit mit geringen Abweichungen dem Ergebnis einer Vorkalkulation. Demgegenüber steht ein entsprechend großer Aufwand für die Aufstellung der Gesetze. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 500)

Bei der *rechnergestützte Kalkulation* werden die CAD-Daten eines Produktes als Input für die Durchführung der Kalkulation verwendet. Dadurch kann die Kalkulation automatisiert durchgeführt werden. Eine Automatisierung ist von den Anforderungen und Randbedingungen des Unternehmens abhängig. Es bestehen verschiedene Softwarelösungen mit unterschiedlichem Fokus, die verwendet werden können. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 512f.)

Nachfolgenden wird kurz auf die Genauigkeit von Kosten in Bezug zu den Kurzkalkulationen eingegangen. Diese sind insbesondere hinsichtlich des gaußschen Fehlerausgleichs für die Arbeit relevant.

Die *Genauigkeit der Kurzkalkulationsformeln* wird als die absolute oder die relative Abweichung zwischen den Kalkulationsergebnissen betrachteter Daten und definierter Bezugspunkte verstanden.

Beispielsweise können für die Kalkulation der Herstellkosten die Istkosten eines Produktes herangezogen werden. Des Weiteren ist die Standardabweichung, die die Streuung der Werte um einen im Mittel zu erwartenden Wert beschreibt, von Bedeutung. Aufgrund unvorhersehbarer Ereignisse innerhalb der Fertigung können die Istkosten entsprechend große Streuungen und somit verhältnismäßig große Werte für die Abweichung beinhalten. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 506)

Die absoluten und relativen Abweichungen in den Datensätzen werden auch absolute und relative Fehler genannt. Der gesamte absolute oder relative Fehler eines Produktes entspricht der Gesamtheit der relativen oder absoluten Fehler der Produktbestandteile. Dabei wirkt sich die Anzahl der Bestandteile positiv auf den Gesamtfehler aus. Infolgedessen kann mit zunehmender Differenzierung der Gesamtkosten ein geringerer Gesamtfehler erreicht werden. Dieser Zusammenhang fällt unter den Begriff des *gaußschen Fehlerausgleichs*. (vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 509f.)

2.2. Grundelemente einer Ontologie

Die Produktinformationen dieser Arbeit werden, wie bereits erwähnt, mit einer Ontologie bereitgestellt. Dafür wird im Folgenden auf das theoretische Verständnis einer Ontologie eingegangen.

Eine Ontologie entspricht aus Sicht der Philosophie der Lehre vom Seienden und versucht die Realität möglichst sinngemäß und allgemeingültig zu beschreiben. Dieser Grundgedanke lässt sich in dem Ontologiebegriff aus Sicht der Informatik wiederfinden. Dort wird eine Ontologie als "eine formale, explizite Spezifikation einer gemeinsamen Konzeptualisierung" (Dengel, 2012, S. 65) verstanden. Damit widmet sich eine Ontologie einer Wissensrepräsentation bzw. Wissensabbildung. Wissen wird mithilfe von Begriffen und Zusammenhängen in einer für einen Computer lesbaren Art und Weise beschrieben. (vgl. Dengel, 2012, 64)

In dem Zusammenhang ist die Definition von Wissen relevant. Diese kann anhand einer Wissenstreppe veranschaulicht werden. Die Wissenstreppe ist Teil des Wissensmanagements und wird dort insbesondere zur Veranschaulichung der Bedeutung von Wissen für die Wettbewerbsfähigkeit und die Relevanz von Tools zur Wissensbewahrung verwendet. Dabei wird hervorgehoben, dass Daten als Steigerung der Zeichen ohne zusätzliche Bedeutung als nutzlos angesehen werden können und Wissen erst mit dem Verknüpfen von Informationen entsteht. Wissen ist folglich zu verstehen als "die Fähigkeit Daten im Kontext zu interpretieren" (Dengel, 2012, S. 4). (VDI/VDE 3714 Blatt 2:2019-12 - Entwurf, 2019, S. 3f.)

Im Sinne eines Spezialfalls kann für die Interpretation von Semantik gesprochen werden. Diese ist im Rahmen der Wissensabbildung und folglich der Ontologie von Bedeutung. Bezogen auf den Sprachgebrauch lässt sich Semantik anhand eines Satzes in Abgrenzung zum Syntax und der Pragmatik beschreiben. Während der Syntax der Zeichenfolge des Satzes entspricht, beschreibt die Pragmatik die Satzbedeutung auf Basis der Umgebung wie bspw. dem übergeordneten Text. Die Semantik wiederum beschreibt die Bedeutung des syntaktischen Ausdrucks ohne die Umgebung mit einzubeziehen. (vgl. Dengel, 2012, S. 10f.)

Die Ontologie zählt zu den semantischen Technologien(vgl. Dengel, 2012, S. 4). Wenn Daten und Informationen auf verschiedene Art und Weise interpretiert und verwendet werden soll, können Ontologien eingesetzt werden. Deren Architektur ermöglicht eine Wiederverwendbarkeit.(vgl. Dengel, 2012, S. 66) Je nach Verwendung wird dabei zwischen Upper und Domain Ontologie unterschieden. Eine Upper Ontologie zeichnet sich durch eine gewissen Allgemeingültigkeit aus und kann für verschiedene Anwendungsszenarien verwendet werden. Dagegen richtet sich eine Domain Ontologie an einen speziellen Anwendungsfall.(vgl. Dengel, 2012, S. 66f.) Beispielsweise ist eine Ontologie mit allgemeinen Informationen über physikalische Einheiten eine Upper Ontologie, während die Ontologie eines Projektes aufgrund des definierten Anwendungsbereiches einer Domain Ontologie entspricht.

Grundelemente von Ontologien sind Klassen, Relationen und Instanzen. Eine Klasse beschreibt eine Begriffskategorie mit Eigenschaften, die mithilfe von Relationen definiert werden. Dabei können einer Klasse reale Objekte, die als Instanzen dargestellt werden, zugeordnet werden. Dadurch erben bspw. die Instanzen alle Eigenschaften der Klasse. Während auf der Klassenebene Relationen allgemein definiert werden, werden auf der Instanzebene die Relationen der Klasse, bspw. durch die Anreicherung von Werten, spezifiziert.(vgl. Dengel, 2012, S. 65f.)

2.3. Maschinelles Lernen und Data Mining

In dieser Arbeit werden Methoden des Data Minings und des Maschinellen Lernens angewendet. Folglich wird auf diesen Bereich näher eingegangen.

Das Maschinelle Lernen (ML) ist ein Teilgebiet der künstlichen Intelligenz. Algorithmen dieses Gebietes suchen nach Mustern und Gesetzmäßigkeiten in Daten und leiten daraus Lösungen und Wissen ab.(vgl. Mockenhaupt, 2021, S. 134) Dabei wird unter einem Algorithmus "eine präzise, endliche Vorgehensweise zur Lösung einer Aufgabe"(Mockenhaupt, 2021, S. 147) verstanden.

Es bestehen insbesondere drei Methoden des ML. Beim überwachten Lernen ist die Lösung bekannt. Die Lösung stellt das Grundwissen bzw. die Ground Truth dar. Folglich ist ein Algorithmus auf Basis dieser Methode als sehr sicher und weniger kreativ anzusehen. Daneben sind beim unüberwachten Lernen die zu erwartenden Ergebnisse unbekannt. Mithilfe dieser Methode können unbekannte Muster gefunden werden. Die dritte Methode, das bestärkende Lernen, basiert auf Regeln und einem Belohnungsprinzip. Dadurch werden keine Daten benötigt und der Algorithmus lernt besonders kreativ.(vgl. Mockenhaupt, 2021, S. 139ff.)

Unter Data Mining (DM) versteht man die Analyse von Datenmengen. Dadurch sollen Beziehungen und Erkenntnisse auf Basis der Daten aufgedeckt werden.(vgl. Mockenhaupt, 2021, S. 274) Folglich dient sowohl das ML als auch das DM der Wissensgewinnung. Dabei kann das DM im Sinne der Datenanalyse als Hilfsmittel für das ML verstanden werden.

Die Aufstellung eines Algorithmus des Maschinellen Lernens kann im Allgemeinen durch das in Abbildung 2.5 dargestellte Schemata beschrieben werden. Zu Beginn werden die Eingangsdaten erhoben und aufbereitet. Danach folgt die Optimierung der Daten und die Auswahl eines Modells. Nachdem dieses Modell entsprechend vorbereitet, trainiert und optimiert ist, wird das Modell zur Lösungsgewinnung angewendet.

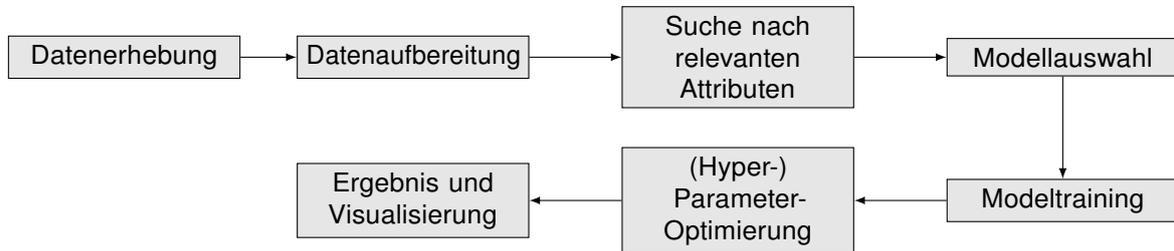


Abbildung 2.5.: Allgemeines Vorgehen der Entwicklung eines Algorithmus des MLs (vgl. Mockenhaupt, 2021, S. 153)

Ein ähnliches Vorgehen lässt sich im Knowledge Discovery in Databases KDD-Prozess von Fayyad wiederfinden. Dieser beschreibt die Gewinnung von Wissen aus Datenbanken. Dabei ist das DM Teil des Prozesses und wird zum Ableiten von Mustern herangezogen. (vgl. VDI/V-DE 3714 Blatt 1:2019-12 - Entwurf, 2019, S. 23)

Das DM selbst wird in seinem Vorgehen mit dem Cross Industry Standard Process for Data Mining CRISP-DM beschrieben. Die einzelnen Phasen sind je nach Anwendung variabel gestaltet. Grundsätzlich beeinflussen sich die Erkenntnisse der Ist-Situation und der Daten gegenseitig. Mithilfe der genaueren Betrachtung der Daten können wiederum neue Kenntnisse über die Ausgangssituation getroffen werden. Gleichzeitig können die Ergebnisse in ein Anwendungsszenarium integriert werden. (vgl. VDI/VDE 3714 Blatt 1:2019-12 - Entwurf, 2019, S. 23f.)

3. Stand der Technik

Im Folgenden werden die aktuellen Entwicklungen in denen für diese Arbeit relevanten Forschungsbereichen erläutert. Die dafür vorausgesetzten theoretischen Grundlagen sind im vergangenen Kapitel erläutert. Folglich werden in Kapitel 3.1 die allgemeinen Trends in der Entwicklungsphase beschrieben. Mit Kapitel 3.2 folgt die Betrachtung der Forschung im Bereich der Ähnlichkeitsbestimmung, mit Kapitel 3.3 entsprechend der Forschungsstand der Kostenermittlung und mit Kapitel 3.4 der Forschungsstand der Zeitermittlung.

3.1. Herausforderungen und Trends in der Entwicklungsphase

Wie bereits zuvor erläutert, wirkt sich die Produktentwicklung auf die nachrangigen Produktphasen aus. Folglich können Entwicklungen hinsichtlich der VUCA-Welt insbesondere aus der Entwicklungsphase heraus bewältigt werden. In Anlehnung an Bender und Gericke und Cantamessa et al. wird die Produktentwicklung zunehmend digitaler und virtueller, sodass der virtuellen Produktentwicklung eine besondere Rolle zukommt. Die Herausforderung der Produktentwicklung ist es insbesondere folglich den Wandel hin zur Virtualität zu bewältigen.

Mit dem Artikel von Paturi und Cheruku besteht eine systematische Literaturanalyse zu der Verwendung Maschinellen Lernens in der Produktion. Dabei lässt sich vermehrt Literatur in den Bereichen der industriellen Anwendungen und dem Bereich der Materialien, Design und Fehlererkennung finden. Der zweite Bereich entspricht der datengetriebenen Produktentwicklung. Es wird deutlich, dass dieser bereits einem Interesse unterliegt und zur Bewältigung der Herausforderungen herangezogen wird.(vgl. Paturi und Cheruku, 2021, S. 6)

Diese Entwicklung bestätigen die Forschungsergebnisse von Krauß et al.. So lässt sich der Einsatz des Maschinellen Lernens in drei Bereiche einteilen. Dies ist mit Tabelle 3.1 veranschaulicht.

Tabelle 3.1.: Übersicht der Anwendung von ML in der Produktion(vgl. Krauß et al., 2019, S. 40)

| Bereich | Themengebiete |
|-----------------------|--|
| Prozess | Prozess-Design, Predictive Process-Control, Optimierung von Routing und Scheduling |
| Produkt | Produkt-Design |
| Maschinen und Anlagen | Anomaly Detection, Predictive Maintenance, Self-Learning Machines |

Folglich wird das ML im Kontext der Produktion bezüglich der Prozesse, Maschinen und des Produktes angewendet. Demzufolge lässt sich diese Arbeit dem Bereich des Produktes bzw. des Produkt-Designs zuordnen. Zudem wird auf den Teil der datengetriebenen Produktentwicklung hinsichtlich der Betrachtung von Ähnlichkeiten zwischen Bauteilen, sowie der Methoden zur Kosten- und Zeitberechnung näher eingegangen. Ein weiterer Bezug besteht zum dargestellten Prozess-Bereich, sodass teils prozessbezogene Methoden ebenso betrachtet werden.

3.2. Methoden der Ähnlichkeitsbestimmung von Bauteilen

In Kapitel 2.1 wurde bereits auf die Definition eines Ähnlichkeitsmaßes eingegangen, sowie der Ähnlicheilkalkulation hinsichtlich der Kostenberechnung. Während die Trends der Kostenberechnung im nächsten Kapitel näher erläutert werden, soll an dieser Stelle auf die grundsätzliche automatisierte Bestimmung von Ähnlichkeiten zwischen Bauteilen eingegangen werden.

Laut Harik und Barakat ist es eine Möglichkeit ausgehend von einer digitalen Bauteilrepräsentation, bspw. einer CAD-Datei, zuerst die Eigenschaften des Bauteils und die Beziehungen der Eigenschaften zueinander zu extrahieren. Dieser Bereich wird auch Feature Recognition bzw. Feature-Erkennung genannt. Nach dieser Extraktion folgt die Berechnung der Ähnlichkeit, die in einem Ähnlichkeitswert zwischen 0 und 1 resultiert. Ein Wert von 0 entspricht in dem Fall keiner Übereinstimmung und eine 1 eine Vollständige. Dabei wird die Ähnlichkeit von Beispielbauteilen in Form eines relativen Verhältnisses der Feature gegenüber eines Basisbauteils berechnet.

Der Feature-Vergleich als Grundlage für die Ähnlichkeit wird von Liverani und Ceruti definierter aufgegriffen. So werden die Feature klassifiziert, hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Bauteil gewichtet und ihre Dimensionen und Positionierungen einbezogen, sodass ebenso eine relative Übereinstimmung berechnet werden kann. Die Feature-Informationen stammen in dem Fall aus einem Produktdatenmanagement-System.

Ein anderer Ansatz wird von Kretschmer et al. verfolgt. In dem Fall ist die Ähnlichkeitsbestimmung Teil der Wissensgewinnung in der Montage. Aufgrund eines Vergleichs von Bauteilen, wird der Ansatz an dieser Stelle erläutert. So wenden die Autoren Methoden des Maschinellen Lernens für die Ähnlichkeitsbestimmung an. Die (Montage- und) Produktinformationen, vergleichbar mit den Features, wurden vorab generiert. Die Feature eines Neubauteils werden in diesem Fall nach einer Normalisierung und teilweisen Gewichtung mithilfe eines k-nearest neighbour Algorithmus klassifiziert. Dadurch besteht nicht nur die Information über eine Clusterzugehörigkeit sondern auch eine Entfernung zu den bestehenden Produkten. Die Entfernung entspricht dabei einem Ähnlichkeitsmaß. So sind sich zwei Produkte ähnlicher, je näher sie beieinander liegen bzw. je kleiner ihre Distanz zueinander.

Ćwikła et al. verfolgt den Ansatz einer semantischen Ähnlichkeit. In dem Fall liegen die Produktinformationen in Form einer semantischen Netzwerkes vor. Dabei werden die Informationen je nach Datenformat unterschiedlich behandelt. Grundsätzlich lässt sich jedoch festhalten, dass auch in diesem Fall relative Übereinstimmungen berechnet werden. Durch das semantische Netz bestehen Produktinformationen in hierarchischer Form. Von der untersten Ebene aus werden alle Feature eines Bauteils mit denen eines anderen Bauteils verglichen. Dabei wird je nach vorliegendem Datenformat anders berechnet, bspw. besteht eine Unterscheidung von Informationen in Form von Text und Zahlen. Die berechneten Ähnlichkeiten zusammengehörender Feature werden gewichtet zur Berechnung eines finalen Ähnlichkeitsmaßes verwendet.

Die semantische Ähnlichkeit zur Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Bauteile wird von Lu et al. ebenso angewendet. Der Artikel beschäftigt sich mit dem Vergleich von Produkten in unterschiedlichen Ontologien. Dabei kann das Vorgehen für den Vergleich von Produkten in derselben Ontologie aufgegriffen werden. Daneben stellt Lu et al. mehrere Verfahren der semantischen Ähnlichkeit gegenüber. Diese unterscheiden sich gegenüber dem vorherigen Ansatz insbesondere in der Differenzierung von Eigenschaften, die definierten Produktbereichen zugeordnet werden können, und den Verbindungen der Eigenschaften zueinander. Diese werden wiederum gewichtet in die Berechnung des finalen Ähnlichkeitsmaßes integriert.

3.3. Ansätze und Methoden der frühzeitigen Kostenermittlung

Im Kapitel bezüglich der theoretischen Grundlagen wurden bereits traditionelle und in Fachbüchern auffindbare Ansätze und Methoden der Kostenermittlung erläutern. Dazu zählt die in Kapitel 2.1.2 erläuterte Differenzierung von Zuschlagskalkulation und Prozesskostenrechnung, sowie die in Kapitel 2.1.3 erläuterten Hilfsmittel der Kostenfrüherkennung.

Moderne Ansätze wurden unter anderem von Altavilla et al. mithilfe einer Literaturanalyse untersucht. Die Untersuchung betrachtet dabei den Forschungszeitraum 2006 bis 2015. Dieser Zeitraum wurden von den Autoren analysiert und für die Entwicklung eines Frameworks herangezogen.

Analog zu den in Kapitel 2.1.2 erläuterten unterschiedlichen Perspektiven der Kosten, ergeben sich unter anderem durch die Zunahme von Ermittlungsansätzen und Einsatzbereichen unterschiedliche Perspektiven der Kostenermittlung. Mit dem Framework werden die folgenden fünf Dimensionen der produktbezogenen Kostenermittlung festgehalten (vgl. Altavilla et al., 2018, S. 4):

- die Art der Analyse,
- die Methode der Kostenermittlung,
- die Produkt- und Prozesseigenschaften,
- die Zielsetzung der Kostenermittlung und der Lebenslaufphase und
- die Kostenbetrachtung.

Diese Dimensionen und das entwickelte Framework ist mit Abbildung 3.1 dargestellt. Das Framework kann für die Positionierung einer neuen Methode verwendet werden. Daneben lässt sich Literatur einordnen. Folglich wird eine Literatur je Dimension einem der aufgeführten Aspekte in Abbildung 3.1 zugeordnet. (vgl. Altavilla et al., 2018, S. 17)

In dieser Arbeit wird das Framework zur Einordnung der Arbeit in den Stand der Technik genutzt. Dies ist in Kapitel 6 erläutert. Daneben wird die Literatur, die über den Zeitraum der Analyse hinausgeht, den Dimensionen zugeordnet. Dafür werden die Dimensionen im Folgenden näher betrachtet.

Bezüglich der *Dimension der Art der Analyse* kann die Literatur der Kostenermittlung in vier Arten unterteilt werden. Diese Klassifizierungen der zugrundeliegenden Literatur der Literaturanalyse sind mit Tabelle 3.2 dargestellt.

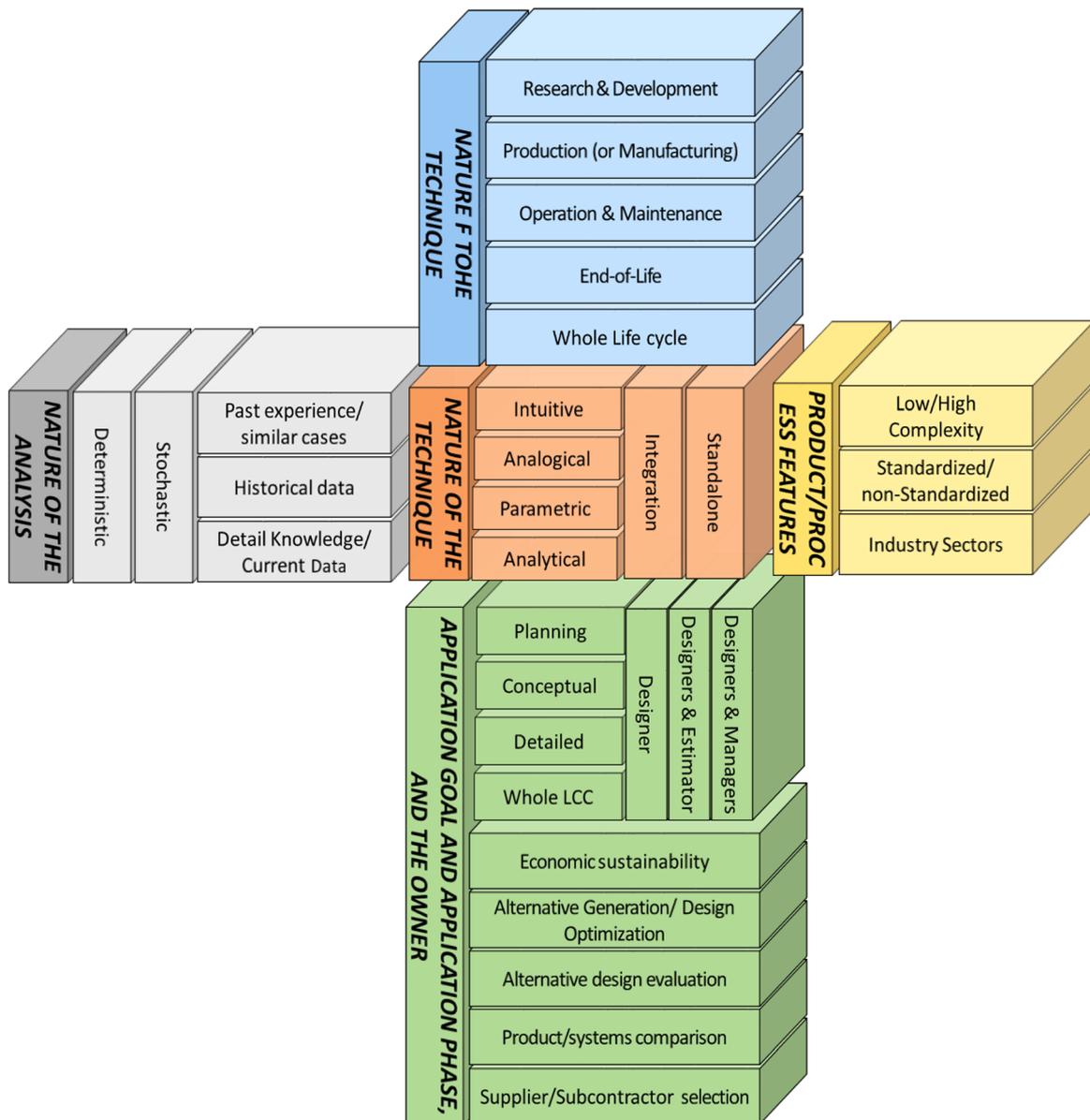


Abbildung 3.1.: Dimensionen der Kostenermittlung (Altavilla et al., 2018, S. 16)

Es bestehen vier Kategorien. Dabei werden traditionelle Methode bspw. hinsichtlich der Kurzkalkulationsformeln und der Einflussgrößenkalkulation insbesondere der analytischen und parametrischen Kategorie zugeordnet. Dagegen sind bspw. das Schätzen und die Ähnlichkeitkalkulation Teil der intuitiven Methoden. Die Genauigkeit ist allgemein bei den intuitiven Methoden am geringsten und steigt im Verhältnis über analogisch und parametrisch bis zu den analytischen Methoden an (vgl. Altavilla et al., 2018, S. 3).

Im Allgemeinen werden intuitive und analogische Methoden als qualitative Ansätze und die parametrischen und analytischen Methoden als quantitative Ansätze zusammengefasst. Qualitative Ansätze sind durch das Vergleichen von Neuentwicklungen mit bereits gefertigten Produkten geprägt, während quantitative Ansätze sich durch einen größeren Detailgrad und eine größere Genauigkeit auszeichnen. Folglich werden qualitative Ansätze vornehmlich zu Beginn der Entwicklungsphase und quantitative Ansätze tendenziell vermehrt am Ende der Entwicklungsphase angewendet. (vgl. Altavilla et al., 2018, S. 3)

Tabelle 3.2.: Klassifizierung der Kostenermittlung (vgl. Altavilla et al., 2018, S. 5)

| Methode | Intuitiv | Analogisch | Parametrisch | Analytisch |
|-----------------------------|----------|------------|--------------|------------|
| Fallbasierte Methode | x | | | |
| Experten-System | x | | | |
| Data Mining | x | | | |
| Fuzzy-Logik Ansatz | x | | | |
| Regelbasiertes System | x | | | |
| Regressions-Model | | x | | |
| Grey Prediction Methode | | x | | |
| Monte Carlo Analyse | | x | | |
| Künstliches Neuronales Netz | | x | | |
| Parametrische Methode | | | x | |
| Prozessbasierter Ansatz | | | | x |
| Kostenstruktur Ansatz | | | | x |
| Toleranz-basierte Methode | | | | x |
| Feature-basierter Ansatz | | | | x |
| Prozesskostenrechnung | | | | x |

Nach Altavilla et al. werden bei der Anwendung einer Methode zur Kostenermittlung mehrheitlich auf analytische oder analogische Methoden zurückgegriffen. Dabei werden bei den analytischen Methoden der Kostenstruktur und der aktivitäts-basierte Ansatz überwiegend angewendet, während es bei den analogischen Methoden die Regressionsmodelle und die Modelle der künstlichen neuronalen Netze sind.(vgl. Altavilla et al., 2018, S. 6)

Daneben stellt Altavilla et al. die Anwendung integrierter Methoden heraus. Dabei werden insbesondere Kombinationen aus intuitiven und analogischen Methoden, sowie Kombinationen aus intuitiven und analytischen Methoden angewendet.(vgl. Altavilla et al., 2018, S. 7ff.)

Bei der *Dimension der Methode der Kostenermittlung* wird insbesondere zwischen deterministischen und stochastischen Methoden unterschieden. Nach Altavilla et al. handelt es sich bei der Mehrheit an Literatur um deterministische Methode, die folglich ein Ergebnis liefern und keine Unsicherheit berücksichtigen.(vgl. Altavilla et al., 2018, S. 10)

Bei der *Dimension der Produkt- und Prozesseigenschaften* werden Methoden der Kostenermittlung hinsichtlich ihrer Komplexität unterschieden. Beispielsweise werden für standardisierte Prozesse und Produkte mit geringer Komplexität eher analogische Methoden herangezogen. Für individuelle Prozesse und Produkte mit hoher Komplexität werden insbesondere analytische Methoden angewendet.(vgl. Altavilla et al., 2018, S. 11)

In Bezug zu der *Zielsetzung der Kostenermittlung und der Lebenslaufphase*, in der die Kostenermittlung angewendet wird, beschäftigt sich die Mehrheit mit Ermittlungsmethoden für die Entwicklungsphase. Dabei beschäftigt sich ein kleinerer Teil mit der frühen Entwicklungsphase. Dabei werden insbesondere qualitative Methoden in der Entwicklungsphase angewendet, während quantitative in späteren Phasen bevorzugt werden.(vgl. Altavilla et al., 2018, S. 12f.)

In der *Dimension der Kostenbetrachtung* werden Methoden anhand ihrer verfügbaren Informationen und damit anhand der integrierten Lebenslaufphasen charakterisiert. Dabei werden insbesondere die Informationen der Fertigung und Herstellung eines Produktes angewendet. (vgl. Altavilla et al., 2018, S. 14)

Wie bereits erwähnt, sind die Jahre nach 2015 nicht in die Untersuchung eingegangen. Diese sind folglich relevant für die aktuellsten Trends. Weitere Literatur ist dementsprechend analog zu dem zuvor erläuterten Framework klassifiziert. Die Ergebnisse dieser Literaturanalyse sind mit Abbildung 3.2 dargestellt.

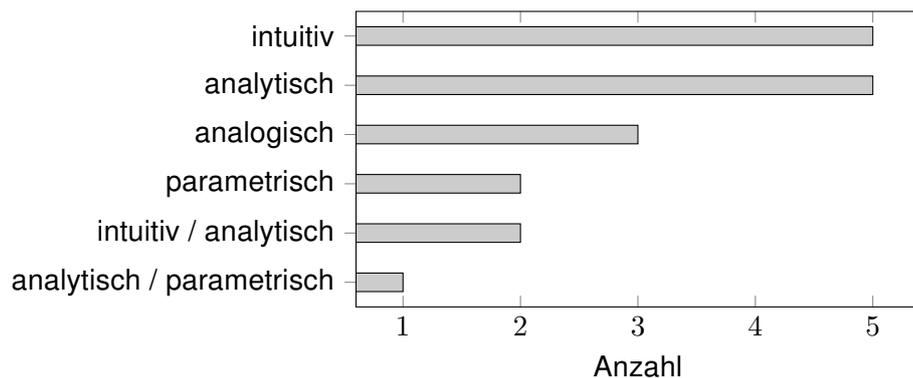


Abbildung 3.2.: Klassifizierung der Literatur bezüglich der Kostenermittlung

Die Mehrheit der Literatur lässt sich den intuitiven (vgl. Kretschmer et al. (2017), Tlija et al. (2018), Eddy et al. (2020), Ćwikła et al. (2020), Ćwikła und Bańczyk (2021)) und analytischen Methoden (vgl. Więcek et al. (2019), Mandolini et al. (2019), Mandolini et al. (2020b), Campi et al. (2020) und Mandolini et al. (2020a)) zuordnen. Daneben sind mit Ausnahme von Zohoori et al. (2019) die Methoden deterministisch. Zudem liegt der Fokus auf der Fertigung und Produktion. Eine Ausnahme stellt die Betrachtung der Montage bei Favi et al. (2016) und Kretschmer et al. (2017), sowie die Einbeziehung mehrerer Lebenslaufphasen bei Więcek et al. (2019), Relich und Świć (2020) und Ćwikła und Bańczyk (2021), dar.

Die Literatur beschäftigt sich ohne Ausnahme mit der Anwendung zum Zeitpunkt der (frühen) Entwicklungsphase. Ungefähr die Hälfte der gefundenen Literatur verwendet zudem historische Daten. Außerdem werden insbesondere kombinierte Methoden basierend auf intuitiven und analytischen Ansätzen betrachtet (vgl. Favi et al. (2016) und Zohoori et al. (2019)).

Bei den analogen Methoden handelt es sich um die Verwendung von Methoden basierend auf neuronalen Netzen (vgl. Yoo und Kang (2021) und Ning et al. (2020)) und Regressionsmethoden (vgl. Kurasova et al. (2021)).

Bezüglich der Zeitermittlung ist die bei Mandolini et al. (2020b), Eddy et al. (2020) und Mandolini et al. (2020a) in die Kostenermittlung integriert. Zudem wird bei Zohoori et al. (2019) und Wazziki und Ngo (2019) die Ermittlung von Zeiten parallel zu der Ermittlung der Kosten betrachtet. Im nachfolgenden Kapitel wird detaillierter auf den Stand der Technik der Zeitermittlung eingegangen.

Folglich werden mit der gefundenen Literatur die von Altavilla et al. (2018) herausgestellten Trends in Richtung digitaler, dynamischer und integrierter Ansätze bestätigt. Daneben ist eine vollständige Klassifizierung der Literatur im Anhang A nachlesbar.

3.4. Ansätze und Methoden der frühzeitigen Zeitermittlung

Im Fokus der Zeitermittlung ist die Durchlaufzeit. Diese wurde mit Kapitel 2.1.1 bereits erläutert. Im Zusammenhang mit der erwähnten Durchlauf- und Kapazitätsterminierung ist die Reihenfolge der Prozessschritte relevant. Folglich besteht Literatur im Rahmen des sogenannten Job Shop Scheduling. Dieser Bereich beschäftigt sich mit der Zeitermittlung von Durchlaufzeiten bei gleichzeitiger Optimierung der Prozessfolge (vgl. bspw. Mirshekarian und Šormaz) Im Gegensatz dazu liegt in dieser Arbeit der Fokus auf der Zeitermittlung bei bereits festgelegter Prozessfolge. In diesem Bereich lässt sich deutlich weniger Literatur finden. Die gefundene Literatur wird anhand des im vorigen Kapitels Kapitel 3.3 erläuterten Frameworks beschrieben. Anstelle der Kosten werden die Dimensionen entsprechend auf die Zeiten angewendet.

Daneben betrachtet die Literaturanalyse von Takeda-Berger et al. (2020) die Jahre 2011 bis 2018 und die Verwendung Maschinellen Lernens zur Zeitermittlung. Entsprechend handelt es sich um analogische Methoden. Dabei überwiegt die Anwendung Neuronaler Netze und der Regressionsmethoden. Des Weiteren stellt die Analyse einen Anstieg dieser Methoden fest.(vgl. Takeda-Berger et al., 2020, S. 415f.)

Weitere Literatur, die unter anderem von Takeda-Berger et al. nicht berücksichtigt ist, wird mit Abbildung 3.3 veranschaulicht. Die Literatur beschäftigt sich mehrheitlich mit analogischen Methoden. In diesem Fall handelt es sich ebenfalls um die Anwendung von Neuronalen Netzen (vgl. Raaymakers und Weijters (2003), Chang et al. (2015) und Jong et al. (2019)) und von Regressionsmethoden (vgl. Wang et al. (2018)).

Daneben wird bei Favi et al. (2020) das Data Mining als analogische Methode im Kontext der Demontage betrachtet. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei der anderen Literatur um die Betrachtung der Fertigungs- und Produktionszeiten. Des Weiteren werden mit Ausnahme von Raaymakers und Weijters (2003) und Arkhipov et al. (2017) deterministische Ansätze betrachtet.

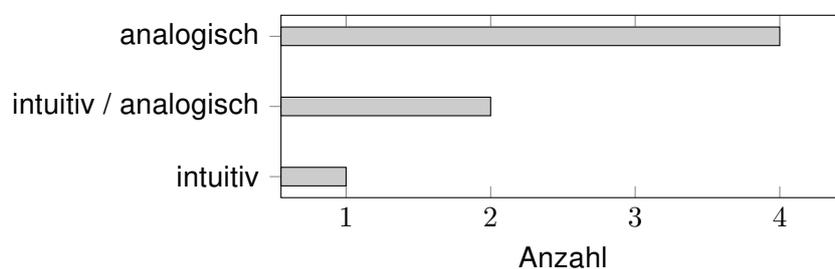


Abbildung 3.3.: Klassifizierung der Literatur bezüglich der Zeitermittlung

Eine vollständige Klassifizierung der Literatur ist im Anhang A nachlesbar.

4. Konzeptionelle Gestaltung

Im Folgenden wird auf die Konzeptionierung der zu entwickelnden Methode eingegangen. Dafür werden zu Beginn in Kapitel 4.1 die gegebenen Ontologien, sowie in Kapitel 4.2 die Anforderungen an die Methode thematisiert. Infolgedessen wird in Kapitel 4.3 ein Konzept ausgearbeitet.

4.1. Aufbau des bestehenden Wissensgraphen

Der Arbeit liegt ein Wissensgraph, der sich aus mehreren Ontologien modular zusammensetzt, zugrunde. Dieser Graph ist anhand der Verknüpfung der einzelnen Ontologien in seinem Aufbau mit Abbildung 4.1 dargestellt. Dabei stellt Manufacturing Technology Capabilities Ontology (ManOn) die zentrale Ontologie dar und ist folglich auch die Bezeichnung des Wissensgraphen. Des Weiteren werden Ontologien durch die Import-Reihenfolge unterschiedlich angereichert. Die Informationen werden sozusagen vererbt, sodass in diesem Fall ManOn-Scenario auf alle Daten der anderen dargestellten Ontologien zugreifen kann.

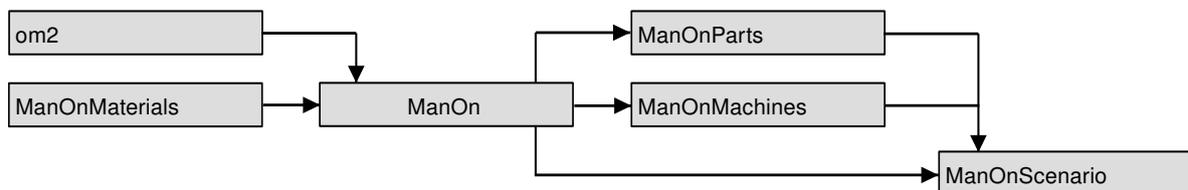


Abbildung 4.1.: Vereinfachte Darstellung der Import-Struktur des Wissensgraphen ManOn

Die Struktur ist vereinfacht dargestellt und fokussiert sich auf die in diesem Kontext relevanten Wissensgraph-Bestandteile. Für den weiteren Verlauf der Arbeit werden kurz die Ontologien in ihrer Verwendung differenziert.

Die Ontologien ManOnMaterials und om2 stellen sogenannte Upper-Ontologien dar und sind folglich in ihrer Funktionsweise unabhängig von anderen Ontologien. Dabei ist die Ontologie units of measure, genannt om2, eine freizugängliche Ontologie und stellt insbesondere Informationen über physikalische Einheiten bereit (vgl. Rijgersberg et al., 2013, S. 3). Dagegen ist die Ontologie ManOnMaterials ein Ergebnis des DPKidK-Projektes und stellt Informationen über Materialien bereit.

Als zentrale Ontologie liefert ManOn die allgemeine Wissensstruktur des Wissensgraphen und bildet somit die Grundlage für die Ontologien, die entsprechend auf ManOn aufbauen. Die auf ManOn aufbauenden Ontologien entsprechen folglich einer spezifischen Erweiterung von ManOn. Dabei werden mit ManOnParts insbesondere produktbezogene Daten und mit ManOnMachines maschinenbezogene Daten gespeichert.

Der ManOnScenario kommt in dem Kontext eine besondere Bedeutung zu. Mithilfe dieser Ontologie können verschiedene Produktkonfigurationen und Szenarien betrachtet werden.

Des Weiteren besteht die allgemeine Logik, dass ein Bauteil (ManOn:Part) anhand herzustellender Eigenschaften (ManOn:ManufacturingFeature), bspw. anhand einer Bohrung oder eines Gewinde, definiert ist.

Dabei wird ein solches Feature innerhalb eines Prozesses (ManOn:Process) an einer ausgewählten Maschine (ManOn:Machine) gefertigt. Daneben lässt sich das Feature anhand sogenannter Restriktionen (ManOn:ManufacturingRestriction) charakterisieren.

Bezogen auf das Beispiel einer Bohrung, wird das entsprechende ManOn:ManufacturingFeature einer Bohrung anhand einer ManOn:ManufacturingRestriction eines Durchmessers zuzüglich einer Einheit aus om2 näher beschrieben.

Der dargelegte Klassen-Zusammenhang ist mit Abbildung 4.2 verdeutlicht.

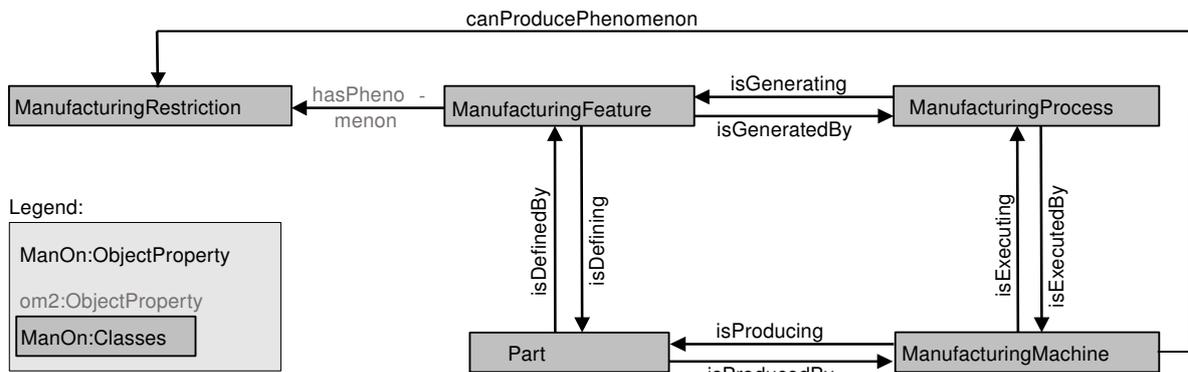


Abbildung 4.2.: Fertigungskomponente im Ontologie-Kontext(vgl. Köhler et al., 2021, S. 481)

Für diese Arbeit gelten die Ontologien mitsamt ihrer Struktur und Beziehungen als gegeben. Daneben ist für ein ManOn:Part die Zuordnung nach Abbildung 4.2 als gegeben anzusehen, sodass diese Informationen für die Methode verwendet werden können.

4.2. Entwicklung einer Methodik

Im Folgenden wird auf die Entwicklung der Methode eingegangen. Dafür wird zu Beginn der Konzeptionierung in Kapitel 4.2.1 der Lösungsraum durch vorbereitende Maßnahmen eingegrenzt. Zu diesen Maßnahmen zählt die Betrachtung der Ausgangslage, sowie die Aufstellung von Anforderungen und Bewertungskriterien. Infolgedessen werden in Kapitel 4.2.2 verschiedene Konzeptmöglichkeiten aufgestellt. Dadurch können durch Kombinieren der Optionen weitere Möglichkeiten abgeleitet werden, sodass nach der Bewertung der einzelnen Kombinationsmöglichkeiten der grundlegende Aufbau der Methode der Arbeit in Kapitel 4.2.3 ausgewählt werden kann.

Das beschriebene Vorgehen ist mit Abbildung 4.3 veranschaulicht und schließt mit einer Ausarbeitung des gewählten Konzeptes in Kapitel 4.3 ab.

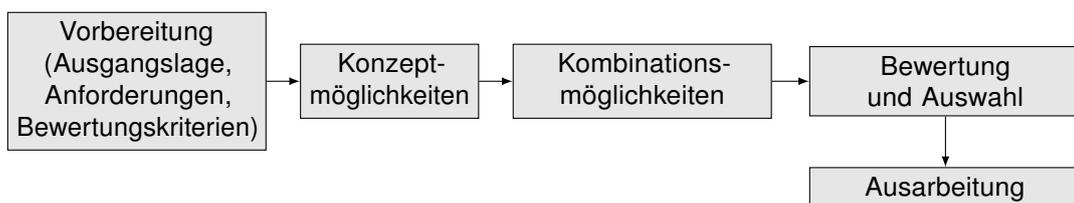


Abbildung 4.3.: Angewendetes Ablaufschemata für die Konzeptionierung

4.2.1. Anforderungen und Rahmenbedingungen

Der Algorithmus als Teil bzw. als Implementierung der Methode soll die Kosten und die Zeiten einer Produktneuentwicklung berechnen. Dabei soll die Berechnung mithilfe der Programmiersprache Python, dem Maschinellen Lernen und ggf. mit dem Data Mining umgesetzt werden. Außerdem liegt der Arbeit der zuvor erläuterte Wissensgraph ManOn zugrunde. Allerdings bestehen keine Instanzen, sodass die Methode auf Basis der Struktur und der grundsätzlichen Möglichkeiten der Datenverwendung des Wissensgraphen zu erstellen ist.

Zu Beginn der Arbeit stehen keine kosten- und zeitbezogenen Klassen zur Verfügung, sodass diese im späteren Verlauf mithilfe der Ontologie ManOnPerformance (vgl. Kapitel 5.1) integriert und für den Algorithmus zugänglich gemacht werden. Folglich basiert die Konzeptionierung auf der Annahme, dass diese Daten vorhanden sind.

Hinsichtlich der Funktionsweise des Algorithmus kann grundsätzlich zwischen einem top-down und einem bottom-up Ansatz unterschieden werden. Während ein top-down Ansatz insbesondere die Daten analysiert um Muster zu finden, werden bei einem bottom-up Ansatz Berechnungen und Abschätzungen basierend auf den Bestandteilen durchgeführt. Aufgrund der mangelnden Datengrundlage werden von vornherein datenlastige und demnach top-down Ansätze als ungeeignet eingestuft.

Die Kosten- und Zeitstrukturen sind im Allgemeinen für ein Neuprodukt umfassend und komplex. Der detaillierte Aufbau dieser Strukturen ist für die Kosten in Kapitel 2.1.2 und für die Zeiten in Kapitel 2.1.1 erläutert. Aufgrund dieser Komplexität und der damit verbundenen Vielzahl an Einflüssen sind die in dieser Arbeit betrachteten Kosten und Zeiten für die Implementierung im Algorithmus eingegrenzt. Im Folgenden wird sich auf die Fertigungskosten und -zeiten beschränkt. Dabei ist der Fokus auf der Fertigung als notwendig und eine Ausweitung auf die Herstellung, bspw. durch das Einbeziehen der Materialkosten, als optional anzusehen.

Des Weiteren ist für den Algorithmus gefordert, dass eine Betrachtung der Ähnlichkeit einer Produktneuentwicklung gegenüber Bauteilen, die in der Vergangenheit bereits gefertigt wurden, integriert wird. Diese Anforderung steht in einem direkten Bezug zu der traditionellen Such- und Ähnlichkeitkalkulation, sowie zu den Methoden der Ähnlichkeitsbestimmung aus dem Stand der Technik, siehe Kapitel 2.1.3 und Kapitel 3.2.

Für die nachfolgende Konzeptauswahl sind Bewertungskriterien erforderlich. Dabei ist für die Konzeptionierung eine Funktionsweise basierend auf dem Wissensgraphen essentiell. Daneben gilt aufgrund der nicht-vorhandenen Instanzen eine Implementierung mithilfe einer geringen Datengrundlage. Idealerweise führt das Einbeziehen weiterer Daten zu einer verbesserten Genauigkeit der Methode.

Vor allem durch den industriellen Kontext ist es wichtig, dass die Methode in ihrem Aufbau eine gewisse Transparenz ermöglicht um die generierten Ergebnisse in der Berechnung und den zugrundeliegenden Einflüssen nachvollziehen zu können. Dahingehend ist es von Vorteil, wenn sich die Methode für ähnliche Situationen weiterverwenden lässt.

Des Weiteren ist durch die Eingrenzung der Kosten- und Zeitart eine Erweiter- und Kombinierbarkeit hinsichtlich der vollständigen Betrachtung von Kosten und Zeiten eines Neuproduktes wünschenswert.

Infolgedessen soll mit dieser Arbeit ein ontologie-basiertes Kostenmodell zur Berechnung von Fertigungskosten und -zeiten zum Zeitpunkt der Entstehungsphase für Produktneuentwicklungen aufgestellt werden. Die zu entwickelnde Methode soll den folgenden drei Kern-Anforderungen unterliegen:

- Robustheit,
- Modularität und
- Transparenz.

Demnach soll die Methode robust im Sinne der Verwendbarkeit und Sensibilität der Daten, sowie kombinierbar hinsichtlich weiterer Bestandteile zur vollständigen Kosten- und Zeitberechnung von Neuprodukten und transparent in ihrem Aufbau, der Einflüsse und der entsprechenden Berechnungen sein.

4.2.2. Eingrenzungen der Konzeptmöglichkeiten

Anhand der im vorigen Kapitel dargelegten Anforderungen werden einzelne Entscheidungsbereiche näher betrachtet und anschließend die Konzeptmöglichkeiten abgeleitet.

Zu den grundlegenden Entscheidungen zählt, inwiefern Kosten und Zeiten getrennt oder gemeinsam betrachtet werden sollen. Aufgrund der prozessbezogenen Natur der Daten bzw. dem prozessbezogenem Aufbau des Wissensgraphen und der Fokussierung der Arbeit auf die Fertigung, können die fertigungsbezogenen Kosten und Zeiten in Anlehnung an die in Abbildung 2.4 und in Abbildung 2.2 dargestellten Strukturen vereinfacht auf das Rüsten und Bearbeiten reduziert werden. Infolgedessen wird der allgemeine Aufbau der Berechnungen von Kosten und Zeiten als analog angesehen und gemeinsam betrachtet.

Die Vereinfachung resultiert in weiteren Einschränkungen. Unter den rüstbezogenen Kosten werden folglich die Fertigungsgemeinkosten und unter den Kosten der Bearbeitung die Fertigungseinzelkosten verstanden. Während die rüstbezogenen Zeiten den Rüstzeiten und die Zeiten der Bearbeitung wiederum den Bearbeitungszeiten entsprechen sollen.

Für die Gesamtbetrachtung sind verschiedene Perspektiven möglich. So lassen sich die Kosten und Zeiten des Neuproduktes nur für die gemachte Eingrenzung oder über die Eingrenzungen hinaus aufstellen. Außerdem kann die Methode auf Komponenten-, Gruppen- und Produktebene basieren. Dabei wird in diesem Kontext eine Komponente mit einem Bauteil, dass sich nicht in weitere Bauteile unterteilen lässt, verstanden. Ein Bauteil, dass aus mehreren Komponenten zusammengesetzt wird, zählt in dem Verständnis in die Baugruppenebene, sodass in der Produktebene nur das vollständige Produkt und alle damit in Verbindung stehenden Kosten und Zeiten betrachtet werden. Dieses Verständnis von Produktebenen ist mit Abbildung 4.4 veranschaulicht.

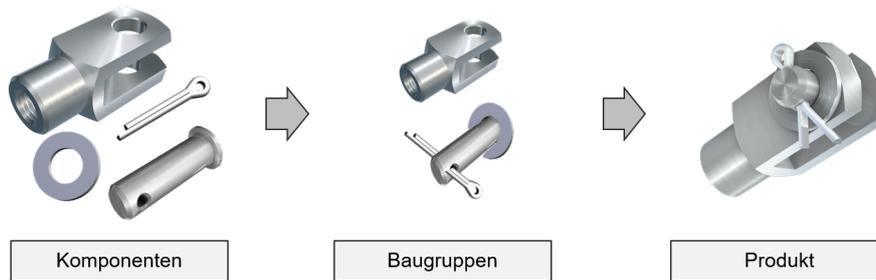


Abbildung 4.4.: Übersicht von Produktebenen

Durch die vorherige Eingrenzung auf die Fertigung ist die Komponentenebene die vornehmlich relevante Perspektive für die Konzeptauswahl. Dennoch sollen hinsichtlich der Anforderung der Modularität die anderen Ebenen bei den Entscheidungen berücksichtigt werden. Des Weiteren werden im Folgenden die Begriffe der Komponenten und Bauteile synonym verwendet.

An dieser Stelle kann das Einbeziehen der Materialkosten und die Entscheidung über die optionale Ausweitung auf die Herstellungskosten näher betrachtet werden. Die Materialien können sowohl auf der Komponenten- als auch auf der Baugruppenebene einbezogen werden. Diesbezüglich wird sich dafür entschieden, die Materialien auf der Baugruppenebene zu betrachten. Die Begründung liegt darin, dass bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Produktkosten und -zeiten die Option der externen Fertigung besteht. Im Falle dieser werden die resultierenden Beschaffungskosten einer Komponente Teil der Material- und nicht Teil der Fertigungskosten. Zudem werden Montagearbeiten in der Baugruppenebene als Fertigungskosten erfasst.

Hinsichtlich einer transparenten Gestaltung ist eine klare Trennung von Vorteil. Daher beschränkt sich im Folgenden die betrachtete Komponentenebene auf die Fertigung einer Komponente. Weitere Fertigungskosten, sowie die Material- und Beschaffungskosten werden der Baugruppenebene zugeordnet, sodass diese, im Sinne der Kostenberechnung, einer Betrachtung der Herstellkosten entspricht und die weiteren Gemeinkosten der Produktebene zugeordnet werden (vgl. die Kostenstruktur in Abbildung 2.4).

Die auf dem Wissensgraphen basierenden verfügbaren Daten lassen sich zu den folgenden drei Bereichen vereinfachen:

- Geometrie-,
- Maschinen- und
- Prozessdaten.

Die Geometriedaten äußern sich insbesondere in den geometrischen Daten von ManOn:Part und der dazugehörigen ManOn:ManufacturingFeature und ManOn:ManufacturingRestriction. Die Maschinen- und Prozessdaten ergeben sich aus der als vorhandenen anzunehmenden Zuordnung von ManOn:Machine und ManOn:Process zur Herstellung eines spezifischen ManOn:Part.

Infolgedessen können diese Daten miteinander in Bezug gesetzt werden. Die für den weiteren Verlauf definierte Hierarchie ist mit Abbildung 4.5 dargestellt.

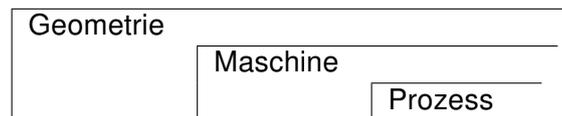


Abbildung 4.5.: Hierarchie und Rangordnung der verfügbaren Daten

Demnach gelten die Geometriedaten als oberste Hierarchie-Ebene zur Identifikation einer Komponente. Diese Hierarchie-Ebene wirkt sich dadurch maßgeblich auf die weiteren Ebenen aus. Die Hierarchie-Ebene der Maschinen wird dabei der Hierarchie-Ebene der Prozesse übergeordnet, da mehrere Prozesse auf einer Maschine durchgeführt werden können. Im Gegensatz dazu wird ein Prozess im Sinne eines Arbeitsschrittes auf einer Maschine oder einem Arbeitsplatz durchgeführt.

Diese Rangordnung wird für die Entscheidungen hinsichtlich der Konzeptionierung näher betrachtet. Die Ansatz-Richtungen werden an dieser Stelle nochmals aufgegriffen.

Die Geometriedaten können für einen Top-down Ansatz verwendet werden, sodass ausgehend von der Geometrie die Kosten und die Zeiten berechnet werden. Daneben können basierend auf den Prozesskosten und -zeiten die übergeordneten Maschinenkosten und -zeiten als bottom-up Ansatz berechnet werden. An dieser Stelle wird sich dazu entschieden diese beiden Herangehensweise zu kombinieren und in den nachfolgenden Konzeptmöglichkeiten in Kapitel 4.2.3 zu berücksichtigen.

Des Weiteren kann die zukünftige Methode einer Gesamtberechnung entsprechen oder aus mehreren Einzelberechnungen bestehen. Die Einzelberechnungen können wiederum unabhängig voneinander existieren oder sich gegenseitig bedingen. An dieser Stelle wird die Entscheidung getroffen, dass die Methode aus mehreren Bestandteilen, die miteinander in Verbindung stehen, aufgebaut wird. Der daraus resultierende modulare Aufbau steht somit im Zusammenhang mit dem im Kapitel 2.1.3 erwähnten Fehlerausgleich. Folglich soll durch diesen Aufbau der Gesamtfehler der Methode positiv beeinflusst werden.

Neben den getroffenen Konzeptentscheidungen ist der geforderte Ähnlichkeitsabgleich in die Hierarchie einzuordnen. Demnach lässt sich eine Ähnlichkeitsbetrachtung einmalig oder mehrmalig an verschiedenen Zeitpunkten der Methode durchführen.

An dieser Stelle wird sich dafür entschieden, den Ähnlichkeitsabgleich einmalig und möglichst frühzeitig durchzuführen. Dies liegt der Annahme zugrunde, dass eine einmalige Durchführung basierend auf dem Vergleich der Komponente mit bereits hergestellten Komponenten als ausreichend angesehen wird. Außerdem ermöglicht eine frühzeitige Auskunft über die Ähnlichkeit ein Einbeziehen dieser Information in weitere Berechnungen. Folglich wird hier bereits eine Berechnung alleinstehend auf Basis der Ähnlichkeit ausgeschlossen und ein integrierter Ansatz angestrebt. Dadurch soll ein Nutzen aus den weiteren zur Verfügung stehenden Informationen erzielt werden.

Nachfolgend werden die in diesem Kapitel erläuterten Anforderungen und Rahmenbedingungen für die Auswahl eines Konzeptes herangezogen.

4.2.3. Bewertung und Auswahl eines Konzeptes

Ausgehend von den Betrachtungen im vorherigen Kapitel wird ein integrierter Ansatz aus einer Ähnlichkeitsbetrachtung und einer weiteren Betrachtung der Maschinen- und Prozessdaten bevorzugt. Das daraus resultierende Konzept entspricht der in Abbildung 4.6 veranschaulichten Variante a). Die weiteren dargestellten Varianten b) bis g) stellen Alternativen zum präferierten Konzept dar.

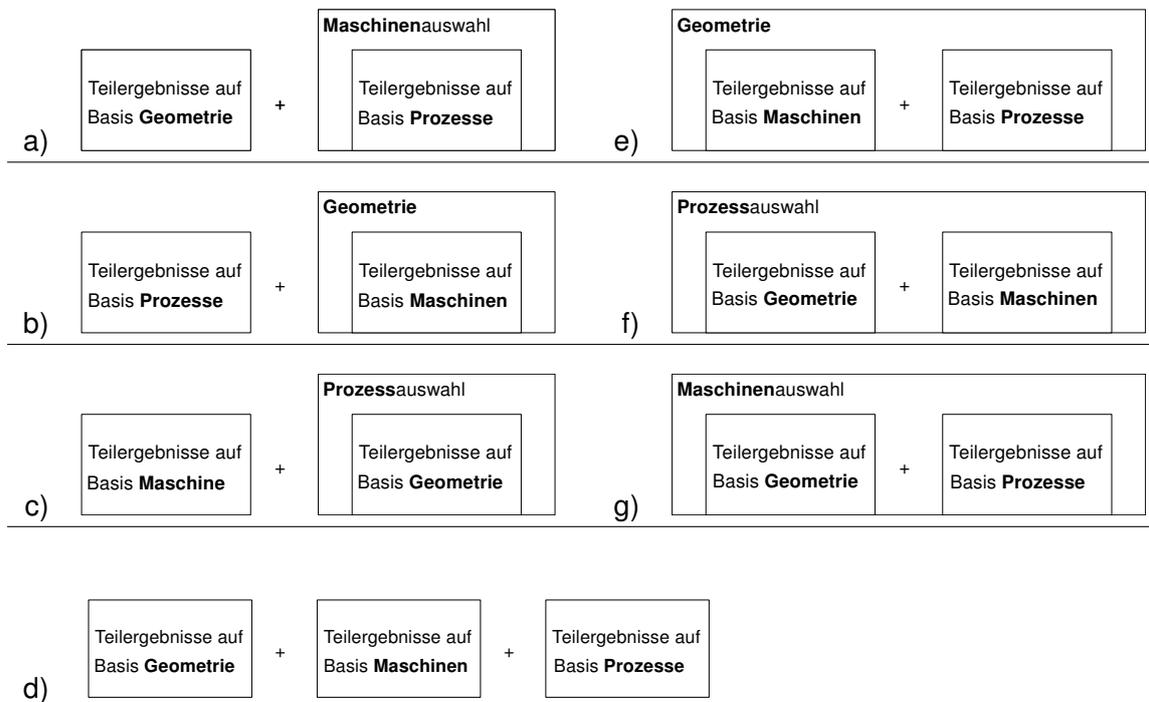


Abbildung 4.6.: Darstellung der Konzeptalternativen

Für ein besseres Verständnis werden die möglichen Konzeptansätze näher erläutert.

Das *Konzept a)* wurde bereits erwähnt und beschreibt eine Kosten- und Zeitberechnung basierend auf zwei Teilergebnissen. Dabei wird das erste Teilergebnis anhand der Geometriedaten und somit mithilfe eines Ähnlichkeitsabgleichs erzielt. Das zweite Teilergebnis wird mithilfe der Prozessdaten gewonnen, die durch eine Maschinenauswahl zuvor spezifiziert wurden.

Das *Konzept b)* beschreibt ebenfalls einen integrierten Ansatz mit zwei Teilergebnissen. Das erste Teilergebnis wird mithilfe der Prozessdaten und das Zweite wird mithilfe der Maschinendaten, die durch die Geometriedaten bzw. durch einen Ähnlichkeitsabgleich zuvor beeinflusst wurden, erzielt.

Das *Konzept c)* beschreibt einen integrierten Ansatz mit zwei Teilergebnissen. Das erste Teilergebnis wird auf Basis der Maschinendaten und das Zweite wird mithilfe der Geometriedaten bzw. einem Ähnlichkeitsabgleich erzielt. Dabei wurde das zweite Teilergebnis zuvor durch die Prozessdaten beeinflusst.

Das *Konzept d)* beschreibt einen integrierten Ansatz aus drei Teilergebnissen. In diesem Fall wird je Geometrie-, Maschinen- und Prozessdaten ein Teilergebnis erzielt.

Das *Konzept e)* beschreibt einen integrierten Ansatz aus zwei Teilergebnissen. Dabei werden beide Teilergebnisse vorab durch die Geometriedaten bzw. einem Ähnlichkeitsabgleich beeinflusst. Die Teilergebnisse werden mithilfe der Maschinen- und Prozessdaten erzielt.

Das *Konzept f)* beschreibt einen integrierten Ansatz aus zwei Teilergebnissen. Die Teilergebnisse werden zuvor durch die Prozessdaten beeinflusst. Danach werden die Geometrie- und Maschinendaten herangezogen.

Das *Konzept g)* beschreibt einen integrierten Ansatz aus zwei Teilergebnissen. Die Teilergebnisse werden in diesem Fall vorab durch die Maschinendaten beeinflusst. Danach werden die Teilergebnisse mithilfe der Geometrie- und Prozessdaten erzielt.

Im Folgenden werden diese Alternativen gegenübergestellt und ein Konzept ausgewählt.

Die Konzepte b), c), d) und e) werden ausgeschlossen, da Maschinen- und Prozessinformationen deutlich miteinander in Verbindung stehen und eine Verknüpfung der Informationen innerhalb der Berechnung zu einem höheren Informationsgehalt führen kann.

Zwischen f) und g) ist aufgrund der Hierarchie und der Verknüpfung von Maschinen- und Prozessdaten das Konzept g) zu bevorzugen.

Für diese Arbeit wird das Konzept a) ausgewählt. Dadurch sollen die Abhängigkeiten zwischen den Maschinen- und Prozessdaten für die Berechnung ausgenutzt, sowie mit einem erforderlichen Ähnlichkeitsabgleich mithilfe der Geometriedaten verknüpft werden. Gegenüber dem Konzept g) wird dabei ein Ähnlichkeitsabgleich als einflussreicher eingestuft.

Hinsichtlich der Auswahl des allgemeinen Aufbaus wird das ausgewählte Konzept mit der Abbildung 4.7 veranschaulicht.

Folglich lässt sich der Ansatz bzw. die Methode in drei Bereiche unterteilen:

- Ähnlichkeitsanalyse,
- Prozessanalyse und
- finale Berechnung mithilfe eines Korrekturfaktors.

Die eigentliche Berechnung der Kosten und Zeiten erfolgt in der Prozessanalyse. Die Ähnlichkeitsanalyse soll dazu dienen im Vergleich zu der neuentwickelten Komponente ähnliche bereits in der Vergangenheit gefertigte Komponenten finden.

Dieser Auswahl an ähnlichen Bauteilen liegt die Annahme zugrunde, dass ein Bauteil mit einer hohen Ähnlichkeit gegenüber der Neuentwicklung eine entsprechende Ähnlichkeit in der Kosten- und Zeitstruktur besitzt. Dieser Grundgedanke entspricht der Ähnlichkeitkalkulation (vgl. Kapitel 2.1.3).

In diesem Zusammenhang sollen mit der Ähnlichkeit, die berechneten Ergebnisse beurteilt und angepasst werden. Dafür wird für die Auswahl an ähnlichen Komponenten die Prozessanalyse und damit die Kosten- und Zeitberechnung ebenfalls durchgeführt.

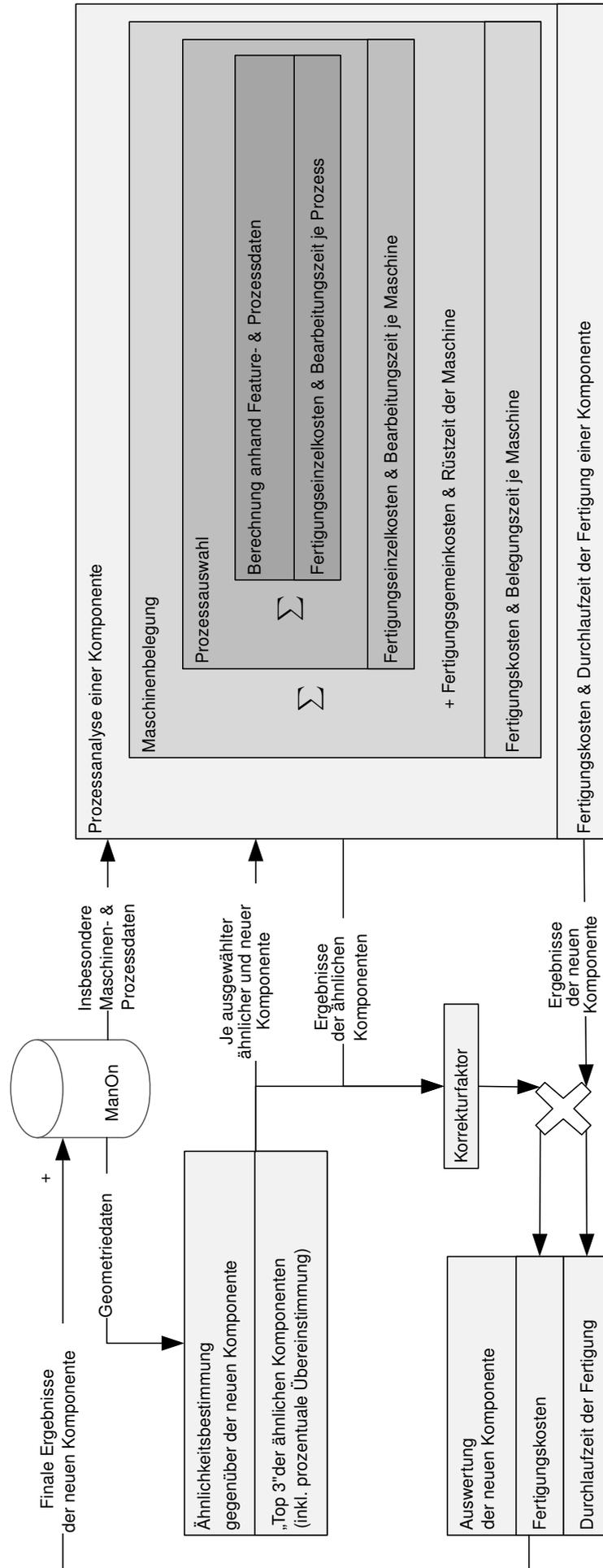


Abbildung 4.7.: Aufbau des ausgewählten Konzeptes

Folglich bestehen für die neue Komponente die ermittelten Kosten. Für die ähnlichen Komponenten bestehen sowohl die ermittelten Kosten als auch die Istkosten. Im Idealfall stimmen somit die ermittelten Kosten der ähnlichen Komponenten mit den Istkosten der ähnlichen Komponenten überein.

In Bezug zu der Komplexität von Kosten- und Zeitermittlung ist eine exakte Übereinstimmung sehr unwahrscheinlich. Zudem ist für die Übereinstimmung eine detaillierte und aussagekräftige Datengrundlage notwendig. Daher sollen die ermittelten Ergebnisse der ähnlichen Komponenten mit den dazugehörigen Ist-Ergebnissen verglichen werden. Führt die Berechnung für eine gewisse Gruppe an Bauteilen zu bspw. Unterschätzungen, so ist die Annahme, dass auch die neue Komponente unterschätzt wird. Ein Korrekturfaktor soll an dieser Stelle die Unterschätzung wahrnehmen und die ermittelten Ergebnisse der neuen Komponente mit einem Aufschlag versehen, sodass diese Ergebnisse eine geringere Abweichung aufweisen.

Die Methode resultiert in der Berechnung der Kosten analog zu Gleichung 4.1. Der dazugehörige Korrekturfaktor der Kosten ist mit Gleichung 4.2 definiert.

$$\hat{c}_k = s_c \cdot \sum_{m=1}^n \left(\hat{c}_{m,gemein} + \sum_{p=1}^u \hat{c}_{mp,einzel} \right) \quad (4.1)$$

| | |
|-----------|----------------------------|
| \hat{c} | ermittelte Kosten |
| k | neue Komponente |
| m | Maschine für 1...n |
| p | Prozess für 1...u |
| s_c | Korrekturfaktor der Kosten |

$$s_c = 1 + \frac{1}{j} \cdot \sum_{a=1}^j \left(f_{ka} \cdot \left(1 - \frac{\hat{c}_a}{c_a} \right) \right) \quad (4.2)$$

| | |
|-------------|-------------------------------|
| s_c | Korrekturfaktor der Kosten |
| k | neue Komponente |
| a | ähnliche Komponente für 1...j |
| f_{ka} | Ähnlichkeitsfaktor k zu a |
| \hat{c}_a | ermittelte Kosten von a |
| c_a | Istkosten von a |

Aufgrund der Parallelität der Berechnungen der Fertigungskosten und -zeiten, wird die Berechnung der Zeiten analog durchgeführt und ist mit Gleichung 4.3 verdeutlicht. Der zugehörige Korrekturfaktor ist mit Gleichung 4.4 gegeben.

$$\hat{t}_k = s_t \cdot \sum_{m=1}^n \left(\hat{t}_{m,rüst} + \sum_{p=1}^u \hat{t}_{mp,bearbeitung} \right) \quad (4.3)$$

| | |
|-----------|----------------------------|
| \hat{t} | ermittelte Zeiten |
| k | neue Komponente |
| m | Maschine für 1...n |
| p | Prozess für 1...u |
| s_c | Korrekturfaktor der Zeiten |

$$s_t = 1 + \frac{1}{j} \cdot \sum_{a=1}^j \left(f_{ka} \cdot \left(1 - \frac{\hat{t}_a}{t_a} \right) \right) \quad (4.4)$$

| | |
|-------------|-------------------------------|
| s_c | Korrekturfaktor der Zeiten |
| k | neue Komponente |
| a | ähnliche Komponente für 1...j |
| f_{ka} | Ähnlichkeitsfaktor k zu a |
| \hat{t}_a | ermittelte Zeiten von a |
| t_a | Istzeiten von a |

4.3. Ausarbeitung der Konzeptbestandteile

Im Folgenden wird auf die Konzept-Bestandteile näher eingegangen. Mit Kapitel 4.3.1 wird die Ähnlichkeitsanalyse und mit Kapitel 4.3.2 die Prozessanalyse spezifiziert. Auf die Auswertung mit dem Korrekturfaktor wird nicht näher eingegangen. Diesbezüglich gelten die zuvor dargestellten Zusammenhänge als ausreichend detailliert beschrieben.

4.3.1. Festlegung eines Ähnlichkeitsmaßes

Für die Durchführung der Ähnlichkeitsanalyse wird ein Ähnlichkeitsmaß benötigt. In Kapitel 2.1 wurde bereits auf die allgemeine Bestimmung von Ähnlichkeit eingegangen. Die dort beschriebenen Abhängigkeiten eignen sich insbesondere für skalierte und variierte Bauteile. In diesem Fall werden insbesondere Neuentwicklungen der Einzelfertigung betrachtet, sodass Ansätze zum Vergleich deutlicher abweichender Bauteilgeometrien notwendig sind.

Mit Kapitel 3.2 wurde auf moderne Ansätze eingegangen. In dieser Arbeit werden die folgenden Ansätze in Betracht gezogen:

- Ähnlichkeit durch Clusterzuordnung,
- Ähnlichkeit mithilfe einer Distanzberechnung und
- semantische Ähnlichkeit.

Bei der Clusterzuordnung werden die bereits in der Vergangenheit gefertigten Bauteile gruppiert bzw. geclustert. Dadurch befinden sich in einem Cluster ähnliche Bauteile. Das neue Bauteil wird daraufhin einem Cluster zugeordnet.

Im Kontext des Konzeptes ist es weniger wichtig, welche Cluster existieren und zu welchem das neue Bauteil gehört. Dagegen ist es von Bedeutung, die ähnlichsten Bauteile unabhängig ihrer Clusterzuordnung zu erkennen. Zudem wird bei einer Anwendung des Clustering eine nachrangige Ähnlichkeitsbestimmung benötigt, da die ähnlichen Bauteile anhand dieses Ansatzes extrahierbar sind, der gewünschte Ähnlichkeitswert aus dem Clustering allerdings nicht direkt hervorgeht.

Analog zu Kretschmer et al. können neben oder als Kombination mit dem Clustering Distanzmetriken zur Ähnlichkeitsbestimmung herangezogen werden. Infolgedessen wird eine Distanz als Ähnlichkeitsmaß interpretiert.

Betrachtet man die Berechnung der Ähnlichkeit bspw. anhand der Anzahl an vorhandenen Feature von Bauteilen, so sind die Vektoren der Bauteile durch diese Feature definiert. Aufgrund der übereinstimmenden Einheiten sind diese Vektoren nicht zu normieren und eine Distanzberechnung direkt anwendbar. Für eine fiktive Auswahl an solchen Vektoren werden mit Tabelle 4.1 bis Tabelle 4.3 verschiedene Distanzmaße miteinander verglichen.

Tabelle 4.1.: Generierte Werte für Szenario 1 der Vergleiche von Distanzmetriken

| Feature | Bauteil 1 | Bauteil 2 | Bauteil 3 | Bauteil 4 | Bauteil 5 | Bauteil 6 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ID 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ID 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| ID 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| ID 4 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| ID 5 | 7 | 7 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| ID 6 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ID 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ID 8 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ID 9 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| ID 10 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 0 |
| ID 11 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| ID 12 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| ID 13 | 79 | 79 | 79 | 79 | 79 | 0 |
| ID 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| ID 15 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 0 |

Tabelle 4.2.: Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 1

| Distanzmetrik | 1 vs. 1 | 2 vs. 1 | 3 vs. 1 |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| RBF Kernel | 1.0000 | 0.1889 | 0.1653 |
| Cosine Distanz | 0.0000 | 0.0018 | 0.0020 |
| Linear Kernel | 6943.0000 | 6918.0000 | 6916.0000 |
| Polynomial Kernel | 99811250.3443 | 98739249.8480 | 98653822.9603 |
| Sigmoid Kernel | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Laplacian Kernel | 1.0000 | 0.7165 | 0.6271 |

Tabelle 4.3.: Fortsetzung Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 1

| Distanzmetrik | 4 vs. 1 | 5 vs. 1 | 6 vs. 1 |
|-------------------|---------------|----------------|---------|
| RBF Kernel | 0.0011 | 0.0010 | 0.0000 |
| Cosine Distanz | 0.0074 | 0.0075 | 0.9880 |
| Linear Kernel | 6841.0000 | 6839.0000 | 1.0000 |
| Polynomial Kernel | 95485768.8936 | 95402229.29304 | 1.2136 |
| Sigmoid Kernel | 1.0000 | 1.0000 | 0.7882 |
| Laplacian Kernel | 0.2636 | 0.2307 | 0.0001 |

Da es in diesem Fall nicht von Bedeutung ist, um welche Feature es sich handelt, werden diese nur durch einen Index definiert. Daneben zeichnet sich das dargestellte Szenario dadurch aus, dass die jeweiligen Feature bei den Bauteilen entweder mit der gleichen Anzahl oder gar nicht vorhanden sind. Dadurch lässt sich eine Ground Truth ableiten. Folglich sollte anhand der Distanzmetriken eine Reihenfolge hinsichtlich der Bauteile ableitbar sein. Werden die aufgeführten Bauteile mit dem Bauteil eins verglichen, so sollte Bauteil zwei die höchste Übereinstimmung besitzen. Danach folgen in absteigender Reihenfolge Bauteil drei, vier, fünf und sechs. Das Bauteil sechs sollte eine sehr geringe Ähnlichkeit aufweisen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die laplacian Kernel-Distanz zu guten Ergebnissen führt und die Ergebnisse im Gegensatz zu anderen Metriken mehr auf den Bereich zwischen 0 und 1 verteilt sind. Daneben kann die Distanz ohne weitere Umwandlung als relatives Ähnlichkeitsmaß verwendet werden. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 4.5 (Rupp, 2015, S. 1062).

$$\text{kernel}(\vec{x}, \vec{y}) = \exp\left(-\frac{\|\vec{x} - \vec{y}\|_1}{\sigma}\right) \quad (4.5)$$

- \vec{x} Objekt 1
- \vec{y} Objekt 2
- σ Hyperparameter bzgl. der Längenskala

Des Weiteren lässt sich die semantische Ähnlichkeit in Betracht ziehen. Im engeren Sinne handelt es sich bei diesem Maß um die Jaccard-Distanz. Demnach basiert eine solche Ähnlichkeit auf dem Erkennen einer vollständigen oder einer nicht vorhandenen Ähnlichkeit. In Bezug zu einer Anwendung basierend auf einer Ontologie und in einem Bauteil-Kontext bestehen insbesondere die in Kapitel 3.2 erläuterten Untersuchungen von Lu et al..

Folglich besteht ein solches semantisches Ähnlichkeitsmaß in Anlehnung aus einer Ähnlichkeit bezüglich der sogenannten Description und Relationship. Beide Ähnlichkeiten führen gewichtet zu der resultierenden Ähnlichkeit. Des Weiteren lassen sich die beiden Teil-Ähnlichkeiten auf den Zusammenhang von Tversky zurückführen. Die Gesamtberechnung ist mit Gleichung 4.7 veranschaulicht (Lu et al., 2016, S. 451). Die Ähnlichkeitsbestimmung nach Tversky in Gleichung 4.6 verdeutlicht (Lu et al., 2016, S. 453).

$$Sim_{Tversky}(T_1, T_2) = \frac{f(S(A_{T1})) \cap S(A_{T2})}{f(S(A_{T1}) \cap S(A_{T2})) + \phi \cdot f(S(A_{T1}) \setminus S(A_{T2})) + \psi \cdot f(S(A_{T2}) \setminus S(A_{T1}))} \quad (4.6)$$

| | |
|------------|--------------------------------|
| <i>Sim</i> | Similarity bzw. Ähnlichkeit |
| <i>T</i> | betrachtetes Objekt |
| <i>A</i> | Attribute |
| <i>S</i> | Set bzw. Datensatz |
| ϕ | Gewicht der Abweichung ggü. T1 |
| ψ | Gewicht der Abweichung ggü. T2 |

$$Sim_{Lu}(C_1, C_2) = w_1 \cdot Sim_{description}(D_{C1}, D_{C2}) + w_2 \cdot Sim_{relationship}(R_{C1}, R_{C2}) \quad (4.7)$$

| | |
|------------|--|
| <i>Sim</i> | Similarity bzw. Ähnlichkeit |
| <i>C</i> | Bauteil |
| <i>D</i> | Feature |
| <i>R</i> | Feature Nachbarn |
| w_1 | Gewicht der Ähnlichkeit der Feature |
| w_2 | Gewicht der Ähnlichkeit der Feature Nachbarn |

Die semantische Ähnlichkeit hat den Vorteil, dass sie die Ontologie und die daran abgelegten semantischen Beziehungen des Bauteils miteinbezieht. Des Weiteren lässt sich die Ähnlichkeit bspw. nach Lu et al. anhand von Gewichtungen optimieren.

Demgegenüber können die Restriktionen des Bauteils und der Feature nicht qualitativ berücksichtigt werden. Für die Ähnlichkeit zwischen Restriktionen ist demnach eine Distanzberechnung besonders geeignet.

Infolgedessen wird in dieser Arbeit ein Ähnlichkeitsmaß basierend auf dem semantischen Ähnlichkeitsmaß von Lu et al. und der laplacian Kernel-Distanz definiert und angewendet.

4.3.2. Festlegung einer Regressionsmethode

Während zuvor auf die Ähnlichkeitsanalyse des Konzeptes näher eingegangen wurde, wird im Folgenden die Prozessanalyse thematisiert.

Streng genommen handelt es sich bei der Prozessanalyse um einen integrierten Ansatz. Die äußere Struktur, die mit Abbildung 4.7 dargestellt ist, entspricht dabei einem analytischen Ansatz. Die Ermittlung der prozessbezogenen Fertigungskosten und -zeiten wird durch einen weiteren Ansatz durchgeführt. In diesem Kapitel soll der weitere Ansatz ausgearbeitet werden.

Entsprechend der Anforderungen aus Kapitel 4.2.1 ergeben sich mit dem Maschinellen Lernen und dem Data Mining Möglichkeiten für den weiteren Ansatz. Im Zusammenhang mit der Tabelle 3.2 zählt das Data Mining als unabhängige Methode zu den intuitiven Ansätzen.

Daneben können nach Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4 analogische Ansätze, insbesondere die Regressionsmethoden und die Neuronale Netze, in Betracht gezogen werden. Aufgrund der nicht vorhandenen Instanzen wird von dem DM als intuitiver Ansatz abgesehen.

In Anlehnung an die Untersuchungen von Raaymakers und Weijters ist ein Vorteil der Regressionsmethoden, dass die Modellbeziehungen analysierbar sind und somit eine gewisse Nachvollziehbarkeit vorliegt. Dagegen ist ein Vorteil der Neuronalen Netze, dass diese komplexe nicht-lineare Zusammenhänge besonders gut erkennen können. (vgl. Raaymakers und Weijters, 2003, S. 15)

Für die Durchführung einer Zeitermittlung wird eine Regressionsmethode einem Neuronalen Netz bevorzugt, sofern die Nachvollziehbarkeit von besonderer Bedeutung ist (vgl. Raaymakers und Weijters, 2003, S. 29). Dieser Zusammenhang wird unter anderem von Kurasova et al. für die Durchführung einer Kostenermittlung bestätigt.

Im Folgenden wird die Regressionsmethode als analogischer Ansatz für die Berechnung der Fertigungskosten und der Durchlaufzeit der Fertigung in der Prozessanalyse ausgewählt. Daneben ist bezüglich des Frameworks aus Kapitel 3.3 der Ansatz deterministisch oder stochastisch umzusetzen. An dieser Stelle wird sich für eine stochastische Regressionsmethode entschieden. Dadurch soll die Unsicherheit der Ergebnisse berücksichtigt werden. Da die Kosten und Zeiten einer Mehrzahl an Faktoren unterliegen, ist es unwahrscheinlich, dass der ausgegebene Wert eines solchen Modells der Wirklichkeit entsprechen wird. Folglich ist es wichtiger, dass das Kostenmodell der Arbeit einen Bereich liefert, in dem sich die Kosten und Zeiten befinden werden. Je nach Ungewissheit der Kosteneinflüsse und Variabilität der historischen Daten ist demnach ein unterschiedlich großes Intervall der Fertigungskosten und -zeiten zu erwarten.

In Anlehnung an das Kapitel 2.3 und dem mit Abbildung 2.5 dargestellten Vorgehen sind für die Anwendung dieses Ansatzes verschiedene Phasen zu durchlaufen. Zu Beginn sind folglich die Daten auszuwählen und aufzubereiten. Zudem ist bei Anwendung eines Modells, dieses vorerst zu trainieren und danach für die Prognose neuer Daten heranzuziehen. Abschließend sind die Ergebnisse zu bewerten und ggf. weiterzuverarbeiten.

Für die Berechnungen werden die Daten des analysierten Bauteils mit den Daten der bereits gefertigten Bauteile verglichen. Dabei entspricht ein Datensatz im Folgenden der Fertigung eines ManOn:ManufacturingFeature eines ManOn:Part. Der Datensatz enthält sowohl Informationen über die Zuordnungen von ManOn:Machine und ManOn:Process als auch über das zu fertigende Feature.

Aufgrund der Wahl einer stochastischen Regressionsmethode soll für die Berechnung die Regression basierend auf der Methode der kleinsten Quadrate, englisch Ordinary Least Square (OLS), implementiert werden. Diese lineare Regression ist für nicht-lineare Zusammenhänge und mehrere Eingangsvariablen konfiguriert.

Innerhalb der Prozessanalyse sind vier Regression durchzuführen. Bei diesen Regressionen handelt es sich um die Regressionen auf Maschinen- und auf Prozessebene. Diese werden jeweils für die Kosten und die Zeiten durchgeführt.

In dieser Arbeit wird vereinfacht festgelegt, dass jede Regression mit der OLS-Regression durchgeführt wird.

Um auf ein Ergebnis der Prozessanalyse zu kommen, sind die vier Regressionsergebnisse im Sinne einer Ergebnisverarbeitung zusammenzubringen. Die Verknüpfung der Ergebnisse entspricht der Umsetzung der Gleichung 4.1 bzw. der Gleichung 4.3, jeweils abzüglich der Multiplikation des Korrekturfaktors.

Bezüglich der Bestandteile der Gleichungen entsprechen jede ermittelten Fertigungskosten bzw. -zeiten einem ermittelten Konfidenzintervall des entsprechenden Regressionsmodells. Das Verknüpfen der Regressionsergebnisse entspricht folglich dem prognostizierten Fertigungsablauf.

Bei dem Ergebnis der Prozessanalyse handelt es sich wiederum um ein Konfidenzintervall, das für das neue Bauteil mit Hinzunahme des Korrekturfaktor zu dem finalen Ergebnis der entwickelten Methode führt.

5. Implementierung

Im Folgenden wird in Kapitel 5.1 auf eine Ontologie zur Bereitstellung von Kosten und Zeiten eines Produktes eingegangen. Danach folgt in Kapitel 5.2 die Erläuterung der Umsetzung und Implementierung des in Kapitel 4 vorgestellten Konzeptes. Abschließend werden in Kapitel 5.3 die Ergebnisse des Algorithmus anhand eines erstellten Testdatensatzes näher betrachtet.

5.1. Aufbau der Ontologie ManOnPerformance

Der zugrundeliegende Wissensgraph der Arbeit, der mit Kapitel 4.1 näher beschrieben ist, beinhaltet zum Zeitpunkt der Arbeit, wie bereits erwähnt, keine Informationen über die Kosten und Zeiten eines Produktes. Allerdings sind diese notwendig für die Implementierung des zuvor vorgestellten Kostenmodells. Infolgedessen wird in diesem Kapitel auf eine Erweiterung des Wissensgraphen um eine Ontologie mit den entsprechenden Klassen eingegangen.

Ziel der Erweiterung ist es vor allem die für den Algorithmus notwendigen Kosten und Zeiten mit den vorhandenen Klassen zu verknüpfen. Dabei ist es in Bezug zu Kapitel 4.2.1 gefordert, dass sowohl die Istkosten als auch die ermittelten Kosten hinterlegt werden können. Ebenso sollte die Erweiterung möglichst allgemeingültig sein, sodass diese für weitere kosten- und zeitrelevanten Anwendungen verwendet werden kann. Insbesondere die Möglichkeit zur Ausarbeitung der Methode sollte gegeben sein.

Die Ontologie wird folglich ManOnPerformance genannt, da die Kosten und Zeiten ausschlaggebend für die Leistungsbewertung eines Produktes sind. In diesem Kontext ist es insbesondere die Bewertung von Neuentwicklungen zum Abwägen von Design-Alternativen.

Des Weiteren wird die Ontologie im Wissensgraph analog zu ManOnMaterials in ManOn importiert, sodass die Ontologien ManOnParts, ManOnMachines und ManOnScenario indirekt auf ManOnPerformance zugreifen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.1 als Erweiterung der Abbildung 4.1 veranschaulicht.

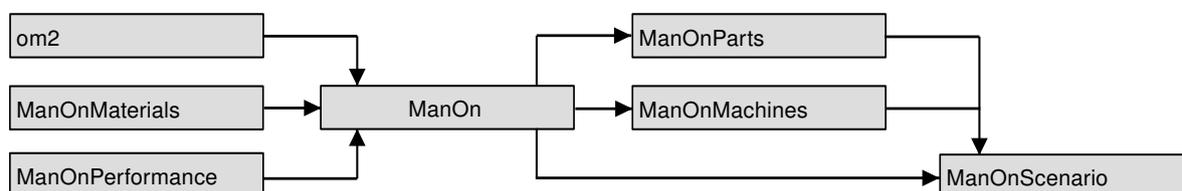


Abbildung 5.1.: Erweiterte Darstellung der Import-Struktur des Wissensgraphen ManOn

In Anlehnung an die in Kapitel 2.1.1 und Kapitel 2.1.2 erläuterten Zusammenhänge sind die Strukturen in die Ontologie ManOnPerformance integriert und mit Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3 veranschaulicht. Dabei sollen die Strukturen möglichst allgemeingültig und unabhängig vom Kontext des Konzeptes sein. Folglich ist bspw. bei der Zeitstruktur eine Differenzierung zwischen Maschine und Arbeiter vorgesehen. Des Weiteren soll die Zeitstruktur sowohl für die DLZ der Fertigung als auch für die DLZ eines Auftrages anwendbar sein.

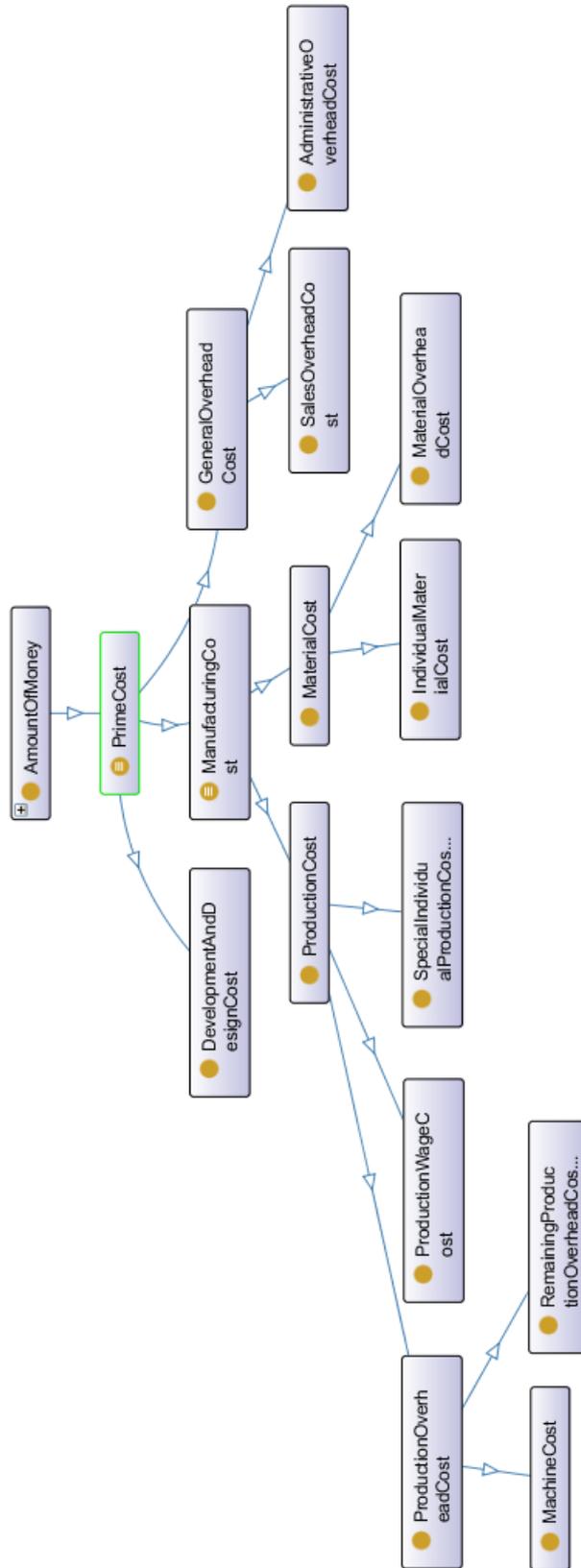


Abbildung 5.2.: Implementierung der Kostenstruktur in ManOnPerformance

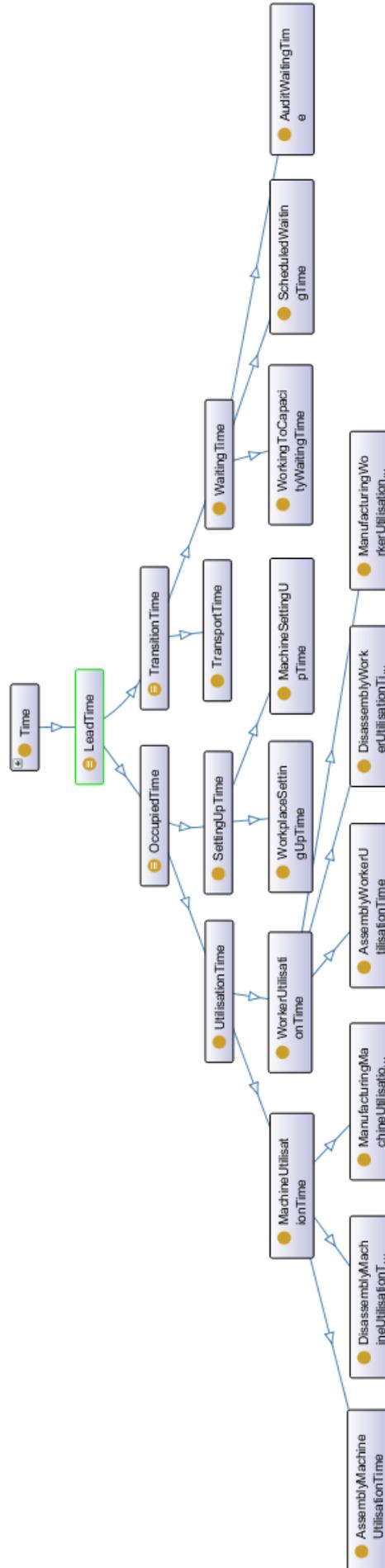


Abbildung 5.3.: Implementierung der Zeitstruktur in ManOnPerformance

Die Differenzierung hinsichtlich ermittelter Kosten bzw. Zeiten und Istkosten bzw -zeiten wird dadurch erzielt, dass die Instanzen sowohl der entsprechenden Klasse einer Struktur als auch der Klasse `ManOnPerformance:CostQuality` bzw. `ManOnPerformance:TimeQuality` zugeordnet werden. Folglich ist eine ermittelte Fertigungskosten-Instanz bspw. der Klasse `ManOnPerformance:ProductionCost` und der Instanz `Estimated` der Klasse `ManOnPerformance:CostQuality` zugeordnet.

In Zusammenhang mit der Abbildung 4.4 und den dazugehörigen Beziehungen werden den Produktebenen verschiedene Bestandteile der Strukturen zugeordnet. In dem Kontext der Arbeit entspricht `ManOn:Part` einer Komponente und kann diesbezüglich insbesondere mit `ManOnPerformance:ProductionCost` und `ManOnPerformance:LeadTime` angereichert werden.

5.2. Programmierung des Algorithmus

Anhand des erweiterten Wissensgraphen und der mit Kapitel 4.3 erläuterten Konzeptausarbeitung wird mit der Programmiersprache Python ein Algorithmus programmiert. Dieser stellt folglich die Implementierung des zu entwickelnden Kostenmodells dar.

Im Folgenden wird in Kapitel 5.2.1 auf den allgemeinen Aufbau des Algorithmus eingegangen und nachfolgend auf die Funktionen der einzelnen Bestandteile. Infolgedessen behandelt das Kapitel 5.2.2 die Ähnlichkeitsanalyse, das Kapitel 5.2.3 die Prozessanalyse und das Kapitel 5.2.4 den finalen Teil des Konzeptes inklusive der Berechnung des Korrekturfaktors.

5.2.1. Allgemeine Funktionsweise

In diesem Kapitel wird der allgemeine Aufbau und die übergeordnete Funktionsweise des Algorithmus erläutert.

Für die Programmierung sowie für die Anwendung des Algorithmus sind die Anforderungen festzuhalten. Folglich basiert der Algorithmus auf den aufgeführten Python-Bibliotheken:

- `numpy` (Version 1.20.3)
- `pandas` (Version 1.2.4)
- `scikit-learn` (Version 1.0)
- `owlready2` (Version 0.35)
- `statsmodels` (Version 0.13.0)

Daneben wird die Struktur des Algorithmus in der Dateistruktur widergespiegelt. Diese Struktur ist mit Abbildung 5.4 dargestellt.

Auf der obersten Ebene liegt mit `main.py` die auszuführende Datei, sowie mit `estimator.py` die Datei mit der obersten Ebene des Algorithmus. In der Datei `parameter.py` sind die Parameter des Algorithmus festgehalten und können entsprechend an dieser Stelle angepasst werden.

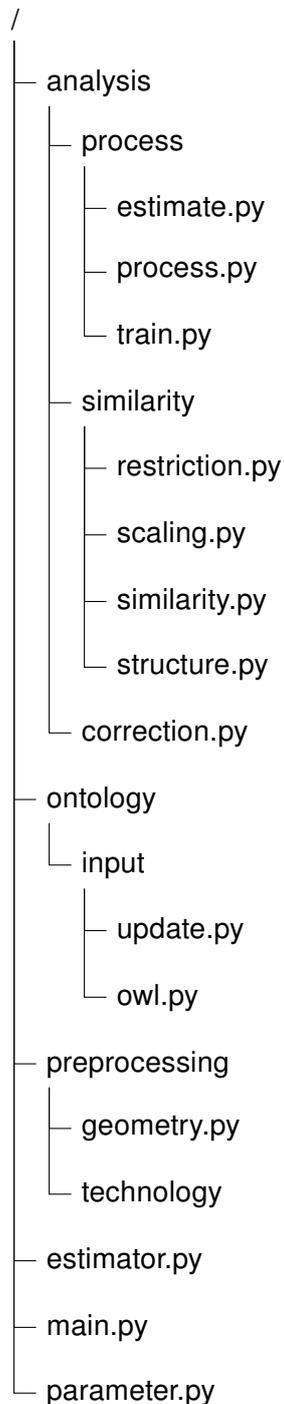


Abbildung 5.4.: Ordner- und Dateistrukturbaum des Kostenmodells

Zudem befinden sich die Ordner *analysis*, *ontology* und *preprocessing* auf der obersten Ebene der Ordner- und Dateistruktur.

Der Ordner *preprocessing* enthält die Hilfsdateien zur Aufbereitung der verwendeten Daten des Wissensgraphen und der Ordner *ontology* enthält wissensgraph-bezogene Hilfsdateien. Mit dem Ordner *analysis* werden die Dateien bezüglich der Ähnlichkeitsanalyse, die wiederum dem Ordner *similarity* zugeordnet sind, und die Dateien bezüglich der Prozessanalyse, die dem Ordner *process* zugeordnet sind, bereitgestellt. Dabei ist die Datei *correction.py* auf den Korrekturfaktor bezogen und ebenfalls dem Ordner *analysis* zugeordnet.

Wie bereits erwähnt wird der Algorithmus mit main.py ausgeführt. In dieser Datei werden die zu betrachtenden neuen Bauteile anhand der zugehörigen Instanz-Benennung aus ManOn:Part definiert. Daraufhin werden diese Benennungen an den Algorithmus übergeben und für jedes dieser Bauteile die Fertigungskosten und -zeiten berechnet. Die Ergebnisse werden dabei sowohl dem Wissensgraphen zurückgespielt als auch über die Konsole an den Nutzer weitergegeben. Dieser Ablauf ist mit Abbildung 5.5 verdeutlicht.

```
(1) Führe den Algorithmus aus
    for Bauteil in [betrachtete neue Bauteile]:
        (a) berechne Fertigungskosten und Durchlaufzeit Fertigung (Bauteil)
        (b) speichere berechnete Ergebnisse

return berechnete Ergebnisse
```

Abbildung 5.5.: Benutzeranwendung des Algorithmus

Der Algorithmus ist so aufgebaut, dass Parameter variiert werden können. Dadurch ist beispielsweise eine Optimierung möglich. Im Folgenden sind die Parameter mit Initialwerten belegt. Diese zugewiesenen Werten sind mit Tabelle 5.1 erläutert. Dabei bilden zwei aufeinanderfolgende Parameter mit einem relativen Wert ein Wertepaar und sollten auch bei einer Anpassung in Summe eins ergeben.

Tabelle 5.1.: Definierte Parameter des Algorithmus

| Parameter | Initialwert | Modul |
|---|---------------------|-----------------|
| Gewicht der strukturellen Ähnlichkeit | 0,5 | Ähnlichkeit |
| Gewicht der Ähnlichkeit der Restriktionen | 0,5 | Ähnlichkeit |
| Gewicht der Abweichung ggü. dem neuen Bauteil | 0,5 | Ähnlichkeit |
| Gewicht der Abweichung ggü. dem historischen Bauteil | 0,5 | Ähnlichkeit |
| Gewicht der Ähnlichkeit der Feature | 0,75 | Ähnlichkeit |
| Gewicht der Ähnlichkeit der Feature Verbindungen | 0,25 | Ähnlichkeit |
| Gewicht der Ähnlichkeit der Restriktionen des Bauteils | 0,5 | Ähnlichkeit |
| Gewicht der Ähnlichkeit der Restriktionen der Feature | 0,5 | Ähnlichkeit |
| Distanzmetrik | laplacian Kernel | Ähnlichkeit |
| Größe der Trainingsmenge | 0,75 | Prozessanalyse |
| Größe der Testmenge | 0,25 | Prozessanalyse |
| Regressionsmodell | OLS | Prozessanalyse |
| Anzahl der Bauteile mit den höchsten Ähnlichkeitsfaktoren | 3 | Korrekturfaktor |

Die eigentliche Berechnung wird ausgehend von der Datei estimator.py durchgeführt. In dieser Datei ist analog zu der in Abbildung 4.7 dargestellten Konzept-Funktionsweise der allgemeine Ablauf hinterlegt. Von hier aus werden die einzelnen Module aufgerufen und weiterverarbeitet. Der entsprechende allgemeine Ablauf des Algorithmus ist mit Abbildung 5.6 veranschaulicht.

```
(1) [Name, Ähnlichkeitsfaktor, Skalierung] (je ähnlichem Bauteil) ← Ähnlichkeitsanalyse
(2) [Fertigungskosten, DLZ Fertigung] (je neuem und ähnlichem Bauteil) ← Prozessanalyse
(3) Korrekturfaktor der Kosten ← Fertigungskosten (ermittelt und Ist) der ähnlichen Bauteile
(4) Korrekturfaktor der Zeiten ← DLZ Fertigung (ermittelt und Ist) der ähnlichen Bauteile
(5) Korrekturfaktoren anwenden
return berechnete Ergebnisse
```

Abbildung 5.6.: Ablauf der Berechnung auf oberster Ebene

Folglich wird zu Beginn die Ähnlichkeitsanalyse, gefolgt von der Prozessanalyse, durchgeführt. Abschließend werden mithilfe der Ergebnisse die Korrekturfaktoren berechnet, sodass die finalen Ergebnisse an `main.py` zurückgespielt werden können. Die Funktionsweise der einzelnen Bestandteile wird nachfolgend näher beschrieben.

5.2.2. Funktionsweise der Ähnlichkeitsanalyse

Die Ähnlichkeitsanalyse stellt das Modul dar, das nach Abbildung 5.6 als erstes durchgeführt wird. Ziel dieses Moduls ist es die Bauteile mit der höchsten Ähnlichkeit gegenüber dem neuen Bauteil zu identifizieren. Dabei ist neben der Identifikation der Instanz der Ähnlichkeitsfaktor an `estimator.py` zurückzuspielen. Im Folgenden wird die Programmierung dieses Moduls näher erläutert.

Vor der eigentlichen Durchführung der Analyse werden die relevanten Bauteilinformationen aus der Ontologie `ManOnParts` ausgelesen und aufbereitet. Dafür werden die Instanzen der Bauteile betrachtet und die relevanten Daten zwischengespeichert. Dadurch liegen die folgenden Informationen je Bauteil vor:

- die Restriktionen des gesamten Bauteils und
- die Restriktionen der `ManOn:ManufacturingFeature (MF)` je MF des Bauteils.

Dabei entsprechen die Restriktionen des gesamten Bauteils beispielsweise den Bauteilmaßen und die Restriktionen eines MF den Maßen des Feature.

Daneben werden bezüglich der Benachbarung von MF die folgenden Daten erhoben:

- die benachbarten MF jedes MF eines Bauteils, sowie
- die Restriktionen der benachbarten MF jedes MF eines Bauteils.

Die Verwendung der Daten für die Berechnung des Ähnlichkeitsmaßes ist mit Abbildung 5.7 veranschaulicht. Mit dieser Darstellung wird sowohl auf die Bestandteile des entwickelten Ähnlichkeitsmaßes als auch auf die farbliche Zuordnung der Daten und Bestandteile an einem Beispielbauteil gezeigt.

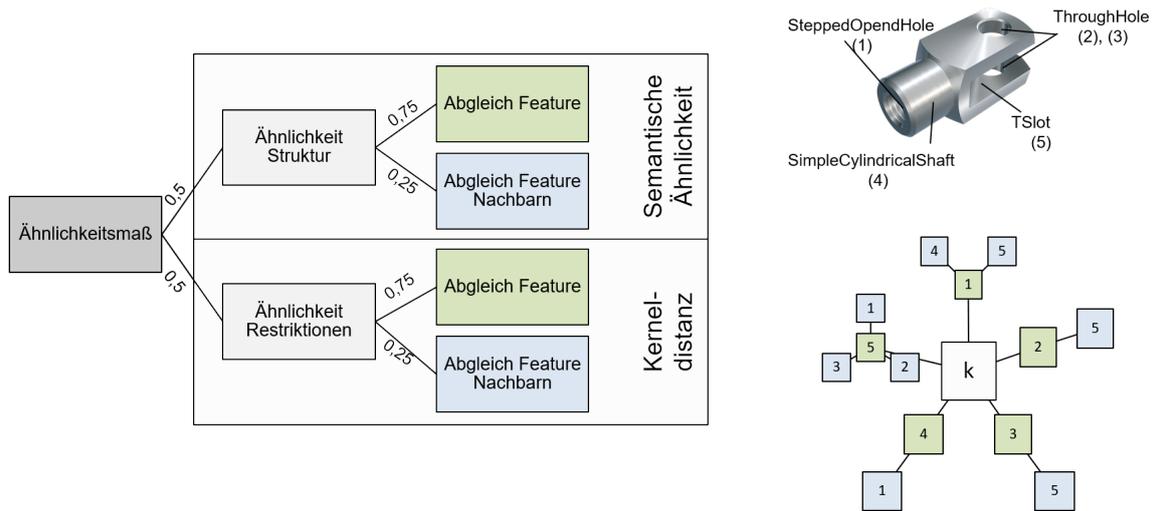


Abbildung 5.7.: Aufbau des Ähnlichkeitsmaßes

Das dargestellte Bauteile ist durch exemplarische MF charakterisiert. Diese stehen zudem in Beziehungen zueinander. Ausgehend davon lässt sich ein Strukturbaum, der ebenfalls dargestellt ist, ableiten. In diesem Zusammenhang sind die MF des Bauteils grün markiert, während die benachbarten MF der MF blau markiert sind. Folglich wird bei der Betrachtung und dem Abgleich der Feature nur die Ebene der grünen Knoten des Strukturbaums betrachtet. Bei der Betrachtung und dem Abgleich der Feature Nachbarn werden je MF entsprechend die blauen Knoten betrachtet.

Des Weiteren veranschaulicht die Abbildung 5.7 die Bestandteile des Ähnlichkeitsmaßes mit den initialen Gewichten. Diese sind in Tabelle 5.1 wiederzufinden.

Zudem wird deutlich, dass sich das Maß in Anlehnung an das Konzept (vgl. Kapitel 4.3.1) aus zwei Ähnlichkeitsmaßen zusammensetzt. Zum Einen wird die Ähnlichkeit der Struktur mithilfe der semantischen Ähnlichkeit berechnet und zum anderen die Ähnlichkeit der Restriktionen mit einer Kernel-Distanz. Beide Teil-Ähnlichkeiten werden nach der gleichen Logik und mit denselben Initialgewichten berechnet. Infolgedessen unterscheiden sich diese Ähnlichkeiten anhand der verwendeten Metrik zur Bestimmung der Ähnlichkeit. Der Ablauf der Berechnungen der Teil-Ähnlichkeiten ist mit Abbildung 5.8 dargestellt.

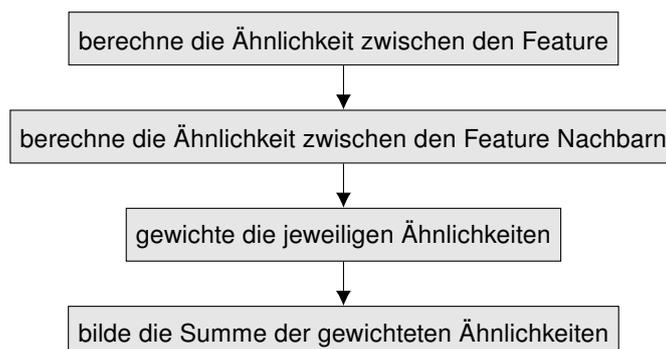


Abbildung 5.8.: Ablauf der Berechnung der Ähnlichkeit der Struktur und der Restriktionen

Der Algorithmus berechnet zuerst die Ähnlichkeit der Struktur und danach die der Restriktionen und kombiniert daraufhin beide Ergebnisse für die Berechnung des finalen Ähnlichkeitsmaßes. Dieser Ablauf ist mit Abbildung 5.9 veranschaulicht.

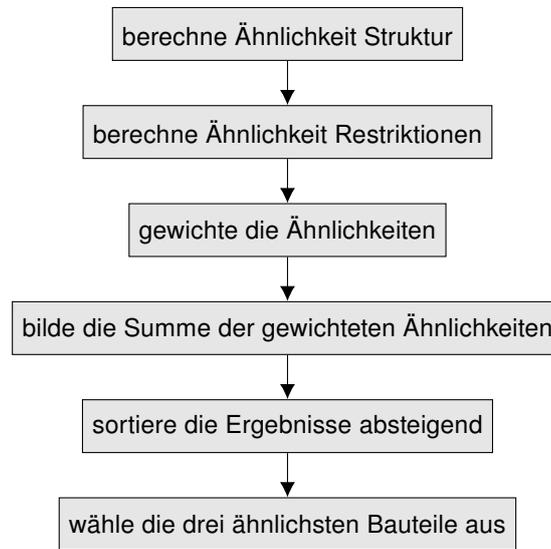


Abbildung 5.9.: Ablauf der Berechnung des Ähnlichkeitsmaßes

Im Folgenden wird auf die Berechnungen der Teil-Ähnlichkeiten näher eingegangen.

Bei der *Ähnlichkeit der Struktur* wird in Anlehnung an Kapitel 4.3.1 eine Menge an übereinstimmenden MF gebildet und die der Gesamtheit der MF zweier Bauteile gegenübergestellt ist. Dadurch wird ein Ähnlichkeitsmaß von null erhalten, wenn kein einziges MF des neuen Bauteils in dem jeweiligen Vergleichsbauteil wiederzufinden ist. Demgegenüber steht ein Ähnlichkeitsmaß von eins, das eine vollständige strukturelle Übereinstimmung beschreibt. Für die Umsetzung dieses Abgleichs werden nach jedem Vergleich der MF die dazugehörigen Indizes zwischengespeichert und für die nachrangige eigentliche Berechnung des Ähnlichkeitsmaßes herangezogen. Dieser Zusammenhang ist mit Abbildung 5.10 beschrieben.

Das mit Abbildung 5.10 beschriebene Vorgehen kann für die Ähnlichkeit zwischen den Feature Nachbarn für die Ähnlichkeit der Struktur übertragen werden. Anstelle der MF werden die benachbarten MF der MF betrachtet. Dabei wird auch hier nur eine vollständige oder keine Übereinstimmung betrachtet und für die Berechnung herangezogen.

Die *Ähnlichkeit der Restriktionen* wird bei der Betrachtung der Ähnlichkeit zwischen den Features weiter spezifiziert und besteht aus zwei Teilen. Folglich lassen sich die Restriktionen eines gesamten Bauteils und die Restriktionen der jeweiligen MF differenzieren und unterschiedlich gewichten. Initial werden beide Anteile gleichgewichtet (vgl. Tabelle 5.1).

Das grundlegende Vorgehen ist das gleiche wie zuvor bei der Ähnlichkeit der Struktur und somit in Anlehnung an Abbildung 5.10. Allerdings werden für die Ähnlichkeit der Restriktionen immer dann, wenn MF übereinstimmen, die Distanzen zwischen den Restriktionen der jeweiligen MF berechnet. Folglich werden anstelle der Indizes der MF die Distanzen generiert und weiterverarbeitet. Diese Änderung in der Umsetzung gegenüber der Ähnlichkeit der Struktur gilt sowohl für die Ähnlichkeit der Feature als auch der Feature Nachbarn.

```
# MF ← ManOn:ManufacturingFeature
# historisches Bauteil ← in der Vergangenheit bereits gefertigtes Bauteil
# die MF werden verglichen und durch eine ID eindeutig gekennzeichnet

(1) generiere die Übereinstimmungen der MF des neuen und der historischen Bauteile

MF_IDs_neu ← []
MF_IDs_historisch ← []

for MF_neu in [MF des neuen Bauteils]:
    for historisches_Bauteil_ID, historisches_Bauteil in enumerate([historische Bauteile]):

        Übereinstimmung ← MF des neuen und alle MF des bereits gefertigten Bauteils

        if not Übereinstimmung:
            continue

        if (MF_ID_historisches_Bauteil not in MF_IDs_historisch
            and MF_ID_neues_Bauteil not in MF_IDs_neu):

            MF_IDs_neu[historisches_Bauteil_ID] ← MF_ID_neues_Bauteil
            MF_IDs_historisch[historisches_Bauteil_ID] ← MF_ID_historisches_Bauteil

# die generierten Listen beinhalten die übereinstimmenden MF IDs
# daneben bestehen Listen mit allen vorhanden MF IDs der Bauteile

(2) generiere die Differenzen der MF IDs als neue Liste

(3) gewichte die Anzahl an Differenzen je historischem Bauteil

(4) bilde die maximale Menge an Übereinstimmungen

(5) berechne den Ähnlichkeitsfaktor je historischem Bauteil

return Ähnlichkeitsfaktoren
```

Abbildung 5.10.: Logik der Berechnung der Ähnlichkeit zwischen den Features

Zusätzlich grenzt sich die Ähnlichkeit der Restriktionen von der Ähnlichkeit der Strukturen durch die Rahmenbedingungen der Distanzberechnung ab. Für die Berechnung der Distanz zwischen zwei MF besteht die Voraussetzung, dass es sich bei den MF um dieselbe Klasse handelt. Dadurch wird die Distanz nur für übereinstimmende MF berechnet. Infolgedessen wird mit der Ähnlichkeit der Restriktionen eine Aussage darüber getroffen, inwiefern die als strukturell identisch identifizierten MF-Paare als ähnlich angesehen werden können.

Folglich kann die Ähnlichkeit der Restriktionen bei einer Gegenüberstellung der Ähnlichkeit der Struktur als eine Erweiterung der Ähnlichkeit der Struktur identifiziert werden. Dadurch sind auch beide Bestandteile für die Berechnung des Ähnlichkeitsmaßes der Ähnlichkeitsanalyse erforderlich. Erst durch die Kombination beider wird ein aussagekräftiges Ähnlichkeitsmaß generiert. Dahingehend ist es nicht zum Nachteil, dass die Ähnlichkeit der Restriktionen nicht übereinstimmende MF des Neu- oder des jeweiligen Vergleichsbauteils nicht betrachtet. Diese werden mit der Ähnlichkeit der Struktur berücksichtigt.

Die Berechnung der Distanz zweier MF Restriktionen wird initial anhand des laplacian Kernels durchgeführt. Das Vorgehen der Distanzberechnung als Bestandteil der Ähnlichkeit der Restriktionen ist mit Abbildung 5.11 verdeutlicht.

Für die Programmierung wird auf den in der Python-Bibliothek scikit-learn implementierten Laplacian Kernel zurückgegriffen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass trotz übereinstimmender MF-Klasse unterschiedliche ManOn:ManufacturingRestriction vorhanden sind. Infolgedessen wird der DictVectorizer aus derselben Bibliothek herangezogen.

Mithilfe des DictVectorizer werden die Vektoren der Restriktionen angeglichen, sodass diese die gleiche Dimensionen besitzen und für die Distanzberechnung verwendet werden können. Restriktionen, die nur bei einem Bauteil vorhanden sind, werden dadurch automatisch mit einer null belegt. Folglich können nur numerische Restriktionen für die Distanzberechnung betrachtet werden. Des Weiteren sind die Vektoren zu normalisieren, da die Restriktionen bspw. unterschiedliche Einheiten besitzen können und dadurch ohne eine Normalisierung die Ergebnisse verfälscht werden.

Sind diese beschriebenen Aspekte betrachtet, kann entsprechend dem dargestellten Ablauf in Abbildung 5.11 die eigentliche Berechnung der Distanz basierend auf der Distanzmetrik durchgeführt werden.

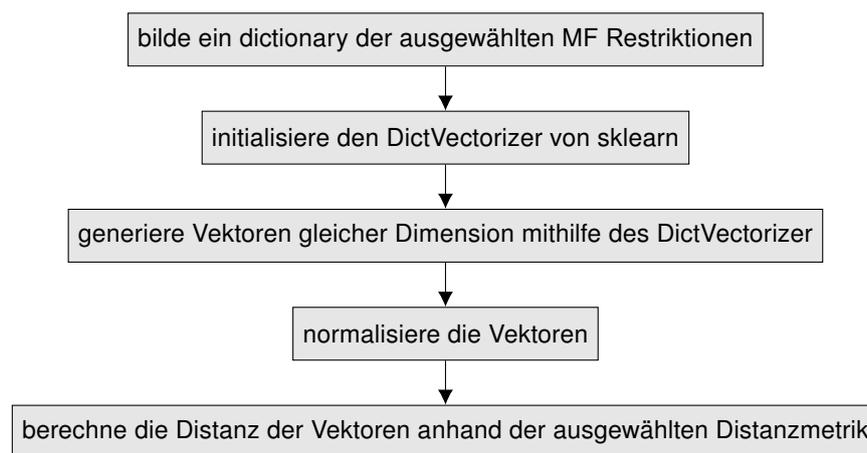


Abbildung 5.11.: Ablauf der Distanzberechnung der Ähnlichkeit der Restriktionen

5.2.3. Funktionsweise der Prozessanalyse

Die Berechnung der Fertigungskosten und -zeiten erfolgt in Anlehnung an das ausgearbeitete Konzept mithilfe einer Regressionsmethode (vgl. Kapitel 4.3.2). Die entsprechende Programmierung des Algorithmus-Bestandteils wird im Folgenden thematisiert.

Analog zu der Ähnlichkeitsanalyse sind zu Beginn die relevanten Daten aus dem Wissensgraphen auszulesen und aufzubereiten. Für die Durchführung der Prozessanalyse werden die Bauteile auf der Prozessebene analysiert. In Bezug zu der Annahme, dass mit einem Prozess ein Feature gefertigt sind, sind die Daten der Feature relevant. Folglich sind die Daten losgelöst von dem dazugehörigen Bauteil.

Bezogen auf die MF-Instanzen in ManOnParts sind die folgenden Daten relevant:

- die Restriktionen des MF,
- die zugewiesene Klasse ManOn:Process und
- die Instanz und Klasse ManOn:Machine, auf der das MF gefertigt werden soll.

Folglich wird mit der Regressionsmethode ein noch nicht gefertigtes MF mit den bereits gefertigten MF verglichen, sodass dadurch die Fertigungskosten und -zeiten für die Fertigung dieses MF ermittelt werden können. Dabei kann ein Datensatz um bspw. Prozessparameter erweitert werden. An dieser Stelle wird jedoch vereinfacht nur das Feature in Kombination mit den allgemeinen Prozess- und Maschinendaten betrachtet.

Der allgemeine Ablauf der Prozessanalyse ist mit Abbildung 5.12 beschrieben.

```
# historisches Bauteil ← in der Vergangenheit bereits gefertigtes Bauteil
# ähnliches Bauteil ← Ergebnis der Ähnlichkeitsanalyse (Ähnlichkeit gegenüber des neuen Bauteils)

(1) numerische Werte ← kategorischen Tabellenwerte (Textform)

(2) trainiere die Modelle mit den Daten der historischen Bauteile

# von der Menge an historischen Bauteilen sind hier die ähnlichen Bauteile auszuschließen

(3) ermittle die Modellergebnisse für das neue Bauteil

(4) ermittle die Modellergebnisse für die ähnlichen Bauteile

    for Bauteil in [ähnliche Bauteile]:
        (a) ermittle die Modellergebnisse (Bauteil)
        (b) generiere die Istkosten bzw. die Istzeiten aus dem Wissensgraphen

return Ergebnisse für das neue Bauteil und für die ähnlichen Bauteile
```

Abbildung 5.12.: Ablauf der Berechnungen der Prozessanalyse

Zu Beginn der Durchführung der Prozessanalyse kategorische Werte umzuwandeln, da nur numerische Werte von der Regressionsmethode verarbeitet werden können. Durch die Umwandlung entsteht kein Informationsverlust, da die Kategorien eine eindeutige numerische Bezeichnung bekommen. Diese ist gleichbedeutend der ursprünglichen Bezeichnung.

In Anlehnung an das in Abbildung 2.5 und in Kapitel 4.3.2 beschriebene Vorgehen werden die Regressionsmodelle zu Beginn trainiert. Die Trainingsmenge basiert dabei auf den Datensätzen der MF der bereits gefertigten Bauteile. Da das trainierte Modell sowohl für das neue Bauteil als auch für die ähnlichen Bauteile durchgeführt wird, sind die Datensätze der ähnlichen Bauteile von der Trainingsmenge zu entfernen. Dadurch wird eine Verfälschung der Ergebnisse für die ähnlichen Bauteile vermieden.

Die trainierten Modelle werden anschließend für die Ermittlung der Kosten und Zeiten herangezogen. Im Falle der ähnlichen Bauteile werden zusätzlich die Istkosten und -zeiten aus dem Wissensgraphen ausgelesen, sodass diese für die Berechnung der Korrekturfaktoren an estimator.py übergeben werden können.

Entsprechend der Ausarbeitung des Konzeptes in Kapitel 4.3.2 bestehen die folgenden vier Regressionsmodelle:

- das Regressionsmodell für die Ermittlung der Maschinenkosten bzw. FGK,
- das Regressionsmodell für die Ermittlung der Rüstzeiten,
- das Regressionsmodell für die Ermittlung der Prozesskosten bzw. FK und
- das Regressionsmodell für die Ermittlung der Bearbeitungszeiten.

Für die aufgeführten Regressionen wird vereinfacht dieselbe Regressionsmethode verwendet. Dabei wird auf die OLS-Regression der Python-Bibliothek statsmodels zurückgegriffen.

Der Ablauf der Ermittlung der Modellergebnisse wird mit Abbildung 5.13 beschrieben. Folglich werden zu Beginn die Regressionsmodell unabhängig voneinander herangezogen, um die jeweiligen Bestandteile zu ermitteln. Darauf aufbauend folgt die Weiterverarbeitung der Ergebnisse. Diese berücksichtigt die Fertigungsreihenfolge der MF des betrachteten Bauteils und führt zu dem berechneten und ermittelten Ergebnis der Prozessanalyse.

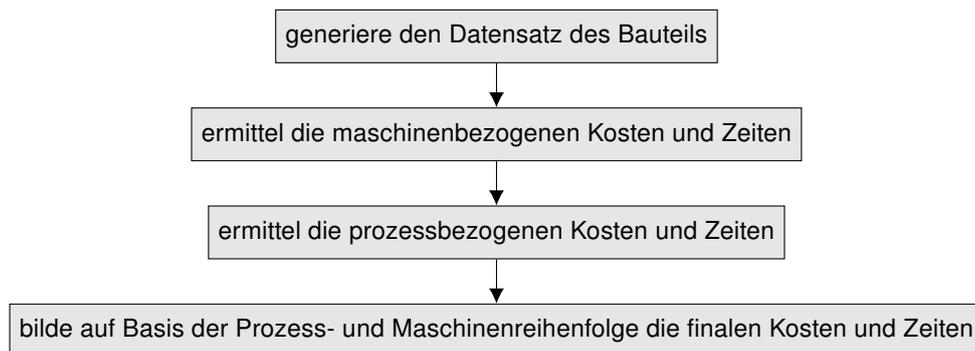


Abbildung 5.13.: Ablauf der Ermittlung der Modellergebnisse

Die Generierung des Endergebnisse erfolgt über die in Kapitel 4.3.2 getroffene Vereinfachung und Annahme, dass alle Prozesse, die einer Maschine zugeordnet sind, auf der zugewiesenen Maschine nacheinander durchgeführt werden. Dahingehend wird das mit Abbildung 5.14 veranschaulichten Vorgehen zur Berechnung der Ergebnisse der Prozessanalyse angewendet. Infolgedessen werden je Maschine die Rüst- und Bearbeitungskosten und -zeiten aufsummiert. Abschließend erfolgt eine Aufsummierung der jeweiligen Kosten bzw. Zeiten.

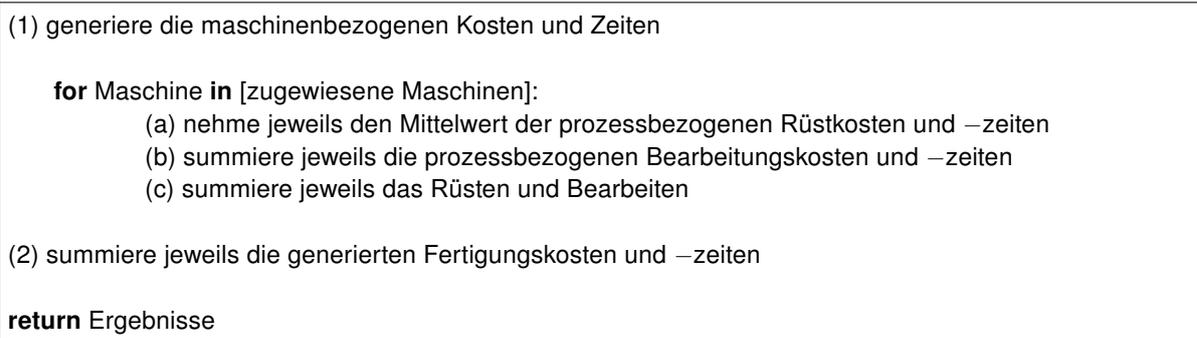


Abbildung 5.14.: Ablauf der Berechnung der finalen Ergebnisse der Prozessanalyse

Entsprechend der Ausführung in Kapitel 4.3.2 werden mit der Prozessanalyse stochastische Ergebnisse erzielt. Diesbezüglich liefert das ausgewählte OLS-Regressionsmodell mehrere statistische Größen anstelle eines deterministischen Ergebnisses. Infolgedessen werden die Ergebnisse jeweils durch die folgenden Größen beschrieben:

- untere Grenze des Prognoseintervalls,
- untere Grenze des Konfidenzintervalls,
- Median,
- obere Grenze des Konfidenzintervalls und
- obere Grenze des Prognoseintervalls.

Für das Ergebnis des Algorithmus ist das Konfidenzintervall entscheidend. Daneben kann das Prognoseintervall für die Auswertung herangezogen werden und ist folglich in den Ergebnissen enthalten. Die Verarbeitung der Ergebnisse bezüglich des Ablaufs in Abbildung 5.14 erfolgt jeweils für alle zuvor genannten Intervallgrößen.

5.2.4. Zusammenführung der Ähnlichkeits- und Prozessanalyse

Die in den zuvor beschriebenen generierten Informationen der Ähnlichkeitsanalyse (vgl. Kapitel 5.2.2) und der Prozessanalyse (vgl. Kapitel 5.2.3) werden entsprechend des Ablaufs in Abbildung 5.6 für die Berechnung eines Korrekturfaktors für die Kosten bzw. für die Zeiten herangezogen. Daraufhin folgt die Berechnung der finalen Ergebnisse der Methode.

Für die finale Berechnung der Fertigungskosten und -zeiten wird jeweils ein Kostenfaktor berechnet. Infolgedessen werden zwei Kostenfaktoren berechnet. Die Programmierung des Algorithmus erfolgt analog zu den Zusammenhängen in Gleichung 4.2 und Gleichung 4.4. Dabei ist die Implementierung hinsichtlich der verschiedenen stochastischen Größen an dieser Stelle zu spezifizieren.

Folglich werden die Ergebnisse eines ähnlichen Bauteils anhand des ermittelten Medians und der dazugehörigen Istwerte verglichen. Diese Werte werden folglich in ein Verhältnis zueinander gesetzt und mit dem Ähnlichkeitsfaktor gegenüber dem neuen Bauteil gewichtet. Die weiteren stochastischen Größen werden für die Berechnung der Korrekturfaktoren nicht verwendet.

Für die Berechnung der finalen Ergebnisse des Algorithmus wird der Korrekturfaktor bezüglich der Fertigungskosten auf alle stochastischen Größen der ermittelten Fertigungskosten des neuen Bauteils angewendet. Dementsprechend wird mit dem Korrekturfaktor bezüglich der Fertigungszeit analog verfahren.

Durch die Anwendung eines Faktors auf alle jeweiligen stochastischen Größen des neuen Bauteils wird das Verhältnis der stochastischen Größen zueinander nicht beeinflusst und die Intervalle sozusagen entweder angehoben oder herabgesetzt.

Der Faktor kann sowohl negativ als auch positiv sein. Im negativen Fall werden die ähnlichen Bauteile gegenüber der Ist-Werte von der Prozessanalyse überschätzt. Daraufhin werden die ermittelten Intervalle des neuen Bauteils herabgesetzt. Der Fall der Unterschätzung und des Anhebens der Intervalle des neuen Bauteils liegt bei einem positiven Faktor vor.

5.3. Ausführung des Algorithmus anhand von Testdaten

Im Folgenden wird der Algorithmus anhand eines erstellten Datensatzes näher betrachtet. Des Weiteren werden die Ergebnisse anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 und der absoluten Abweichungen veranschaulicht.

Der für die Auswertung erstellte Datensatz beruht auf standardisierten Bauteilen. Diese sogenannte Gabelköpfe eignen sich für diesen Kontext, da diese eine einfache Geometrie besitzen. Des Weiteren können für die Fertigung der Feature der Bauteile verschiedene grundlegende Fertigungsprozesse angewendet, sowie Herstellerinformationen für verschiedene Größen und Variationen im Design verwendet werden.

Für den Testdatensatz werden drei Design-Varianten des Gabelkopfes betrachtet. Diese sind mit Abbildung 5.15 veranschaulicht. Folglich wird der klassische Gabelkopf, sowie der Gabelkopf mit Zusatzgewinde und der Gabelkopf mit Außengewinde betrachtet.



Abbildung 5.15.: Übersicht der Testbauteil-Variationen(vgl. Osswald, 2021)

Der Datensatz wird mit den Herstellerinformationen von Osswald erstellt. Dabei liegen neben den technischen Informationen der Bauteile die jeweiligen Verkaufspreise vor. Zu den Zeiten bestehen keine Informationen. Mithilfe eines Kalkulationsschematas werden die Istkosten und Istzeiten ermittelt(vgl. Ehrlenspiel et al., 2020, S. 450).

Die verfügbaren Herstellerinformationen der Bauteile variieren. Folglich besteht der Datensatz in Anlehnung an Abbildung 5.15 aus 14 Bauteilen. Davon sind zehn vom Typ Gabelkopf, drei vom Typ Gabelkopf mit Außengewinde und ein Bauteil vom Typ Gabelkopf mit Zusatzgewinde. Die Variationen des Gabelkopfes sind gering vertreten, da es für diese eine größere Herausforderung ist einen entsprechenden Datensatz zu erstellen.

Die Varianten dienen der Variation des Datensatzes, da skalierte Bauteile in Anlehnung an Kapitel 2.1 einfacher zu ermitteln sind und die Anwendung des Kostenmodells insbesondere für Neuentwicklungen, die gegebenenfalls nur sehr geringe Ähnlichkeiten zu bereits gefertigten Bauteilen aufweisen, gelten soll.

Für die Datensätze werden Instanzen der Bauteile in ManOnParts erstellt. Dafür werden insbesondere ManOn:ManufacturingFeature für die Bauteile definiert. Für den klassischen Gabelkopf ergeben sich beispielsweise fünf MF. Diese sind anhand der Abbildung 5.16 veranschaulicht.

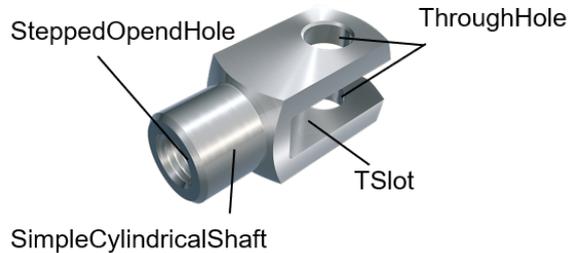


Abbildung 5.16.: Beispielhafte Zuweisung von MF (vgl. Osswald, 2021)

Daneben werden Instanzen in ManOn:Machines definiert. Bei den Maschinen handelt es sich vereinfacht um drei Maschinen zur Durchführung von Bohr-, Fräs- und Drehprozessen. Für die Prozesse werden ebenfalls Instanzen definiert. Diese Instanzen werden in ManOnScenario erstellt. Dabei wird je MF eines Bauteils ein zugehöriger Fertigungsprozess aufgestellt.

Der zuvor beschriebene Algorithmus kann für die in Kapitel 5.1 veranschaulichten Bauteile ausgewertet werden. In dem Zusammenhang werden die ermittelten Kosten und Zeiten für die folgenden drei Konfigurationen betrachtet:

1. die Berechnung ausschließlich basierend auf den Ähnlichkeitsfaktoren der Ähnlichkeitsanalyse, sowie den Istkosten und Istzeiten der ähnlichen Bauteilen,
2. die Berechnung ausschließlich basierend auf den Ergebnissen der Prozessanalyse und
3. die Berechnung im Sinne des entwickelten Kostenmodells auf Basis der Kombination von Ähnlichkeitsanalyse, Prozessanalyse und Korrekturfaktor.

Bei den aufgeführten Konfigurationen werden im Folgenden vereinfacht die Bezeichnungen Ähnlichkeit, Prozess und Methode verwendet.

Die Berechnungen der Methode wurden bereits zuvor ausführlich erläutert. Daneben entsprechen die Ergebnisse von Prozess der Prozessanalyse und werden folglich ebenfalls nicht näher erläutert. Dahingehend handelt es sich bei Ähnlichkeit um eine Weiterverarbeitung der Ergebnisse der Ähnlichkeitsanalyse und wird mit Gleichung 5.1 und Gleichung 5.2 näher erläutert.

$$\hat{c}_k = 1 + \frac{1}{j} \cdot \sum_{a=1}^j (f_{ka} \cdot c_a) \quad (5.1)$$

| | |
|-------------|-------------------------------|
| k | neue Komponente |
| a | ähnliche Komponente für 1...j |
| f_{ka} | Ähnlichkeitsfaktor k zu a |
| \hat{c}_k | ermittelte Kosten von k |
| c_a | Istkosten von a |

$$\hat{t}_k = 1 + \frac{1}{j} \cdot \sum_{a=1}^j (f_{ka} \cdot t_a) \quad (5.2)$$

- k neue Komponente
- a ähnliche Komponente für 1...j
- f_{ka} Ähnlichkeitsfaktor k zu a
- \hat{t}_k ermittelte Zeiten von k
- t_a Istzeiten von a

Folglich werden für die Ergebnisse von Ähnlichkeit die zu ermittelnden Kosten und Zeiten anhand der gemittelten Ist-Werte der ähnlichen Bauteile, die durch die Ähnlichkeitsfaktoren unterschiedlich gewichtet werden, berechnet.

Mithilfe der drei Konfigurationen lassen sich für jedes Testbauteil drei Ergebnisse berechnen. Demgegenüber stehen die Ist-Werte der Bauteile. Durch die Hinzunahme des Bestimmtheitsmaßes, dem sogenannten R2-Score, lassen sich diese Ergebnisse auswerten.

Dabei beschreibt das Bestimmtheitsmaß im Kontext von Regressionen bspw. die Performance einer Regressionskurve. Das Bestimmtheitsmaß liegt dabei in der Regel zwischen null und eins. Dabei entspricht ein Wert von eins, dass alle Datenpunkte auf dieser Kurve liegen und in Folge eine Prognose exakt ist. Eine Wert von null wiederum deutet auf eine schlechte Performance der betrachteten Regression hin.

Für den Testdatensatz ergeben sich die mit Tabelle 5.2 dargestellten Ergebnisse.

Tabelle 5.2.: Gegenüberstellung der durchschnittlichen R2-Ergebnisse

| Konfiguration | R2 |
|---------------|-------|
| Ähnlichkeit | 0.940 |
| Prozess | 0.896 |
| Methode | 0.934 |

Folglich liefern die Ergebnisse der Konfiguration der Ähnlichkeit die beste Performance. Die Konfiguration der Methode liefert die zweitbesten Ergebnisse. Des Weiteren zeigen die Auswertung, dass in Folge des integrierten Ansatzes die Ergebnisse der Prozessanalyse verbessert werden konnten.

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse näher eingegangen. Dafür wird mit Abbildung 5.17 die Auswertung aus Tabelle 5.2 spezifiziert. Für jede Konfiguration und jedes Testbauteil wird das Bestimmtheitsmaß berechnet.

Die dargestellten Diagramme zeigen, dass der berechnete R2-Wert je nach Bauteil variiert. Bei der Hälfte der Bauteile erzielt die Konfiguration der in dieser Arbeit entwickelten Methode die beste Performance. Aufgrund der schlechteren Ergebnisse bei den restlichen Bauteilen liefert die Konfiguration der Ähnlichkeit über alle Bauteile hinweg die besten Ergebnisse. Des Weiteren wird deutlich, dass die Ergebnisse der Prozessanalyse hinsichtlich der Konfiguration der Methode einflussreicher sind als die Ergebnisse der Ähnlichkeitsanalyse.

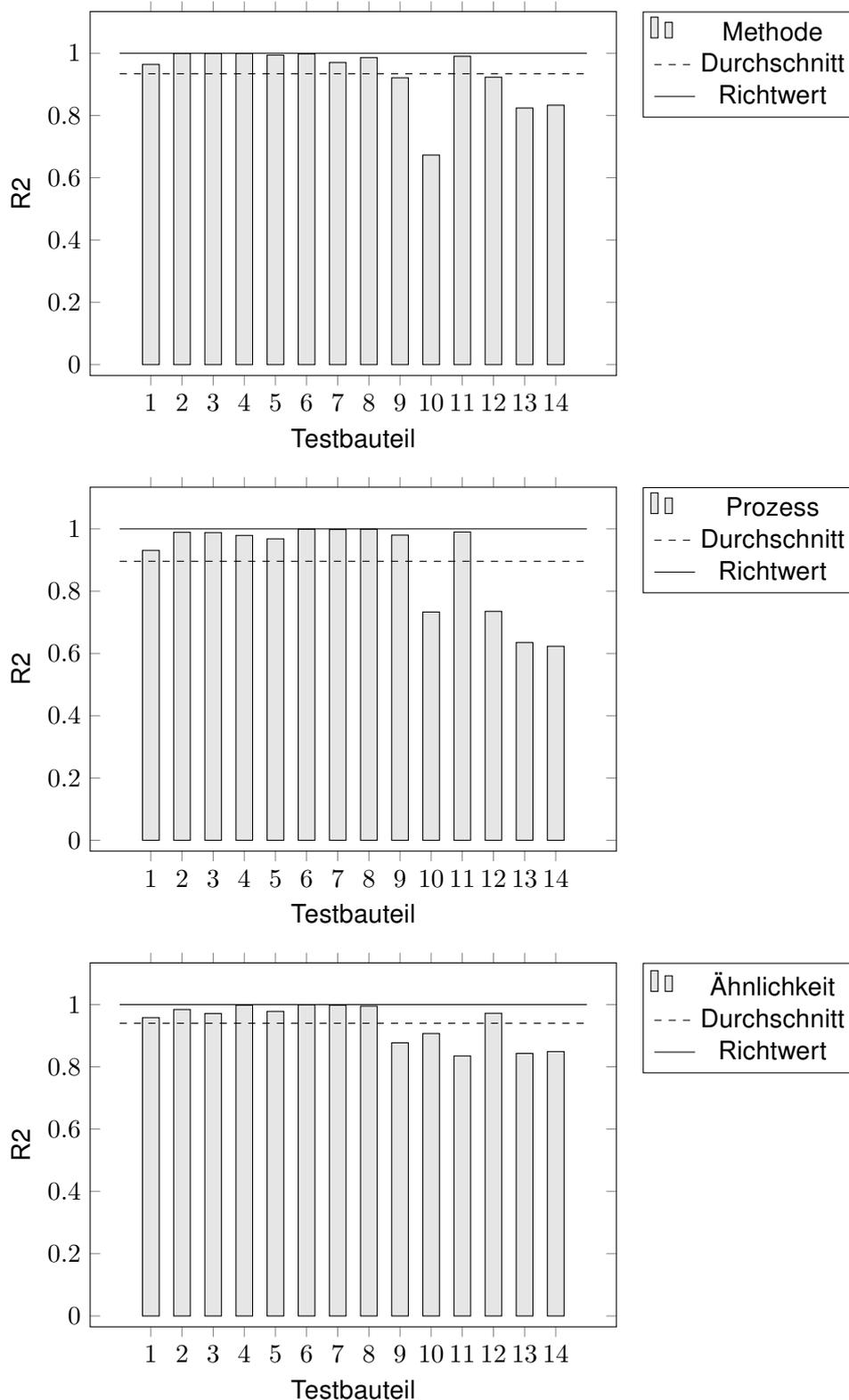


Abbildung 5.17.: Auswertung der Testbauteile anhand des Bestimmtheitsmaßes R2

Folglich führen schlechte Ergebnisse der Prozessanalyse auch in der Konfiguration der Methode zu verhältnismäßig schlechten Ergebnissen. Dennoch können durch die Hinzunahme der Ähnlichkeitsanalyse die Ergebnisse der Prozessanalyse verbessert werden. Dies wird insbesondere an den Bauteilen 12, 13 und 14 deutlich.

Die mit Abbildung 5.17 veranschaulichte Auswertung betrachtet die Ergebnisse für Kosten und Zeiten zusammen. Mit Abbildung 5.18 und Abbildung 5.19 werden die Ergebnisse der entwickelten Methode für jeweils die Kosten und die Zeiten dargestellt.

Dabei werden die Ergebnisse hinsichtlich der absoluten Abweichung betrachtet. Folglich wird anhand einer Boxplot-Darstellung das ermittelte Prognose- und Konfidenzintervall den Ist-Werten gegenübergestellt. Im Idealfall liegt der Ist-Wert, gekennzeichnet durch das Kreuz, in der Mitte des Intervalls. Je größer die Distanz der Ist-Werte gegenüber dem Median, desto größer ist die absolute Abweichung. Folglich sollten die Ist-Werte im Konfidenzintervall liegen, mindestens jedoch im Prognoseintervall.

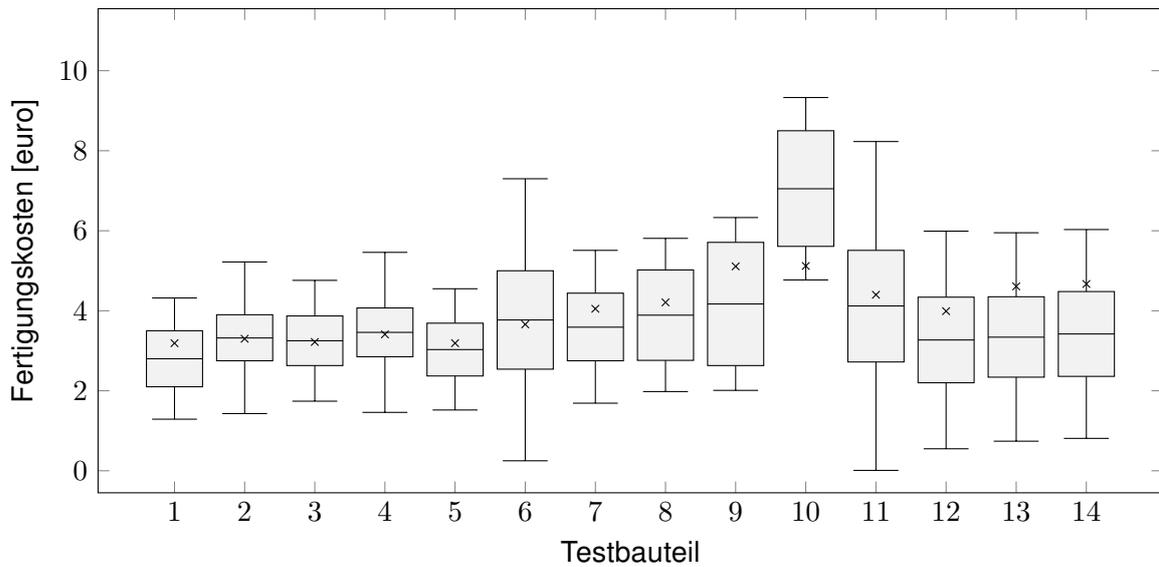


Abbildung 5.18.: Boxplot der ermittelten Kosten gegenüber den Istkosten

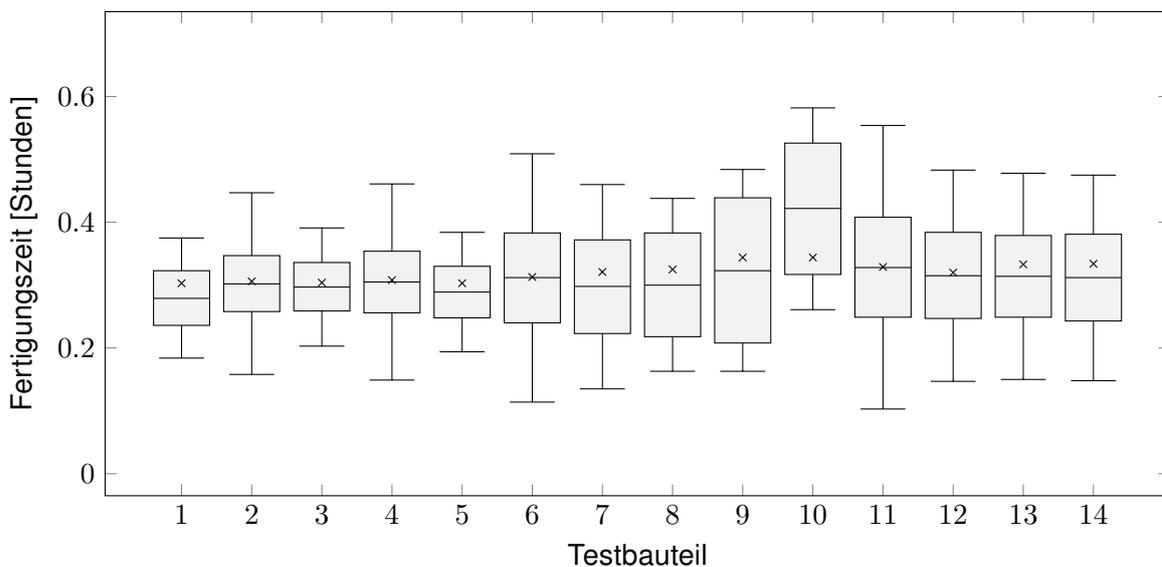


Abbildung 5.19.: Boxplot der ermittelten Zeiten gegenüber den Istzeiten

Die Darstellungen verdeutlichen, dass die Zeiten im Gegensatz zu den Kosten grundsätzlich besser ermittelt werden. Dabei weisen die Istkosten der Bauteile deutlich größere Unterschiede auf. Dadurch kann für die betrachteten Bauteile von einer größeren Komplexität bei der Berechnung der Kosten gegenüber den Zeiten ausgegangen werden.

Des Weiteren liegen alle Ist-Werte in den entsprechenden ermittelten Intervallen. Dabei sind drei Bauteile bei der Betrachtung der Kosten negativ anzumerken, da in deren Fällen die Istkosten im Prognose- und nicht im Konfidenzintervall liegen.

Die Boxplots liefern zusätzlich Informationen über die Streuungen und folglich über die Unsicherheiten der Methode bei der Berechnung der jeweiligen Kosten bzw. Zeiten. Folglich weisen die Bauteile mit den höchsten Übereinstimmungen die geringsten Streuungen auf. In Zusammenhang mit den in Abbildung 5.15 dargestellten Variationen werden für die Gabelköpfe mit Außengewinde (Testbauteile 12, 13, 14) und für den Gabelkopf mit Zusatzgewinde (Testbauteil 11) deutliche Unsicherheiten veranschaulicht. Daneben fällt das Bauteil 10 auf. Beide diesem handelt es sich um einen Gabelkopf mit Restriktionen der MF, die deutliche Abweichungen zu den MF der anderen Bauteilen aufweisen.

Die Ergebnisse der Testbauteile werden im Folgenden näher betrachtet und diskutiert.

6. Kritische Diskussion

In diesem Kapitel wird das entwickelte Kostenmodell diskutiert und evaluiert. Dazu werden die Anforderungen aus Kapitel 4.2.1 herangezogen. Des Weiteren wird die Performance des Algorithmus anhand der in Kapitel 5.3 dargestellten Ergebnisse bewertet. Abschließend folgt in Anlehnung an Kapitel 3 eine Einordnung in den Stand der Technik.

Zu Beginn der Konzeptionierung in Kapitel 4 sind die Anforderungen an die Methode beschrieben. Dabei wurden drei Kernanforderungen festgelegt. Zu diesen zählt die Robustheit der Verwendbarkeit des Modells und gegenüber den Daten. Aufgrund des geringen Datensatzes kann diesbezüglich keine qualitative Aussage getroffen werden. Durch die Verwendung einer nicht-linearen Regressionsmethode ist jedoch grundsätzlich eine gewisse Robustheit in der Anwendbarkeit der Methode gegeben.

Daneben stellt die Modularität eine Anforderung dar. Dabei bezieht sich die Modularität auf den Aufbau des Modells. Der Algorithmus besteht aus verschiedenen Modulen. Des Weiteren sind verschiedene Parameter anpassbar. Folglich lässt sich der Algorithmus bspw. in Anlehnung an die Kosten- und Zeitstruktur ausarbeiten. Ebenfalls denkbar ist es Teile des Algorithmus, bspw. das Ähnlichkeitsmaß, in einem anderen Kontext anzuwenden.

Die dritte Anforderung ist die Transparenz hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit von Berechnungen. Durch den modularen Aufbau ist bereits eine gewisse Nachvollziehbarkeit gegeben. Daneben wird durch die Berücksichtigung der Kosten- und Zeitstrukturen und durch die Wahl einer Regressionsmethode eine transparente Berechnung ermöglicht. Allerdings werden keine Zwischenergebnisse an den Benutzer weitergegeben. Um mehr Transparenz zu schaffen ist somit eine detailliertere Konsolen-Ausgabe oder die Integrierung einer Benutzeroberfläche denkbar. Daneben besteht bei einer zukünftigen Erweiterung des Algorithmus die Gefahr, dass aufgrund einer resultierenden Komplexität die Anforderung der Transparenz nur eingeschränkt umgesetzt werden kann.

Im Allgemeinen lässt sich folglich festhalten, dass die gesetzten Anforderungen umgesetzt sind. Daneben kann der Algorithmus anhand eines generierten Testdatensatzes evaluiert werden. Die in Kapitel 5.3 veranschaulichten Ergebnisse zeigen, dass das Modell hinsichtlich seiner Anwendung als funktionsfähig angesehen werden kann. Das Modell berechnet die zu erwartenden Kosten und Zeiten einer Produktneuentwicklung. Dabei werden Daten bereits gefertigter Bauteile aus einem Wissensgraphen herangezogen und die berechneten Ergebnisse des neuen Bauteils zurückgespielt.

Hinsichtlich einer Validierung ist der entwickelte Testdatensatz nicht aussagekräftig. Für eine Bewertbarkeit des Algorithmus ist eine umfangreichere Datengrundlage notwendig. Dennoch können anhand der Testbauteile erste Erkenntnisse gewonnen werden.

Folglich liefern die gesamte Methode und die Bestandteile gute Ergebnisse. Dabei erzielen die Berechnungen nur auf Basis der Ähnlichkeitsfaktoren leicht bessere Ergebnisse als der integrierte Ansatz der Methode. Es ist wahrscheinlich, dass durch die Betrachtung einer qualitativen Datengrundlage die Performance der Methode verbessert wird. Diese Aussage liegt dem Zusammenhang zugrunde, dass für die Bauteile, für die verhältnismäßig viele vergleichbare Daten herangezogen werden können, mit der integrierten Methode die besten Ergebnisse erzielt werden.

In diesem Kontext wird die Eignung der integrierten Methode für Neuentwicklungen nicht widerlegt. Durch die Durchführung der Regression für die einzelnen Feature ist das Modell recht unempfindlich gegenüber unbekanntem Produkten. Hinsichtlich einer Durchführung der Regression liegt es in der Natur des Ansatzes für eine aussagekräftige Berechnung auf eine Datenmenge zurückzugreifen, die ein geeignetes Modelltraining ermöglicht. Im Gegensatz dazu werden für die Ergebnisse basierend auf der Ähnlichkeit keine direkte Verbesserung erwartet, da diese insbesondere durch das Ähnlichkeitsmaß beeinflusst werden.

Infolge der Betrachtung der Testbauteile kann die Berechnung der Fertigungskosten und -zeiten basierend auf der alleinstehenden Betrachtung der Ähnlichkeitsanalyse für Ähnlicheile als vorteilhaft angesehen werden. Allerdings liegt in dieser Arbeit der Fokus auf Produktneuentwicklungen. Folglich sollte für neuentwickelte Bauteile der integrierte Ansatz weiterhin in Betracht gezogen werden.

Des Weiteren wurden die Parameter des Algorithmus mit Initialwerten versehen. Eine Validierung ist hinsichtlich der Parametereinflüsse, sowie in Anlehnung an Abbildung 2.5 eine Optimierung, mithilfe der Betrachtung einer qualitativen Datengrundlage denkbar. Infolgedessen sind keine nähere Betrachtung der Parameter durchgeführt, sodass unter anderem keine Aussage über die Sensitivität des Algorithmus getroffen werden kann.

Die in Kapitel 2 veranschaulichten grundlegenden Theorien über die Kosten- und Zeitstrukturen verdeutlichen die Komplexität der Thematik und eine gewisse Nachvollziehbarkeit für die Tatsache, dass insbesondere die Kostenermittlung seit mehreren Jahrzehnten bereits untersucht wird und verschiedene Ansätze entwickelt sind. Allerdings besteht kein allgemeingültiger Lösungsansatz. Dagegen werden in der Forschung und Industrie verschiedene Ansätze für unterschiedliche Anwendungsszenarien herangezogen.

Der in Kapitel 3 erläuterte Stand der Technik bestätigt die Auseinandersetzung hinsichtlich einer allgemeingültigen Methode. Diese Suche wird durch die Komplexität, die auch in dem Review von Altavilla et al. erläutert ist, erschwert. Im Folgenden wird die Arbeit diesbezüglich in den Stand der Technik eingeordnet.

In Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4 ist die Literatur hinsichtlich der Kosten- und Zeitermittlung anhand des in Abbildung 3.1 dargestellten Frameworks betrachtet.

Dabei ist die Literatur insbesondere anhand der Dimension der Art der Analyse voneinander abgegrenzt. Bezüglich dieser Dimension zählt die Arbeit zu den integrierten Ansätzen. Dabei entspricht die Ähnlichkeitsanalyse einem intuitiven Ansatz. Die Berechnungen der Prozessanalyse entsprechen in Anlehnung an die Regressionsmethode einem analogischen Ansatz und in Anlehnung an die berücksichtigten Kosten- und Zeitstrukturen einem analytischen Ansatz. Infolgedessen zählt die Arbeit zu den intuitiv / analogischen Ansätzen.

Hinsichtlich der Dimension der Methode der Kosten- bzw. Zeitermittlung lässt sich die Arbeit insbesondere den stochastischen Ansätzen zuordnen.

Daneben bezieht sich die Arbeit bezüglich der Dimension der Produkt- und Prozesseigenschaften auf nicht-standardisierte Produkte der Raumfahrtindustrie. Dabei kann die entwickelte Methode als industrie-übergreifend angesehen werden, da die Raumfahrtindustrie hauptsächlich durch die Fokussierung auf die Losgröße eins auf das Rüsten Einfluss nimmt.

In Bezug zu der Dimension der Zielsetzung der Kostenermittlung und der Lebenslaufphase wird die Arbeit der Design Optimierung und dem Abwägen alternativer Designs zugeordnet. Folglich richtet sich die Methode vornehmlich an Entwickler und Konstrukteure, sowie an die Entwicklungs- und Konstruktionsphase.

Die Arbeit fokussiert sich hinsichtlich der Dimension der Kostenbetrachtung auf die Fertigung.

Infolgedessen betrachtet die Arbeit einige Aspekte, die auch bereits vermehrt in den Ansätzen der Forschung wiederzufinden sind. Dazu zählt insbesondere der Fokus auf die Fertigung. Hinsichtlich einer Forschungslücke ist die Erweiterung der Methode auf die Selbstkosten und auf die Durchlaufzeit eines Auftrages vorteilhaft.

Dagegen kann sich die Arbeit insbesondere hinsichtlich der Wahl eines stochastischen Ansatzes von der Literatur abgrenzen. Daneben hebt sich die Arbeit hinsichtlich des Anwendungsfalls für nicht-standardisierte Bauteile bzw. einzelgefertigte Neuentwicklungen, sowie der Betrachtung des Kontextes eines Wissensgraphen, ab. Des Weiteren wird durch die Wahl eines integrierten Ansatzes der Trend hinsichtlich integrierter Ansätze unterstützt (vgl. Altavilla et al., 2018, S. 17).

Die in diesem Kapitel diskutierten Zusammenhänge des entwickelten Kostenmodells sind im Folgenden anhand einer SWOT-Analyse mit Tabelle 6.1 zusammengefasst. Folglich werden die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des entwickelten Kostenmodells aufgeführt.

Tabelle 6.1.: SWOT-Analyse des entwickelten Kostenmodells

| Stärken | Schwächen |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Nachvollziehbarkeit und Erweiterbarkeit durch modularen Aufbau • Optimierbarkeit durch Parameter • stochastische Ergebnisse • ontologie-basiert | <ul style="list-style-type: none"> • Fokussierung auf die Fertigung • Keine Differenzierung in den Modellen der Regressionsmethode • Prozessanalyse ohne Betrachtung von Prozessparameter |
| Chancen | Risiken |
| <ul style="list-style-type: none"> • Optimierung anhand einer qualitativen Datengrundlage • Erweiterung der betrachteten Produktebenen, Kosten- und Zeitstrukturen • Integrierung von Job Shop Scheduling | <ul style="list-style-type: none"> • Ergebnisse der Forschung führen zu Bevorzungen alleinstehender ggü. integrierter Ansätze • Erweiterung erzeugt Komplexität und verringert die Nachvollziehbarkeit der Berechnungen |

7. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit sind die Berechnungen von Fertigungskosten und -zeiten von Produktneuentwicklungen betrachtet worden. Dabei hat der Fokus auf einer Anwendung der Einzel- fertigung und der Entwicklungsphase, sowie der Anwendung auf Basis eines bestehenden Wissensgraphen gelegen.

Das entwickelte Kostenmodell entspricht durch die Kombination eines intuitiven und analo- gischen Ansatzes einem integrierten Ansatz. Die Methode setzt sich aus drei Teilen zusammen. Mithilfe einer Ähnlichkeitsanalyse werden die ähnlichen Bauteile gegenüber des neuen Bau- teils generiert. Eine Prozessanalyse berechnet die ermittelten Kosten und Zeiten für das neue Bauteil, sowie für die ähnlichen Bauteile. Die ermittelten Ergebnisse werden abschließend mithilfe eines Korrekturfaktors für das neue Bauteil finalisiert.

Anhand eines selbstentwickelten Testdatensatzes ist die Funktion des Modells evaluiert wor- den. In Betrachtung der einzelnen Bestandteile konnte gezeigt werden, dass der integrierte Ansatz für die Berechnung der Fertigungskosten und -zeiten für Neuentwicklungen herange- zogen werden kann. Für eine Validierung und Optimierung des Modells ist insbesondere eine qualitative Datengrundlage gefordert.

Die entwickelte Methode ist insbesondere ontologie-basiert, stochastisch und integriert. Durch diese Charakteristika kann sich die Arbeit von dem Stand der Technik abheben. Folglich wird der Trend in Richtung dynamischer, digitaler und integrierter Ansätze unterstützt. Durch eine Erweiterung der Methode für die Produktebene kann sich die Methode der Forschungslücke der Betrachtung mehrerer Lebenslaufphasen, insbesondere über die Phase der Fertigung hinaus, widmen.

Die Optimierung und Ausarbeitung wird adressiert. Dabei kann eine Fallunterscheidung von Bauteilen untersucht werden. Folglich kann es vorteilhaft sein, für gewissen Szenarien auf alleinstehende Ansätze, in Anlehnung an die Konfiguration der Ähnlichkeit aus dem Kapitel 5.3, zurückzugreifen. Des Weiteren werden in der Industrie in einem besonderen Maß Expertenmeinungen in der Kosten- und Zeitermittlung berücksichtigt. In dem Zusammenhang ließe sich der entwickelte Algorithmus mithilfe eines intuitiven Fuzzy-Logik Ansatz ausbauen. Dabei kann die Fuzzy-Logik von Expertenmeinungen beeinflusst werden und dient dem Zweck der automatisierten Entscheidungsfindung bezüglich einer Auswahl eines optimalen Ansatzes für gewissen Kosten- und Zeitarten. Aufgrund der Regeln, die im Rahmen eines Fuzzy-Logik Ansatzes definiert werden, wird die Transparenz der Berechnungen und der dazugehörigen Entscheidungen gewahrt. Daneben ist die Verwendung von Fuzzy-Logik für die Kostenermittlung bereits untersucht und kann folglich herangezogen dargelegt.

Literaturverzeichnis

- Altavilla, S., Montagna, F., und Cantamessa, M. (2018). A Multilayer Taxonomy of Cost Estimation Techniques, Looking at the Whole Product Lifecycle. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140:1–19.
- Arkhipov, D. I., Battaïa, O., und Lazarev, A. A. (2017). Long-term production planning problem: scheduling, makespan estimation and bottleneck analysis. *International Federation of Automatic Control*, 50:7970–7974.
- Bender, B. und Gericke, K. (2021). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 9. Auflage.
- Campi, F., Mandolini, M., Favi, C., Checcacci, E., und Germani, M. (2020). An analytical cost estimation model for the design of axisymmetric components with open-die forging technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110:1869–1892.
- Cantamessa, M., Montagna, F., Altavilla, S., und Casagrande-Seretti, A. (2020). Data-driven design: the new challenges of digitalization on product design and development. *Design Society*, 6:1–33.
- Chang, J., Kong, X., und Yin, L. (2015). A novel approach for product makespan prediction in production life cycle. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80:1433–1448.
- Cheng, L., Tang, Q., Zhang, Z., und Wu, S. (2021). Data mining for fast and accurate makespan estimation in machining workshops. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32:483–500.
- Cicconi, P., Castorani, V., Germani, M., Mandolini, M., und Vita, A. (2020). A multi-objective sequential method for manufacturing cost and structural optimization of modular steel towers. *Engineering with Computers*, 36:475–497.
- Dengel, A. (2012). *Semantische Technologien: Grundlagen - Konzepte - Anwendungen*. Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, Kaiserslautern.
- Eddy, D. C., Krishnamurty, S., Grosse, I. R., und Steudel, M. (2020). Early design stage selection of best manufacturing process. *Journal of Engineering Design*, 31:1–36.
- Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U., und Mörtl, M. (2020). *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren*. Springer Vieweg, Berlin, 8. Auflage.
- Favi, C., Germani, M., und Mandolini, M. (2016). A Multi-objective Design Approach to Include Material, Manufacturing and Assembly Costs in the Early Design Phase. *The International Academy for Production Engineering CIRP*, 52:251–256.
- Favi, C., Marconi, M., Mandolini, M., und Germani, M. (2020). Big data analysis for the estimation of disassembly time and de-manufacturing activity. *CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference*, 27:617–622.
- Gottmann, J. (2019). *Produktionscontrolling*. Springer Gabler, Wiesbaden, 2. Auflage.

- Harik, R. F. und Barakat, F. G. (2010). Part Similarity Algorithm Based on Manufacturing Features Similarity. *Computer-Aided Design and Applications*, 7:663–674.
- Jong, A. W. D., Rubrico, J. I. U., Adachi, M., Nakamura, T., und Ota, J. (2019). A generalised makespan estimation for shop scheduling problems, using visual data and a convolutional neural network. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32:559–568.
- Köhler, T., Kleinhenz, L., Schäfer, P. M., Bergmann, J. P., und Peters, D. (2021). Development of a Methodology for the Digital Representation of Manufacturing Technology Knowledge. *Conference on Production Systems and Logistics*, 2:478–488.
- Krauß, J., , Dorißen, J., Mende, H., Frye, M., und and, R. H. S. (2019). Maschinelles Lernen in der Produktion - Anwendungsgebiete und frei verfügbare Datensätze. *Industrie 4.0 Management*, 2019:39–42.
- Kretschmer, R., Pfouga, A., Rulhoff, S., und Stjepandić, J. (2017). Knowledge-based design for assembly in agile manufacturing by using Data Mining methods. *Advanced Engineering Informatics*, 33:285–299.
- Kurasova, O., Marcinkevičius, V., Medvedev, V., und Mikulskienė, B. (2021). Early Cost Estimation in Customized Furniture Manufacturing Using Machine Learning. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 11:28–33.
- Liverani, A. und Ceruti, A. (2010). Interactive GT Code Management for Mechanical Part Similarity Search and Cost Prediction. *Computer-Aided Design and Applications*, 7:1–15.
- Lu, W., Qin, Y., Qi, Q., Zeng, W., Zhong, Y., Liu, X., und Jiang, X. (2016). Selecting a semantic similarity measure for concepts in two different CAD model data ontologies. *Advanced Engineering Informatics*, 30:449–466.
- Mack, O. und Khare, A. (2016). *Perspectives on a VUCA World*. Springer International Publishing, Schweiz.
- Mandolini, M., Campi, F., Favi, C., Cicconi, P., und Germani, M. (2020a). An Analytical Cost Model for Investment Casting. *International Design Conference*, 1:987–996.
- Mandolini, M., Campi, F., Favi, C., Germani, M., und Raffaelli, R. (2020b). A framework for analytical cost estimation of mechanical components based on manufacturing knowledge representation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107:1131–1151.
- Mandolini, M., Favi, C., Germani, M., Marconi, M., und Raffaelli, R. (2019). An Analytical Cost Estimation Approach for Generic Sheet Metal 3D Models. *Computer-Aided Design and Applications*, 16:936–950.
- Mirshekarian, S. und Şormaz, D. N. (2016). Correlation of job-shop scheduling problem features with scheduling efficiency. *Expert Systems with Application*, 62:131–147.
- Mockenhaupt, A. (2021). *Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Produktion*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Ning, F., Shi, Y., Cai, M., Xu, W., und Zhang, X. (2020). Manufacturing cost estimation based on a deep-learning method. *Journal of Manufacturing Systems*, 54:186–195.

- Osswald, M. (2021). Gabelköpfe. <https://www.mbo-osswald.de/shop/gabelkoepfe-gabelgelenke/gabelkoepfe/>. letzter Zugriff: 31.11.2021.
- Paturi, U. M. R. und Cheruku, S. (2021). Application and performance of machine learning techniques in manufacturing sector from the past two decades: A review. *Materials Today: Proceedings*, 38:2392–2401.
- Raaymakers, W. H. M. und Weijters, A. J. M. M. (2003). Makespan estimation in batch process industries: A comparison between regression analysis and neural networks. *European Journal of Operational Research*, 145:14–30.
- Relich, M. und Świć, A. (2020). Parametric Estimation and Constraint Programming-Based Planning and Simulation of Production Cost of a New Product. *Applied Science*, 10:1–13.
- Rijgersberg, H., van Assem, M., und Top, J. (2013). Ontology of units of measure and related concepts. *Semantic Web*, 4:3–13.
- Rupp, M. (2015). Machine learning for quantum mechanics in a nutshell. *International Journal of Quantum Chemistry*, 115:1058–1073.
- Sihn, W., Sunk, A., Nemeth, T., Kuhlmann, P., und Matyas, K. (2016). *Produktion und Qualität*. Carl Hanser Verlag, München.
- Takeda-Berger, S. L., Frazzon, E. M., Broda, E., und Freitag, M. (2020). Machine Learning in Production Scheduling: An Overview of the Academic Literature. *International Conference on Dynamics in Logistics*, 2:409–419.
- Tlija, M., Letaief, M. B., und Louhichi, B. (2018). CAD Comparison Model For Data Reuse And Manufacturing Cost Estimation. In *CIRP Design Conference*, Band 28, Seiten 59–65.
- VDI 2221 Blatt 1:2019-11 (2019). Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung.
- VDI 2234:1990-01 (1990). Wirtschaftliche Grundlagen für den Konstrukteur.
- VDI 2235:1987-10 (1987). Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen.
- VDI/VDE 3714 Blatt 1:2019-12 - Entwurf (2019). Implementierung und Betrieb von Big-Data-Anwendungen in der produzierenden Industrie - Durchführung von Big-Data-Projekten.
- VDI/VDE 3714 Blatt 2:2019-12 - Entwurf (2019). Implementierung und Betrieb von Big-Data-Anwendungen in der produzierenden Industrie - Datenqualität.
- Wang, J., Zhang, J., und Wang, X. (2018). A Data Driven Cycle Time Prediction With Feature Selection in a Semiconductor Wafer Fabrication System. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 31:173–182.
- Wazziki, M. E. und Ngo, A. D. (2019). Design for manufacture: Cost-estimating model for randomly oriented strand advanced composite aerospace parts. *Institution of mechanical engineers*, 233:1241–1251.

- Więcek, D., Więcek, D., und Kuric, I. (2019). Cost Estimation Methods of Machine Elements at the Design Stage in Unit and Small Lot Production Conditions. *Management Systems in Production Engineering*, 27:12–17.
- Ćwikła, G. und Bańczyk, K. (2021). Similarity of Parts Determined by Semantic Networks as the Basis for Manufacturing Cost Estimation. *International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications*, 15:320–330.
- Ćwikła, G., Grabowik, C., Bańczyk, K., und Łukasz Wiecha (2020). Assessment of Similarity of Elements as a Basis for Production Costs Estimation. *International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications*, 14:386–395.
- Yoo, S. und Kang, N. (2021). Explainable Artificial Intelligence for Manufacturing Cost Estimation and Machining Feature Visualization. *Expert Systems with Applications*, 183:1–19.
- Zohoori, B., Verbraeck, A., Bagherpour, M., und Khakdaman, M. (2019). Monitoring production time and cost performance by combining earned value analysis and adaptive fuzzy control. *Computers and Industrial Engineering*, 127:805–821.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 2.1. Bestandteile der DLZ eines Arbeitsvorgangs | 5 |
| 2.2. Struktur und Aufteilung der Durchlaufzeit in die Bestandteile | 6 |
| 2.3. Entwicklung der allgemeinen Produktkosten entlang des Produktlebenszyklus | 9 |
| 2.4. Struktur und Aufteilung der Selbstkosten in die Bestandteile | 10 |
| 2.5. Allgemeines Vorgehen der Entwicklung eines Algorithmus des MLs | 17 |
| 3.1. Dimensionen der Kostenermittlung | 21 |
| 3.2. Klassifizierung der Literatur bezüglich der Kostenermittlung | 23 |
| 3.3. Klassifizierung der Literatur bezüglich der Zeitermittlung | 24 |
| 4.1. Vereinfachte Darstellung der Import-Struktur des Wissensgraphen ManOn | 25 |
| 4.2. Fertigungskomponente im Ontologie-Kontext | 26 |
| 4.3. Angewendetes Ablaufschemata für die Konzeptionierung | 26 |
| 4.4. Übersicht von Produktebenen | 29 |
| 4.5. Hierarchie und Rangordnung der verfügbaren Daten | 30 |
| 4.6. Darstellung der Konzeptalternativen | 31 |
| 4.7. Aufbau des ausgewählten Konzeptes | 33 |
| 5.1. Erweiterte Darstellung der Import-Struktur des Wissensgraphen ManOn | 41 |
| 5.2. Implementierung der Kostenstruktur in ManOnPerformance | 42 |
| 5.3. Implementierung der Zeitstruktur in ManOnPerformance | 43 |
| 5.4. Ordner- und Dateistrukturbaum des Kostenmodells | 45 |
| 5.5. Benutzeranwendung des Algorithmus | 46 |
| 5.6. Ablauf der Berechnung auf oberster Ebene | 47 |
| 5.7. Aufbau des Ähnlichkeitsmaßes | 48 |
| 5.8. Ablauf der Berechnung der Ähnlichkeit der Struktur und der Restriktionen | 48 |
| 5.9. Ablauf der Berechnung des Ähnlichkeitsmaßes | 49 |
| 5.10. Logik der Berechnung der Ähnlichkeit zwischen den Features | 50 |
| 5.11. Ablauf der Distanzberechnung der Ähnlichkeit der Restriktionen | 51 |
| 5.12. Ablauf der Berechnungen der Prozessanalyse | 52 |
| 5.13. Ablauf der Ermittlung der Modellergebnisse | 53 |
| 5.14. Ablauf der Berechnung der finalen Ergebnisse der Prozessanalyse | 53 |
| 5.15. Übersicht der Testbauteil-Variationen | 55 |
| 5.16. Beispielhafte Zuweisung von MF | 56 |
| 5.17. Auswertung der Testbauteile anhand des Bestimmtheitsmaßes R2 | 58 |
| 5.18. Boxplot der ermittelten Kosten gegenüber den Istkosten | 59 |
| 5.19. Boxplot der ermittelten Zeiten gegenüber den Istzeiten | 59 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|------|
| 3.1. Übersicht der Anwendung von ML in der Produktion | 18 |
| 3.2. Klassifizierung der Kostenermittlung | 22 |
| 4.1. Generierte Werte für Szenario 1 der Vergleiche von Distanzmetriken | 36 |
| 4.2. Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 1 | 36 |
| 4.3. Fortsetzung Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 1 | 37 |
| 5.1. Definierte Parameter des Algorithmus | 46 |
| 5.2. Gegenüberstellung der durchschnittlichen R2-Ergebnisse | 57 |
| 6.1. SWOT-Analyse des entwickelten Kostenmodells | 63 |
| A.1. Klassifizierung der Literatur bezüglich der Kostenermittlung | VIII |
| A.2. Fortsetzung der Klassifizierung der Literatur bezüglich der Kostenermittlung | IX |
| A.3. Klassifizierung der Literatur bezüglich der Zeitermittlung | X |
| B.4. Generierte Werte für Szenario 2 der Vergleiche von Distanzmetriken | XI |
| B.5. Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 2 | XI |
| B.6. Fortsetzung der Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 2 | XI |
| B.7. Generierte Werte für Szenario 3 der Vergleiche von Distanzmetriken | XII |
| B.8. Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 3 | XII |
| B.9. Fortsetzung der Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 3 | XII |

Anhang

Im Folgenden befinden sich mit Kapitel A die detaillierte Klassifizierung der Literatur in Bezug zu Kapitel 3. Daneben sind mit Kapitel B die weiteren Distanzen aus Kapitel 4.3.1 dokumentiert.

A. Klassifizierung der Literaturanalyse

Die Literatur, die für Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4 herangezogen wird, ist im Folgenden klassifiziert. Die Ergebnisse sind mit Tabelle A.1 bis Tabelle A.3 dargestellt.

Die Klassifizierung erfolgt dabei in Anlehnung an die Dimensionen des Frameworks von Altavilla et al. (vgl. Abbildung 3.1). Die Dimensionen sind wie folgt nummeriert:

1. die Art der Analyse,
2. die Methode der Kostenermittlung,
3. die Produkt- und Prozesseigenschaften,
4. die Zielsetzung der Kostenermittlung und der Lebenslaufphase und
5. die Kostenbetrachtung.

Tabelle A. 1.: Klassifizierung der Literatur bezüglich der Kostenermittlung

| Literatur | Dimension 1 | Dimension 2 | Dimension 3 | Dimension 4 | Dimension 5 | Zeit integriert | Bemerkung |
|--------------------------|------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|--|
| Favi et al. (2016) | integrated, intuitive / analytical | deterministic | high complexity | design optimization | early development | nein | rule based und Multi Criteria |
| Kretschmer et al. (2017) | single, intuitive | deterministic, historical data, similar parts | series production with high variance | design evaluation | assembly | nein | case based data mining, similar parts via clustering |
| Tilja et al. (2018) | single, intuitive | deterministic, historical data, similar parts | mechanical parts | planning, design | manufacturing | nein | case based, feature similarity |
| Więcek et al. (2019) | single, analytical | deterministic, historical data | machine elements, small lot | planning, design | rather Whole Life Cycle | nein | activity based costing |
| Mandolini et al. (2019) | single, analytical | deterministic, current data | low complexity | conceptual, designer | manufacturing | in Berechnung | cost breakdown |
| Zohoori et al. (2019) | integrated, intuitive / analytical | stochastic, current data | standardized | detailed | production | ja | rather monitoring als Ermittlung, Ansatz aus earned value analysis und fuzzy Logik |
| Wazziki und Ngo (2019) | single, parametric | deterministic, historical data | aerospace | conceptual | production | ja | Neuronales Netz |
| Yoo und Kang (2021) | single, analogical | deterministic, current data | mechanical parts | conceptual | manufacturing | nein | Neuronales Netz |
| Ning et al. (2020) | single, analogical | deterministic, current data | mechanical parts | conceptual | manufacturing | nein | Neuronales Netz |

Tabelle A.2.: Fortsetzung der Klassifizierung der Literatur bezüglich der Kostenermittlung

| Literatur | Dimension 1 | Dimension 2 | Dimension 3 | Dimension 4 | Dimension 5 | Zeit integriert | Bemerkung |
|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|
| Eddy et al. (2020) | single, intuitive | deterministic, current data | low complexity | planning | manufacturing | in Berechnung | rule based |
| Ćwikła et al. (2020) | single, intuitive | deterministic, historical data | similar parts | conceptual | production | nein | semantic similarity |
| Relich und Świć (2020) | single, parametric | deterministic | standardized | decision maker | eher Whole Life Cycle | nein | |
| Cicconi et al. (2020) | integrated, analytical / parametric | deterministic | standardized | design optimization | manufacturing | nein | |
| Mandolini et al. (2020b) | single, analytical | deterministic | mechanical parts | design evaluation | manufacturing | nein | |
| Campi et al. (2020) | single, analytical | deterministic, current data | mechanical parts | design evaluation | manufacturing | nein | |
| Mandolini et al. (2020a) | single, analytical | deterministic | standardized | design optimization | manufacturing | in Berechnung | |
| Ćwikła und Bańczyk (2021) | single, intuitive | deterministic, historical data | standardized | design evaluation | whole Life Cycle | nein | semantic similarity |
| Kurasova et al. (2021) | single, analogical | deterministic, historical data | furniture manufacturing | design | production | nein | regression algorithm |

Tabelle A.3.: Klassifizierung der Literatur bezüglich der Zeitermittlung

| Literatur | Dimension 1 | Dimension 2 | Dimension 3 | Dimension 4 | Dimension 5 | Bemerkung |
|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------|---------------------|------------------------|--|
| Raaymakers und Weijers (2003) | single, analogical | stochastic | mechanical parts | production planning | production | Vergleich von Regression und ANN |
| Chang et al. (2015) | single, analogical | deterministic, historical data | aviation | production planning | production | Neuronales Netz, SAIGA-BPNN |
| Arkhipov et al. (2017) | single, intuitive | stochastic | industrial | production planning | production | heuristischer Ansatz |
| Wang et al. (2018) | integrated, intuitive / analogical | deterministic | mechanical parts | production planning | production, cycle time | Vergleich vers. Methoden; Ansatz aus logistischer Regression und Fuzzy Logik |
| Jong et al. (2019) | single, analogical | deterministic | mechanical parts | production planning | production | Neuronales Netz |
| Favi et al. (2020) | single, analogical | deterministic | mechanical parts | conceptual | disassembly | Data Mining, Clustering |
| Cheng et al. (2021) | integrated, intuitive / analogical | deterministic | mechanical parts | conceptual | production | Ansatz aus feature similarity und Neuronalem Netz |

B. Szenarienbetrachtung zur Auswahl einer Distanzmetrik

Im zweiten Szenario wurde jeweils die Anzahl der Feature der Bauteile beliebig verringert. Die zu erwartende Reihenfolge der ähnlichen Bauteile lautet in absteigender Reihenfolge: ID 1, ID 2, ID 3, ID 5, ID 4, ID 6.

Tabelle B.4.: Generierte Werte für Szenario 2 der Vergleiche von Distanzmetriken

| Feature | Bauteil 1 | Bauteil 2 | Bauteil 3 | Bauteil 4 | Bauteil 5 | Bauteil 6 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ID 1 | 5 | 7 | 3 | 5 | 0 | 0 |
| ID 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 |
| ID 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| ID 4 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| ID 5 | 7 | 7 | 7 | 10 | 0 | 0 |
| ID 6 | 1 | 1 | 1 | 21 | 0 | 0 |
| ID 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ID 8 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| ID 9 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| ID 10 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 0 |
| ID 11 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| ID 12 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| ID 13 | 79 | 79 | 79 | 79 | 79 | 0 |
| ID 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| ID 15 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 0 |

Tabelle B.5.: Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 2

| Distanzmetrik | 1 vs. 1 | 2 vs. 1 | 3 vs. 1 |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| RBF Kernel | 1.0000 | 0.7659 | 0.6703 |
| Cosine Distanz | 0.0000 | 0.0003 | 0.0004 |
| Linear Kernel | 6943.0000 | 6953.0000 | 6931.0000 |
| Polynomial Kernel | 99811250.3443 | 100242213.698 | 99295726.9736 |
| Sigmoid Kernel | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Laplacian Kernel | 1.0000 | 0.8752 | 0.7659 |

Tabelle B.6.: Fortsetzung der Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 2

| Distanzmetrik | 4 vs. 1 | 5 vs. 1 | 6 vs. 1 |
|-------------------|----------------|---------------|---------|
| RBF Kernel | 0.0000 | 0.0010 | 0.0000 |
| Cosine Distanz | 0.0299 | 0.0075 | 0.9880 |
| Linear Kernel | 6957.0000 | 6839.0000 | 1.0000 |
| Polynomial Kernel | 100414945.7920 | 95569357.2480 | 1.2136 |
| Sigmoid Kernel | 1.0000 | 1.0000 | 0.7882 |
| Laplacian Kernel | 0.1353 | 0.2307 | 0.0001 |

Im dritten Szenario wurde jeweils ein Feature der Bauteile um die Anzahl eins verringert. Folglich ist zu erwarten, dass für alle Bauteile innerhalb einer betrachteten Distanzmetrik dieselbe Ähnlichkeit prognostiziert wird.

Tabelle B.7.: Generierte Werte für Szenario 3 der Vergleiche von Distanzmetriken

| Feature | Bauteil 1 | Bauteil 2 | Bauteil 3 | Bauteil 4 | Bauteil 5 | Bauteil 6 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ID 1 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| ID 2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| ID 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| ID 4 | 5 | 5 | 6 | 50 | 5 | 5 |
| ID 5 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| ID 6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ID 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ID 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ID 9 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| ID 10 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| ID 11 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| ID 12 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| ID 13 | 79 | 79 | 79 | 79 | 79 | 78 |
| ID 14 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| ID 15 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 |

Tabelle B.8.: Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 3

| Distanzmetrik | 1 vs. 1 | 2 vs. 1 | 3 vs. 1 |
|-------------------|---------------|---------------|----------------|
| RBF Kernel | 1.0000 | 0.93551 | 0.93551 |
| Cosine Distanz | 0.0000 | 0.00007 | 0.00007 |
| Linear Kernel | 6943.0000 | 6938.0000 | 6948.0000 |
| Polynomial Kernel | 99811250.3443 | 99596232.6450 | 100026577.2880 |
| Sigmoid Kernel | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Laplacian Kernel | 1.0000 | 0.93551 | 0.93551 |

Tabelle B.9.: Fortsetzung der Auswertung verschiedener Distanzmetriken - Szenario 3

| Distanzmetrik | 4 vs. 1 | 5 vs. 1 | 6 vs. 1 |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| RBF Kernel | 0.93551 | 0.93551 | 0.93551 |
| Cosine Distanz | 0.00007 | 0.00007 | 0.00001 |
| Linear Kernel | 6942.0000 | 6944.0000 | 6864.0000 |
| Polynomial Kernel | 99768222.0720 | 99854290.9864 | 96449982.0560 |
| Sigmoid Kernel | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| Laplacian Kernel | 0.93551 | 0.93551 | 0.93551 |