

Bachelorarbeit

Entwicklung einer Methode zur multikriteriellen modellbasierten Entscheidungsfindung für Fügetechnologien

Development of a method for multi-criteria model-based decision-making for joining technologies

Diese Arbeit wurde am Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung vorgelegt von:

Jonas Werheid

Matrikelnummer: 377377

Fakultätsinterner Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs

Zweitprüfer: Dr.-Ing Jörg Berroth

Betreuender wissenschaftlicher Mitarbeiter: Julius Berges, M. Sc.

Aachen, den 23.06.2021

Eidesstattliche Versicherung Statutory Declaration in Lieu of an Oath

Name, Vorname/Last Name, First Name

Matrikelnummer (freiwillige Angabe)
Matriculation No. (optional)

Ich versichere hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit/Bachelorarbeit/
Masterarbeit* mit dem Titel

I hereby declare in lieu of an oath that I have completed the present paper/Bachelor thesis/Master thesis* entitled

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe (insbes. akademisches Ghostwriting) erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Für den Fall, dass die Arbeit zusätzlich auf einem Datenträger eingereicht wird, erkläre ich, dass die schriftliche und die elektronische Form vollständig übereinstimmen. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

independently and without illegitimate assistance from third parties (such as academic ghostwriters). I have used no other than the specified sources and aids. In case that the thesis is additionally submitted in an electronic format, I declare that the written and electronic versions are fully identical. The thesis has not been submitted to any examination body in this, or similar, form.

Ort, Datum/City, Date

Unterschrift/Signature

*Nichtzutreffendes bitte streichen

*Please delete as appropriate

Belehrung:

Official Notification:

§ 156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Para. 156 StGB (German Criminal Code): False Statutory Declarations

Whoever before a public authority competent to administer statutory declarations falsely makes such a declaration or falsely testifies while referring to such a declaration shall be liable to imprisonment not exceeding three years or a fine.

§ 161 StGB: Fahrlässiger Falscheid; fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt

(1) Wenn eine der in den §§ 154 bis 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.

(2) Strafflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des § 158 Abs. 2 und 3 gelten entsprechend.

Para. 161 StGB (German Criminal Code): False Statutory Declarations Due to Negligence

(1) If a person commits one of the offences listed in sections 154 through 156 negligently the penalty shall be imprisonment not exceeding one year or a fine.

(2) The offender shall be exempt from liability if he or she corrects their false testimony in time. The provisions of section 158 (2) and (3) shall apply accordingly.

Die vorstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

I have read and understood the above official notification:

Ort, Datum/City, Date

Unterschrift/Signature

Thema

Das Projekt Tailored-Joints beschäftigt sich mit den Auslegungs- und Entwicklungsmethoden einer neuartigen Kunststoff-Metall-Verbindung. Dabei werden mit einem Laser Linienstrukturen in eine Metalloberfläche eingebracht und anschließend Kunststoff mittels Spritzgusses an die Oberfläche gefügt. Der flüssige Kunststoff dringt in die Kavitäten ein und erstarrt dort. Es entsteht eine form- und stoffschlüssige Verbindung.

Diese Kunststoff-Metall-Verbindung ist bisher nur unzureichend erforscht. Aufgrund der Komplexität und Kosten experimenteller Untersuchungen, ist eine digitale Abbildung des Fügeprozesses eine agile Methodik zur Erforschung und Weiterentwicklung des Projektes. Eine solche digitale Abbildung kann in Form von Modellen in einer Modellierungssprache wie der Systems Modelling Language (SysML) abgebildet werden. Die Summe dieser Modelle ist die digitale Abbildung oder der „Digitale Zwilling“ der Fügetechnologie.

Ein wichtiger Schritt neben der Erforschung dieser Technologie ist der Vergleich mit anderen Fügetechnologien, um in der Praxis eine Auswahl der Fügetechnologie für die richtigen Projekte treffen zu können. Dabei ist es eine Möglichkeit, weitere Fügetechnologien in der SysML abzubilden, um anschließend eine Vergleichbarkeit mit einem übergeordneten Entscheidungsmodell zu ermöglichen. Das Entscheidungsmodell vergleicht somit verschiedene standardisierte Modelle von Fügetechnologien.

Ziel der Arbeit ist es, ein Entscheidungsmodell für einen solchen Vergleich zu erarbeiten. Dabei wird zunächst ein Einblick in den aktuellen Stand der Forschung zur Auswahl von Fügetechnologien und zur Entscheidungsfindung mithilfe der Systems Modeling Language gegeben. Anschließend erfolgt eine Vorstellung des Aufbaus der Modelle der verschiedenen Fügetechnologien in der Systems Modeling Language, sowie eine Vorstellung eines Entscheidungsmodells, welches mithilfe von Python implementiert wird. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Berücksichtigung multikriterieller Faktoren zur Bewertung der Fügetechnologien und der Entscheidungsfindung unter Unsicherheiten. Die Entscheidungsmethodik soll dabei als modulare Software, bestehend aus SysML und Python, für spezifische Anwendungsfälle erweiterbar sein.

Inhalt

Formelzeichen	III
Abkürzungen.....	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Grundlagen der Entscheidungstheorie.....	2
2.2 Entscheidungsansätze zur Auswahl von Fügetechnologien	3
2.2.1 Multidimensionale Entscheidungsansätze	3
2.2.2 Entscheidungsansätze unter Unsicherheiten.....	4
2.2.3 Entscheidungsansätze mit qualitativen und quantitativen Anforderungen.....	6
2.3 Modellbasierte Systementwicklung	6
2.3.1 Systems Modeling Language.....	7
2.3.2 Entscheidungsansätze in SysML.....	9
3 Problemstellung und Zielsetzung	11
4 Entscheidungsmodell	14
4.1 Aufbau des Entscheidungsmodells	14
4.1.1 Aufbau der Datenbank.....	14
4.1.2 Aufbau des Skripts in Python.....	15
4.2 Entscheidungsalgorithmus für eine Fügetechnologieauswahl	16
4.2.1 Einschränkung der Fügetechnologieauswahl durch Ausschlusskriterien	17
4.2.2 Vergleich von qualitativen Faktoren.....	18
4.2.3 Vergleich von quantitativen Faktoren.....	20
4.2.4 Fügetechnologieauswahl	22
5 Aufbau und Integration einer Solution-Element Library.....	25
5.1 Struktur der Solution-Element Library	25
5.2 Aufbau eines Expertenmodells eines Solution-Elements.....	27
5.2.1 Modellierung von statistischen Unsicherheiten.....	28
5.2.2 Modellierung von Unsicherheiten aufgrund fehlender Daten.....	30
5.3 Integration in das Entscheidungsmodell	32
6 Validierung durch Fallbeispiele.....	35
6.1 Dachträger	35
6.2 Fahrradlenker.....	39
7 Kritische Hinterfragung und Diskussion der Methodik.....	42
8 Fazit und Ausblick	43
9 Literaturverzeichnis	44

Anhang 1	Anforderungsprofil und Fügetechnologieauswahl der Fallbeispiele in der Benutzerschnittstelle in Cameo Systems Modeler	46
Anhang 2	Ausschnitte aus der Struktur der Solution-Element Library und der Modellierung von Expertenmodellen.....	49
Anhang 3	Ausschnitte aus der Softwarestruktur und dem Programmcode des Entscheidungsmodells in Python.....	51
Anhang 4	Fügetechnologiespezifikationen der ausgewählten Fügetechnologien in JSON	53
Anhang 5	Datenschnittstelle zwischen dem Entscheidungsmodell und der Solution-Element Library in MATLAB	55

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
w_i		Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignis i
LCC_j		Life-Cycle Costs von Projekt j
CI_j		Kostemodul von Projekt j
TVI_j		Technologiemodul von Projekt j
SII_j		Nachhaltigkeitsmodul von Projekt j
PI_j		Gesamtmodul von Projekt j
p_i		Präferenzkoeffizient für Modul i
μ		Erwartungswert
σ		Standardabweichung
g	m/s^2	Schwerebeschleunigung
ρ	kg/m^3	Dichte
V	m^3	Volumen
q_0	kN/mm	Linienbelastung
$G(x)$		Dichtefunktion der Gaußverteilung
$\text{erf}(x)$		Verteilungsfunktion der Gaußverteilung
$E(G(x))$		Erwartungswert der Gaußverteilung
$\text{Var}(G(x))$		Varianz der Gaußverteilung
A_i	kN	Auflagerkraft von Lager A in Richtung i
B_i	kN	Auflagerkraft von Lager B in Richtung i
F_{ges}	kN	Gesamtangriffskraft
A	m^2	Fügefläche

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
SysML	Systems Modelling Language
UML	Unified Modeling Language
MBSE	Model-Based Systems Engineering
bdd	Block Definiton Diagram
ibd	Internal Block Diagram
par	Parametric Diagram
req	Requirement Diagram
act	Activity Diagram
MTC	material thickness combination
CSM	Cameo Systems Modeler
JSON	JavaScript Object Notation
API	Application Programming Interface
GUI	Graphical User Interface
IMSE	Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verschiedene Skalen zur Messung von Ereignissen und Ergebnissen nach (Nitzsch 2017) (Eigene Darstellung).....	2
Abbildung 2: Dilemma der Konstruktion (Ehrlenspiel, K, Integrierte Produktentwicklung 2003)	5
Abbildung 3: Bewertungsstufen während des Produktionentstehungsprozesses (Choudry, Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien 2019)	5
Abbildung 4: SysML Taxonomie (Eigene Darstellung)	7
Abbildung 5: Block Definition Diagram (Eigene Darstellung).....	8
Abbildung 6: Internal Block Diagram (Eigene Darstellung).....	8
Abbildung 7: Parametric Diagram (Eigene Darstellung)	9
Abbildung 8: Activity Diagram (Links) und State Maschine Diagram (Rechts) (Eigene Darstellung)	9
Abbildung 9: Model based decision-making framework nach (Russell 2012) (Eigene Darstellung)	10
Abbildung 10: Aufbau der Solution-Element Library (Eigene Darstellung)	12
Abbildung 11: Ablaufdiagramm zur Erarbeitung des Entscheidungsansatzes (Eigene Darstellung)	13
Abbildung 12: Interaktion zwischen dem Benutzer, Python und der Datenbank nach UML Notation (Sequenzdiagramm) (Eigene Darstellung)	14
Abbildung 13: Interaktion zwischen verschiedenen Modulen des Entscheidungsskripts nach UML- Notation (Aktivitätsdiagramm) (Eigene Darstellung).....	16
Abbildung 14: Prozedurale Aktivität des Entscheidungsskripts in der objektorientierten Softwarestruktur nach UML-Notation (Aktivitätsdiagramm) (Eigene Darstellung)	17
Abbildung 15: Beschreibung von Anforderungen und Fügetechnologiespezifikationen in einem unscharfen Spektrum (Eigene Darstellung).....	19
Abbildung 16: Gauß-Verteilung zur Abschätzung der Festigkeit (Eigene Darstellung).....	21
Abbildung 17: Anforderungserfüllung der gaußverteilten Festigkeitsabschätzung (Eigene Darstellung)	22
Abbildung 18: Ausschnitt der Struktur der Solution-Element Library in einem BDD (Eigene Darstellung)	25
Abbildung 19: Solution-Element der Fügetechnologie Tailored-Joints nach (Jacobs, Zerwas und Spütz 2021) (Eigene Darstellung).....	26
Abbildung 20: Interne Strukturmodellierung der Solution-Element Library mit zwei beispielhaften Solution- Elements in einem IBD (Eigene Darstellung)	27

Abbildung 21: Festigkeitsmodellierung des Solution-Elements Tailored-Joints in einem Parametric Diagram (Eigene Darstellung)	28
Abbildung 22: Einfluss eines gaußverteilten Faktors auf ein Produkt mit einem konstanten Faktor k (Eigene Darstellung).....	29
Abbildung 23: Regression zur Interpolation eines Intervalls (Eigene Darstellung)	31
Abbildung 24: Modulare Zusammensetzung der Unsicherheitsabschätzung aufgrund fehlender Daten in einem Parametric Diagram (Eigene Darstellung)	32
Abbildung 25: Modularer Aufbau der Software mit Ablaufdiagramm (Eigene Darstellung)	32
Abbildung 26: Ablaufdiagramm (Eigene Darstellen).....	33
Abbildung 27: Graphical-User-Interface in Cameo Systems Modeler (Eigene Darstellung).....	34
Abbildung 28: Technische Zeichnung des Dachträgers in Anlehnung an die Konstruktion von Moers, Frederik (Eigene Darstellung).....	36
Abbildung 29: Vereinfachter Belastungsfall des Dachträgers (Eigene Darstellung)	36
Abbildung 30: Technische Zeichnung eines Fahrradlenkers in Anlehnung an eine open-source Konstruktion von GrabCAD (Eigene Darstellung).....	39
Abbildung 31: Fügetechnologieentscheidung mithilfe der vorgestellten Methodik aus einer iterativen Perspektive (Eigene Darstellung)	42
Abbildung 32: Möglichkeiten der Erweiterung des Modularen Aufbaus der Software (Eigene Darstellung)	43
Abbildung 33: Grafische Benutzerschnittstelle in Cameo Systems Modeler zur Übergabe des Use-Cases und Anforderungsprofiles	46
Abbildung 34: Konsolenausgabe des Fallbeispiels Dachträger in Cameo System Modeler.....	47
Abbildung 35: Konsolenausgabe des Fallbeispiels Fahrradlenker in Cameo Systems Modeler	48
Abbildung 36: Struktur der Solution-Element Library als Block Definition Diagram in Cameo Systems Modeler	49
Abbildung 37: Expertenmodell (Kostenmodell des Solution-Elements Schweißen (WIG)) als Parametric Diagram in Cameo Systems Modeler.....	50
Abbildung 38: Expertenmodell (Produktionszykluszeitmodell des Solution-Elements Schrauben) als Parametric Diagram in Cameo System Modeler	50
Abbildung 39: Klassenstruktur der Python Datei Classes.py in einem UML-Klassendiagramm in PlantUML.....	51

Abbildung 40: Funktionen der Python Datei Functions.py in einem UML-Klassendiagramm in PlantUML	51
Abbildung 41: Ausschnitt des Programmcodes der Python Datei Classes.py in der Entwicklungsumgebung Spyder3 (Klasse JoiningTechnology mit Konstruktor und Methode zur Initialisierung der Datenbank in JSON).....	52
Abbildung 42: Ausschnitt des Programmcodes der Python Datei Functions.py in der Entwicklungsumgebung Spyder3 (Funktion zur Übergabe der Expertenmodelle der Solution-Elements an die Instanzen der Fügetechnologien)	52
Abbildung 43: Ausschnitt des Programmcodes der Python Datei Main.py in der Entwicklungsumgebung Spyder3 (Auswahl des Ablaufes des Entscheidungsalgorithmus)	52
Abbildung 44: Fügetechnologiespezifikationen der Fügetechnologien Schweißen(WIG), Löten und Kleben(Epoxidharz) als JSON-Strukturdiagramm in PlantUML (Ausschlusskriterien=booleans,, Quantitative Kriterien=parameters, , Qualitative Kriterien=fuzzy set).....	53
Abbildung 45: Fügetechnologiespezifikationen der Fügetechnologien Tailored-Joints, Schrauben und Nieten als JSON-Strukturdiagramm in PlantUML (Ausschlusskriterien=booleans, Quantitative Kriterien=parameters, , Qualitative Kriterien=fuzzy set)	54
Abbildung 46: Fügetechnologiespezifikation der Fügetechnologie Kleben(Epoxidharz) in der Datenbank als JSON-Format.....	54
Abbildung 47: Programmcode der Datenschnittstelle in MATLAB zwischen Cameo Systems Modeler und Python	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel einer Ergebnismatrix nach (Nitzsch 2017) (Eigene Darstellung)	3
Tabelle 2: Beispielhafter Datensatzausschnitt einer Fügetechnologie (Eigene Darstellung)	15
Tabelle 3: Beispielhafte Anforderungen von Ausschlusskriterien und Anforderungserfüllung von 3 verschiedenen Fügetechnologien (Eigene Darstellung)	18
Tabelle 4: Skalierung von Qualitativen Anforderungen und Qualitativen Fügetechnologiespezifikationen	19
Tabelle 5: Beispielhafte qualitative Anforderungen und Anforderungserfüllungen von einer Fügetechnologie (Eigene Darstellung)	19
Tabelle 6: Beispielhafte quantitative Anforderungen und Anforderungserfüllung von zwei verschiedenen Fügetechnologien (Eigene Darstellung)	21
Tabelle 7: Beispielhaftes Anforderungsprofil mit Anforderungserfüllung der Fügetechnologie Kleben (Epoxidharz) (Eigene Darstellung).....	23
Tabelle 8: Beispielhafter Vergleich der Gesamtbewertung verschiedener Fügetechnologien (Eigene Darstellung)	23
Tabelle 9: Beispielhafter Vergleich einer alternativen Gesamtbewertung von Fügetechnologien (Eigene Darstellung)	24
Tabelle 10: Anforderungsprofil des Fallbeispiels Dachträger (Eigene Darstellung).....	37
Tabelle 11: Ausschluss verschiedener Fügetechnologien im Fallbeispiel Dachträger (Eigene Darstellung)	38
Tabelle 12: Anforderungserfüllung ausgewählter Kriterien der Fügetechnologien Kleben (Epoxidharz) und Tailored-Joints im Fallbeispiel Dachträger (Eigene Darstellung)	38
Tabelle 13: Anforderungsprofil des Fallbeispiels Fahrradlenker (Eigene Darstellung)	40
Tabelle 14: Ausschluss verschiedener Fügetechnologien im Fallbeispiel Fahrradlenker	40
Tabelle 15: Anforderungserfüllung ausgewählter Kriterien von Schrauben und Nieten im Fallbeispiel Fahradlenker (Eigene Darstellung).....	41
Tabelle 16: Anforderungsprofil des Fallbeispiels Dachträger (Eigene Darstellung).....	47
Tabelle 17: Anforderungsprofil des Fallbeispiels Fahrradlenker (Eigene Darstellung)	47

1 Einleitung

Die Diversität verschiedener Fügetechnologien, immer kürzere Entwicklungszyklen und die Berücksichtigung verschiedenster ökologischer, ökonomischer und technologischer Anforderungen, stellen den Entwicklungsprozess von technischen Produkten vor neuen Herausforderungen. Eine agile Methode für die Auswahl einer Fügetechnologie, welche diesen Anforderungen gerecht wird, ist notwendig. (Abele und Reinhart 2011)

Zu einem frühen Entwicklungszeitpunkt sind oftmals nicht alle Anforderungen eines Produktes bekannt. Fehlende oder unklare Anforderungen führen auch zu Unsicherheiten innerhalb der Auswahl einer Fügetechnologie. Die verschiedenen Fügetechnologien müssen somit oftmals unter Unsicherheiten miteinander verglichen werden (Choudry, Kaspar, et al. 2018). Informationen aus vergangenen Projekten und darin getroffene Entscheidungen stehen dabei insbesondere bei neuen, vielversprechenden Fügetechnologien, nicht zur Verfügung. (Saphir A. Choudry 2019).

In der industriellen Praxis entscheiden hierbei häufig die zuständigen Konstrukteure nach Ihrem Wissen über die Auswahl der Fügetechnologie. Methodische Ansätze können Wissen und Intuition der Konstrukteure ergänzen und stetig modifiziert werden. Durch ihren dokumentierten Aufbau ist eine Reproduzierbarkeit getroffener Entscheidungen und damit eine Transparenz innerhalb des Entscheidungsprozesses gewährleistet. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es bereits verschiedene Ansätze eine solche Entscheidung methodisch durchzuführen. In diesen Ansätzen werden relevante Kennzahlen wie spezifische Kosten der Fügetechnologien analytisch in Formeln zusammengefasst und mit gegebenen Anforderungen verglichen.

Eine vielversprechende Alternative sind modellbasierte Entscheidungsansätze. Die verschiedenen Alternativen werden hierbei in Modellen abgebildet. Anschließend werden die verschiedenen Modelle miteinander verglichen. Der Ansatz ermöglicht eine systematische Herangehensweise an Entscheidungen und ist mit dem Aufbau der Modelle individualisierbar (Russell 2012). Es können Unsicherheiten und unternehmensspezifische Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Ein weiterer Vorteil ist die Verknüpfung verschiedener Untermodelle einer Fügetechnologie. Eine Beeinflussung zwischen verschiedenen Perspektiven, wie einer ökonomischen und einer ökologischen Perspektive, kann somit modelliert werden. Ökonomische, ökologische und technologische Modelle erlauben auch eine Betrachtung in verschiedenen Dimensionen und somit eine multikriterielle Entscheidungsfindung. Grafische Modellierungssprachen wie die Unified Modeling Language (UML) oder die Systems Modelling Language können für eine solche Modellierung verwendet werden. Diese ermöglichen eine einfache Implementierung von Modellen, sowie eine unkomplizierte Integration von Daten in die implementierten Modelle.

In der folgenden wissenschaftlichen Arbeit soll ein solcher modellbasierter Ansatz für die Auswahl einer Fügetechnologie vorgestellt werden. Ziel dieser Arbeit ist damit zum einen der Ansatz der Fügetechnologieauswahl auf Basis von Modellen, als auch der Aufbau und die Implementierung der Modelle selber.

2 Stand der Technik

In Kapitel 2.1 werden zunächst die Grundlagen der Entscheidungstheorie erläutert. Anschließend wird in Kapitel 2.2 der aktuelle Kenntnisstand der Forschung zur Auswahl von Fügetechnologien zusammengefasst. Dabei werden aktuelle Methodiken zur multidimensionalen (multikriteriellen) Entscheidungsfindung, sowie zu Entscheidungsansätzen unter Unsicherheiten und der Berücksichtigung qualitativer und quantitativer Faktoren beschrieben.

Nachfolgend betrachtet das Kapitel 2.3 die theoretischen Grundlagen der modellbasierten Systemmodellierung mit Hilfe der Systems Modeling Language und ihren Anwendungsgebieten, sowie den bisherigen Forschungsstand der Modellierung von Entscheidungsprozessen in SysML.

2.1 Grundlagen der Entscheidungstheorie

Die Entscheidungslehre unterscheidet die Kategorien intuitive Entscheidungen und analytische Entscheidungen (Nitzsch 2017). Intuitive Entscheidungen sind stark mit dem Gebiet der Psychologie verbunden und werden nicht näher Bestandteil dieser Arbeit sein. In analytischen Entscheidungen werden Ziele und Alternativen messbar erfasst um einen systematischen Vergleich zu ermöglichen und die Entscheidung anschließend nach diesem Vergleich zu treffen.

Eine Messung kann in verschiedenen Skalen erfolgen. Die Auswahl einer Skala hängt dabei von der Quantifizierbarkeit der Ziele und Handlungsoptionen ab. Ist eine Quantifizierbarkeit möglich, können Informationen diskret oder stetig dargestellt werden. Sind Handlungsoptionen und Ziele nur qualitativ zuordenbar, werden diese nominal oder ordinal erfasst. (Siehe Abbildung 1)

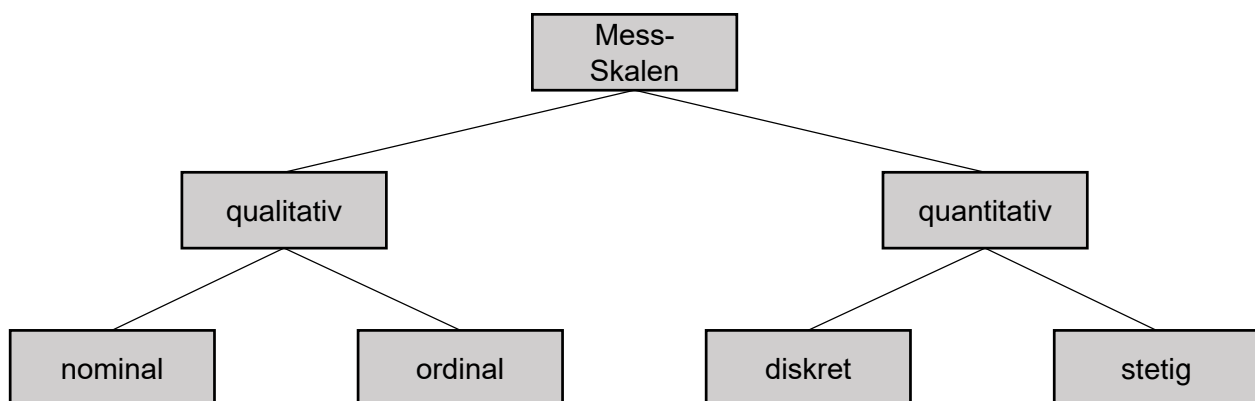


Abbildung 1: Verschiedene Skalen zur Messung von Ereignissen und Ergebnissen nach (Nitzsch 2017) (Eigene Darstellung)

Eine Möglichkeit quantitative Entscheidungsprozesse tabellarisch zu erfassen ist die Ergebnismatrix. In dieser werden die Zustände, welche auf eine Entscheidung folgen, nebeneinander dargestellt. Im folgenden Beispiel können auf eine Entscheidung jeweils zwei Zustände folgen, welche mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit unterschieden werden können. Diese Eintrittswahrscheinlichkeiten simulieren Unsicherheitsaspekte einer Entscheidung, welche von Umweltfaktoren oder fehlender Datenlage abhängen können.

Ein Unternehmer möchte zu einem Kunden reisen und hat die Option zwischen einem Zug, welcher ihn rechtzeitig zum Kundentermin bringen wird, und der Fahrt mit einem Auto über die Autobahn, mit der Konsequenz einer Verspätung von 30 Minuten. Der Zug fährt jede Stunde und der Unternehmer verpasst den nächsten Zug, wenn kein guter Parkplatz am Bahnhof verfügbar ist, was folglich einer Verspätung von 60 Minuten entsprechen würde.

Mit der Eintrittswahrscheinlichkeit, dass kein guter Parkplatz gefunden werden kann, kann nun eine Ergebnismatrix aufgestellt werden.

Alternative	Zustand A			Zustand B		
	Guter (Eintrittswahrscheinlichkeit 60%)	Parkplatz frei		Kein (Eintrittswahrscheinlichkeit 40%)	guter Parkplatz	frei
Zum Bahnhof fahren	0 Minuten			60 Minuten		
Über Autobahn fahren	30 Minuten			30 Minuten		

Tabelle 1: Beispiel einer Ergebnismatrix nach (Nitzsch 2017) (Eigene Darstellung)

Das Ziel der Entscheidung ist eine möglichst kurze Verspätung des Kundentermins. Mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten kann die durchschnittliche Verspätung \bar{x} der Alternative „Zum Bahnhof fahren“ auf 24 Minuten berechnet werden. Diese setzt sich aus der Summe der Produkte der Eintrittswahrscheinlichkeiten w_A und w_B mit den Verspätungen x_A und x_B zusammen (1).

$$\bar{x} = w_A * x_A + w_B * x_B \quad (1)$$

Sind Alternativen und Ziele nur qualitativ beschreibbar, müssen Sie für eine systematische Entscheidung in ein quantitatives Zahlenspektrum übertragen werden. Die Möglichkeit dies über die Fuzzylogik zu beschreiben, wird in Kapitel 2.2.3 erläutert.

2.2 Entscheidungsansätze zur Auswahl von Fügetechnologien

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich verschiedene Entscheidungsansätze für die Auswahl einer Fügetechnologie. Aufgrund der Komplexität eines solchen Entscheidungsprozesses fokussieren sich bisherige Modelle auf bestimmte Teilaspekte des Auswahlverfahrens. Während einige Modelle einen besonderen Fokus auf eine rein ökonomische oder rein technologische Sicht legen (Prüß, Stechert und Vietor, Methodik zur Auswahl von Fügetechnologien in Multimaterialsystemen 2010), versuchen andere Modelle die ökonomischen, ökologischen und technologischen Rahmenbedingungen in einem holistischen Ansatz zu berücksichtigen. Die Berücksichtigung von Unsicherheiten in einem frühen Projektstadium und der Umgang mit Unschärfe in Form von linguistischen Kriterien sind weitere Aspekte, die in verschiedenen Ansätzen berücksichtigt werden. Im Zentrum der nachfolgenden Unterkapitel stehen Modelle mit einem besonderen Fokus auf einen jeweiligen Teilaspekt.

2.2.1 Multidimensionale Entscheidungsansätze

Die Auswahl einer Fügetechnologie kann unter ökonomischen, ökologischen und technologischen Rahmenbedingungen getroffen werden. Verschiedene Ansätze kombinieren diese Faktoren zu einem multidimensionalen Entscheidungsansatz.

Eine von (Saphir A. Choudry 2019) vorgestellte Methodik vergleicht die Möglichkeiten des Einsatzes der verschiedenen Fügetechnologien in Bezug auf die Materialdicke der zufügenden Komponenten (material thickness combinations). Die Informationen werden aus einer Datenbank entnommen. Die Datenbank erhält Informationen aus vergangenen Untersuchungen und kann mit jedem Projekt ergänzt werden. Die geeigneten Fügetechnologien werden anschließend ökonomisch miteinander verglichen. Die Methodik kombiniert somit einen ökonomischen mit einem technologischen Ansatz.

Ein holistischerer Ansatz von (Müller, et al. 2018) bezieht auch ökologische Faktoren mit in den Entscheidungsprozess. Die Bewertung einer Fügetechnologie setzt sich dabei aus einem Kosten-

modul, einem Technologiemodul und einem Nachhaltigkeitsmodul zusammen. Die Module werden durch Formeln definiert, welche den jeweiligen Aspekt quantitativ erfassbar beschreiben.

Für das Kostenmodul wird ein „life-cycle-costs“ (LCC) Ansatz gewählt, welcher die Kosten auf der gesamten Wertschöpfungskette modelliert. Eine anschließende Skalierung ermöglicht eine Vergleichbarkeit. Der Quotient aus dem Minimum aller berechneten LCC ($\min(LCC_j)$) und dem betrachteten LCC_j ergibt das Kostenmodul CI_j (2).

$$CI_j = \frac{\min(LCC_j)}{LCC_j} \quad (2)$$

Die jeweiligen Ansätze der technologischen und ökologischen Dimension können ebenfalls skaliert und anschließend für jede Fügetechnologie zusammengefasst werden. Aus dem Kostenmodul CI_j , dem Technologiemodul TVI_j und dem Nachhaltigkeitsmodul SII_j ergibt sich über den Satz des Pythagoras das Gesamtmodul PI_j (3).

$$PI_j = \sqrt{CI_j^2 + TVI_j^2 + SII_j^2} \quad (3)$$

Alternativ kann eine Zusammenfassung mit Präferenz-Koeffizienten erfolgen. Dadurch kann die Gewichtung einer besonders relevanten Dimension angepasst werden (4). Die Präferenzkoeffizienten p_c, p_{Tv}, p_{SI} sind somit abhängig von den Projektzielen.

$$PI_j = \sqrt{(CI_j * p_c)^2 + (TVI_j * p_{Tv})^2 + (SII_j * p_{SI})^2} \quad (4)$$

Der Ansatz stellt eine multidimensionale Entscheidungsfindung vor. Aspekte von einzelnen Dimensionen können allerdings nicht separat betrachtet werden.

2.2.2 Entscheidungsansätze unter Unsicherheiten

Verschiedene Ansätze berücksichtigen eine dynamische Unsicherheit über den Entscheidungsprozess. Aufgrund unklarer Anforderungen stehen in den ersten Phasen der Entwicklung und Konstruktion kaum Informationen zur Verfügung. Mit steigender Informationsdichte über den Projektzeitraum und der Kenntnis über die geforderten Produkteigenschaften ist der konstruktive Freiheitsgrad des Ingenieurs jedoch schon erheblich gesunken. Dies wird in der wissenschaftlichen Literatur auch das Dilemma der Konstruktion genannt (Ehrlenspiel 2003). (Siehe Abbildung 2)

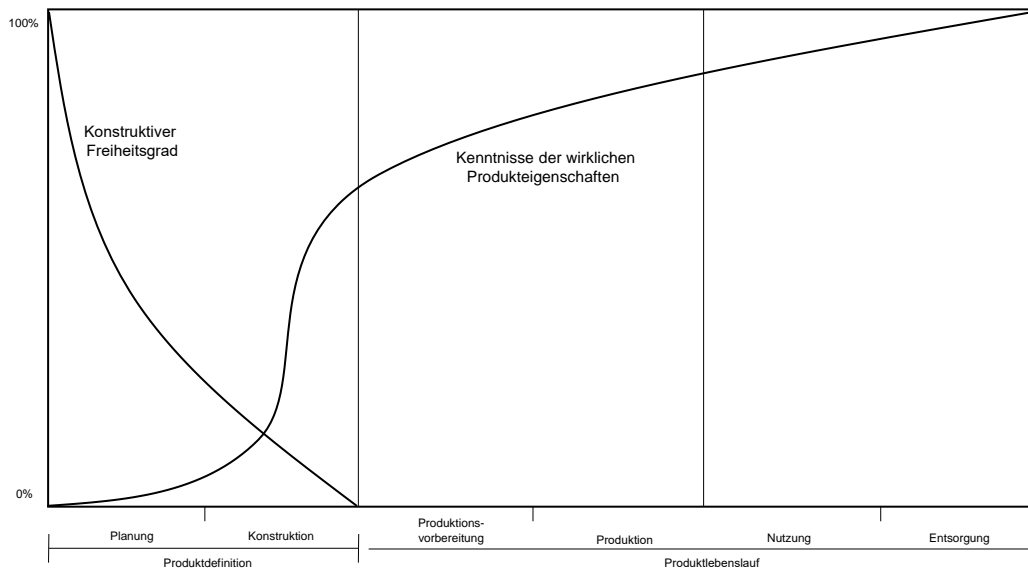


Abbildung 2: Dilemma der Konstruktion (Ehrlenspiel, K, Integrierte Produktentwicklung 2003)

In einer von Saphir Choudry vorgestellten Methodik erfolgt eine Unterteilung der Datenverfügbarkeit in drei verschiedene Kategorien. (Choudry, Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien 2019). Der Umgang mit den Daten ist dabei von der jeweiligen Kategorie abhängig. Die Unsicherheit ist dabei in der Kategorie „Statisch“ am höchsten und wird über die Kategorie „Semi-dynamisch“ zu „Dynamisch“ am kleinsten (Siehe Abbildung 3).

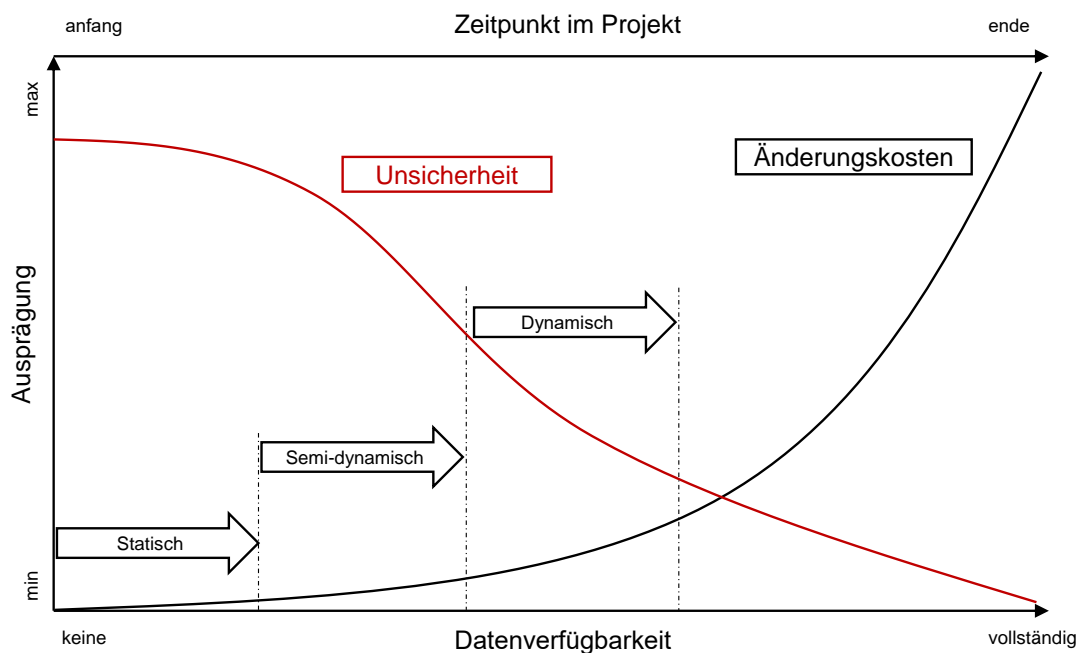


Abbildung 3: Bewertungsstufen während des Produktionsentstehungsprozesses (Choudry, Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien 2019)

Die Kategorie statisch ist charakteristisch für den Start eines Projektes. Daten vergangener Projekte werden zur technologischen, ökologischen und ökonomischen Einordnung verwendet und können erste Abschätzungen zu verschiedenen Fügetechnologien geben. Im zunehmenden Projektzeitraum eines Produktentstehungsprozesses können vorhandene Daten für Algorithmen verwendet werden um erste Abschätzungen vorzunehmen. Dabei werden einzelne Parameter in Intervallen abgeschätzt, womit auch die Ergebnisse der Algorithmen in Intervallen angegeben werden können.

Ein Algorithmus kann dabei beispielsweise eine Lebenszyklusanalyse (life cycle assessment, LCA) nach einer definierten Norm sein. Dies klassifiziert die Kategorie „Semi-dynamisch“. Sind zum Projekt hinreichend viele Daten vorhanden kann eine genaue Abschätzung mit festen Parametern in der Kategorie „dynamisch“ vorgenommen werden.

Die verschiedenen Kategorien sind unabhängig voneinander. Sind Informationen über Kosten erst später als technologische Rahmenbedingungen bekannt, kann ein Kostenansatz statisch erfolgen, während technologische Aspekte dynamisch modelliert werden. Für den Vergleich unter den Füge-technologien bleibt unberücksichtigt, wie statische Kostenansätze mit dynamischen Kostenansätzen anderer Füge-technologien verglichen werden können.

2.2.3 Entscheidungsansätze mit qualitativen und quantitativen Anforderungen

Füge-technologien können nicht immer quantitativ beschrieben werden. Einige Aspekte lassen sich lediglich qualitativ einordnen. Eine Möglichkeit qualitative Daten quantitativ mit ihrer Unschärfe abzubilden ist die Fuzzylogik.

Dabei werden Wörter einer Eigenschaft einem unscharfen Spektrum zugeordnet (Aksoy und Öztürk 2015). Ein definiertes linguistisches Datenset bildet eine Eigenschaft in Ihrer Ausprägung skaliert ab. Mit der Skalierung können subjektive Empfindungen quantitativ beschrieben werden. Die Wärme einer Heizung kann dabei beispielsweise mit „kalt“ auf 0-0.3 und „eher warm“ auf 0.5-0.8 skaliert werden. Die Skalierung entspricht einer mathematischen Interpretation des Begriffes und versucht mit einem Intervall dessen Unschärfe zu berücksichtigen. Neue Begriffe zur Beschreibung der Wärme der Heizung, müssen dabei zuerst mit zugehöriger Skalierung definiert werden. Im gegebenen Beispiel würde 1 die größtmögliche Wärme der Heizung bedeuten. Die Skalierung kann ebenfalls ohne ein Intervall durchgeführt werden. Dabei wird dem jeweiligen Begriff ein fester skaliertes Faktor zugeordnet.

In einem von (Prüß, Stechert und Vietor, Methodik zur Auswahl von Füge-technologien in Multimaterialsystemen 2010) vorgestellten Ansatz werden Bewertungskriterien einer Füge-technologie quantitativ erfasst. Die Bewertung der Faktoren erfolgt in drei Bewertungsstufen. Die Festigkeit gegen Zugbeanspruchung kann als qualitatives Kriterium somit niedrig, gewöhnlich oder hoch sein. Diese Bewertungsstufen werden anschließend quantitativ als aufsteigende Zahlen angegeben. Die Summe der Bewertungen aller Faktoren bewertet die Füge-technologie und ermöglicht eine Vergleichbarkeit. Der Ansatz berücksichtigt nicht die Zusammenführung von qualitativen und quantitativen Faktoren.

2.3 Modellbasierte Systementwicklung

Die Modellbasierte Systementwicklung ist ein Ansatz des Systems Engineering. Informationen des technischen Systems werden dabei von Modellen bereitgestellt. Dies ersetzt den ursprünglichen dokumentenbasierten Ansatz. Das technische System kann dabei sowohl ein Produkt, als auch ein Prozess oder eine Technologie sein.

Durch die Modelle können Aufbau, Anforderungen und Verhalten der jeweiligen Systeme beschrieben werden. Die Verbindung der Modelle ermöglicht eine Systemanalyse auf Basis der jeweiligen Anforderungen, sowie eine unmissverständliche Kommunikation der verschiedenen Stakeholder (OMG Systems Modeling Language 2017).

Im Fokus des Kapitels steht der Aufbau der Modellierungssprache SysML. Nachfolgend wird ein Überblick in den Stand der Technik von Entscheidungen auf Basis von Modellen in SysML gegeben.

2.3.1 Systems Modeling Language

Die Systems Modeling Language ist eine grafische, auf UML 2 basierende, standardisierte Modellierungssprache. Während die Unified Modeling Language der Systemmodellierung von Softwaresystemen dient, ist die Systems Modelling Language auch für softwareübergreifende Projekte geeignet. Dabei können große technische Systeme, in denen Software- und Hardwarekomponenten zusammenwirken, modelliert werden. Durch die Verknüpfung von mechanischen, elektrischen und informationstechnischen Komponenten eines Systems können Beziehungen modelliert werden und die Systeme effizient auf Anforderungen evaluiert werden. Kommerzielle Software wie Cameo Systems Modeler oder Papyrus ermöglichen den Aufbau und die Ausführung von Modellen in SysML, sowie eine Integration von Simulationen oder mathematischen Modellen in anderen ausgewählten Softwaresystemen wie beispielsweise MATLAB.

Die verschiedenen Diagramme lassen sich in Strukturdiagramme, Anforderungsdiagramme und Verhaltensdiagramme unterscheiden. Im Folgenden werden die für den Arbeit benötigten Strukturdiagramme beschrieben und ein kurzer Einblick in Verhaltensdiagramme gegeben. Eine Visualisierung der Taxonomie der Systems Modeling Language ist in Abbildung 4 gegeben.

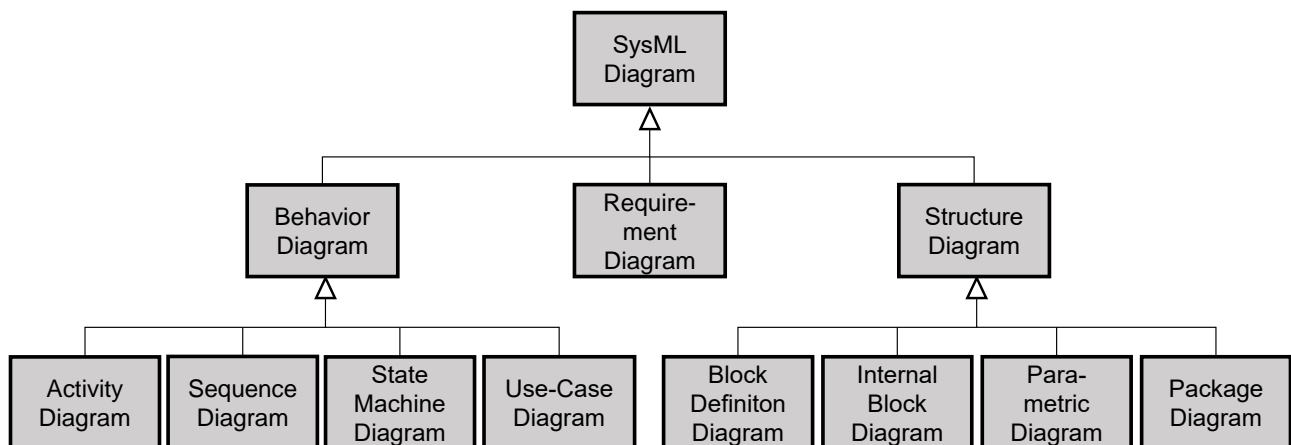


Abbildung 4: SysML Taxonomie (Eigene Darstellung)

Das „Block Definition Diagram“ (bdd) ist ein statisches Strukturdiagramm, das die Komponenten eines Systems, deren Beziehungen und Inhalte modelliert. Dabei kann ein Block eine technische Komponente darstellen und durch Beziehungen mehrere andere technische Komponenten besitzen. Ein Getriebe besitzt unter anderem eine Lagerung, eine Welle-Nabe-Verbindung und eine Übersetzungsstufe, welche sich aus zwei Zahnrädern ergibt. Die einzelnen Komponenten können mechanisch, elektrisch oder informationstechnische Bestandteile aufweisen. (siehe Abbildung 5)

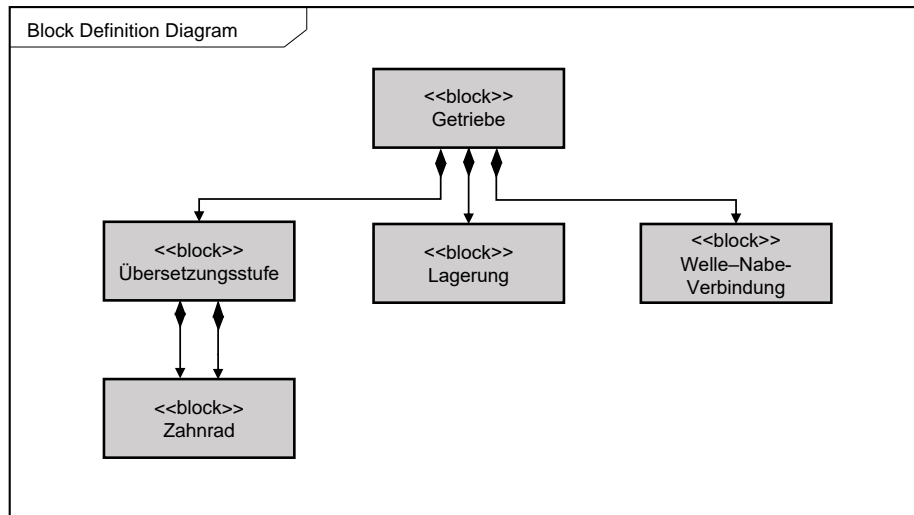


Abbildung 5: Block Definition Diagram (Eigene Darstellung)

Interne Beziehungen zwischen zwei Blöcken können mit dem „Internal Block Diagram“ (ibd) modelliert werden. Ein Block kann Verknüpfungen mit einer seiner Komponenten besitzen. Ein Block kann ebenfalls zwei Komponenten besitzen, welche interne Beziehungen untereinander haben. Im ibd können auch Berechnungen zwischen den Komponenten durchgeführt werden. Das Übersetzungsverhältnis einer Übersetzungsstufe ergibt sich aus dem Quotienten der Zähne der Zahnräder, welche die Übersetzungsstufe im Beispiel besitzt. (siehe Abbildung 6)

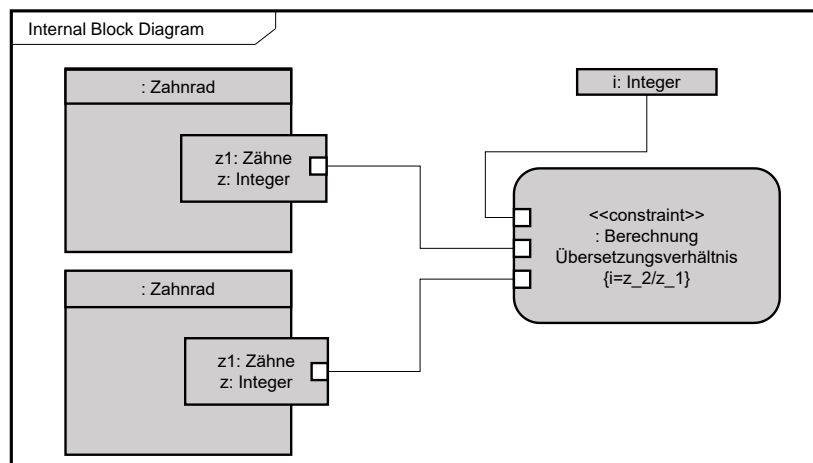


Abbildung 6: Internal Block Diagram (Eigene Darstellung)

Interne Berechnungen eines Blockes werden mit einem „Parametric Diagram“ (par) modelliert. Werden Parametric Diagrams in kommerzieller SysML Software wie Cameo Systems Modeler aufgebaut, können die modellierten Berechnungen mit dem Cameo Simulation Toolkit durchgeführt werden. Diese werden automatisch ausgeführt, sobald alle benötigten Parameter vorhanden sind. Ein Kopfkreisdurchmesser eines Zahnrades ergibt sich dabei beispielsweise durch zahnradspezifische Größen, welche im Block deklariert werden (siehe Abbildung 7). Werden diese Größen initialisiert, wird die Berechnung durchgeführt.

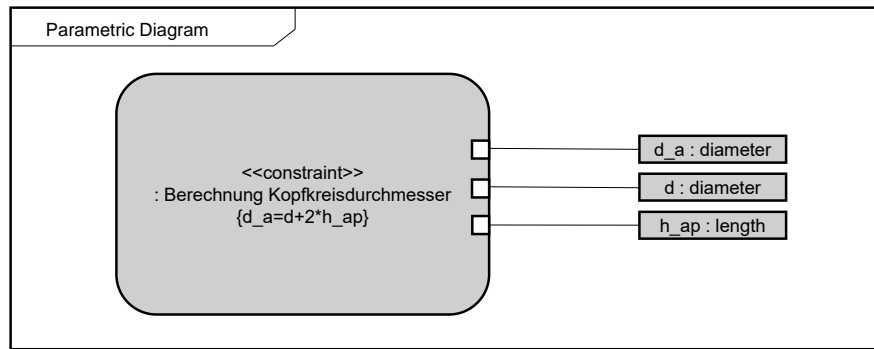


Abbildung 7: Parametric Diagram (Eigene Darstellung)

Berechnungen können auch durch Verhaltensdiagramme gesteuert werden. Diese beschreiben das Verhalten eines Blockes und seiner Verknüpfungen. Im „State Machine Diagram“ können verschiedene Zustände definiert werden, welche Aktivitäten aufrufen. Diese Aktivitäten werden in „Aktivitätsdiagrammen“ modelliert und beschreiben das Verhalten des Blockes unter dem gegebenen Zustand. Schaltet ein Getriebe von Leerlauf zu einer Volllast, wird durch das einsetzen eines neuen Ganges ein neues Übersetzungsverhältnis berechnet und deklariert. (siehe Abbildung 8)

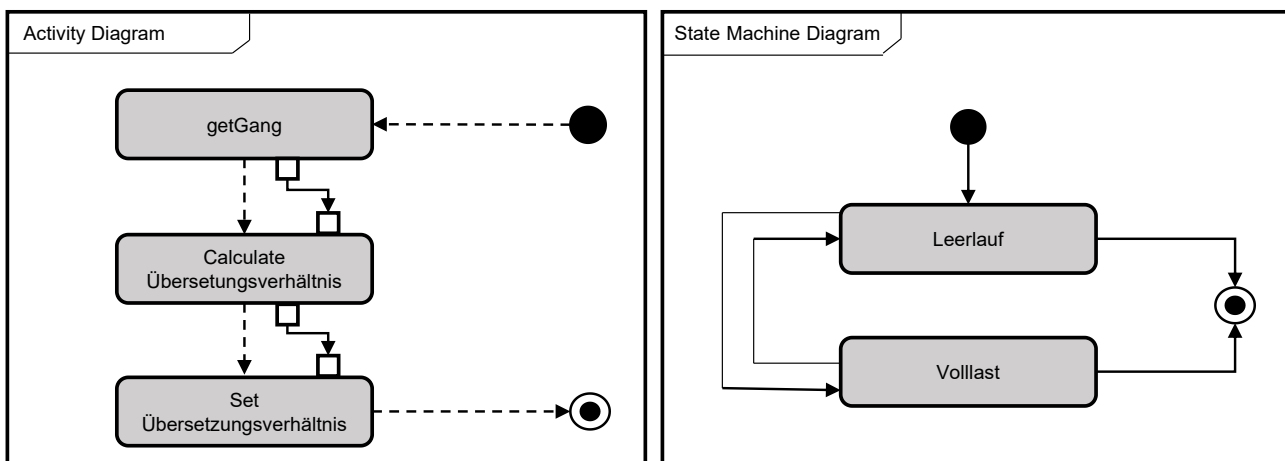


Abbildung 8: Activity Diagram (Links) und State Maschine Diagram (Rechts) (Eigene Darstellung)

Die vorgestellten Diagramme sind Basis für die spätere Modellierung der Fügetechnologien. Das Fügen von zwei Wirkflächen ist ein Prozess und kein Produkt, wie das im Beispiel verwendete Getriebe. Ein Fügeprozess, wie beispielsweise das Laserstrahlschweißen, kann äquivalent zum vorgestellten Beispiel mit SysML modelliert werden. Modelle und deren Interaktionen untereinander können sich auf einzelne Teilaspekte des Fügeprozesses fokussieren. Die physikalischen oder ökonomischen Zusammenhänge eines Teilaspektes können wie etwa im Beispiel äquivalent in einem ibd modelliert werden.

2.3.2 Entscheidungsansätze in SysML

Modellbasierte Systementwicklung mit SysML hat sich als praktikable Methode zur grafischen Verfolgung von Anforderungen für Entwurfs-elemente von Systemen herausgestellt (Russell 2012). Durch die Integration der Anforderungen in die Modelle, können abgeleitete Anforderungen, welche sich aus der Verknüpfung verschiedener Modellelemente (siehe Kapitel 2.3.1) ergeben, erkannt werden.

Neben der direkten Rückverfolgung von Anforderungen auf bestimmte Systemelemente, ist innerhalb der Modellbasierten Systementwicklung auch die optimale Auslegung der Anforderungen des Systems entscheidend, sodass Anforderungslücken schnell bemerkt werden. (Russell 2012)

Beide Ansätze beziehen sich nicht auf die Möglichkeit aktiv Entscheidungen durch ein Modell in SysML abzuleiten, sondern auf die Bereitstellung von Informationen durch Modellbasierte Systementwicklung. Eine Möglichkeit Entscheidungsprozesse in SysML zu implementieren, ist die von (Gebreegziabher, et al. 2017) vorgestellte Methodik. Eine Gliederung des Prozesses in „Data level“, „Design level“, „Analysis level“ und „Decision level“ beschreibt den Entscheidungsprozess stufenweise.

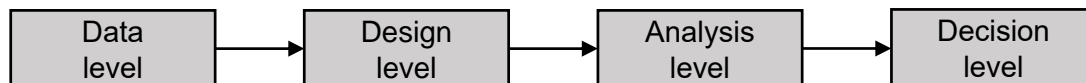


Abbildung 9: Model based decision-making framework nach (Russell 2012) (Eigene Darstellung)

Die Methodik berücksichtigt die Kundenbedürfnisse in der Datenebene (Data level), in der die Kundenanforderungen in Systemanforderungen umgewandelt werden und daraus eine technische Beschreibung abgeleitet werden kann. Sobald diese Beschreibung vorliegt wird das strukturelle System erstellt (Design level). Anschließend wird das Verhalten des Systems im „Analysis level“ mit Verhaltensdiagrammen (vgl. Abbildung 8) modelliert. Hierbei werden verschiedene Alternativen implementiert, welche jeweils möglichst gut die geforderten Anforderungen erfüllen sollten. Im Decision Level kann nun eine Auswahl eines Systemverhaltens getroffen werden. Der dafür zuständige Algorithmus kann mit einem Aktivitätsdiagramm oder extern implementiert werden.

Die bisherigen Entscheidungsansätze in SysML beziehen sich nicht auf den Vergleich verschiedener Modelle. Ein solcher Ansatz wurde (Modercai und Dori 2014) vorgestellt. Die nach Anforderungen aufgebauten Modelle werden hierbei iterativ nach verschiedenen Kriterien verglichen. Dieser Ansatz ist jedoch nicht mit der System Modeling Language, sondern der Object Process Methodology (OPM) vorgestellt worden. Diese Modellierungssprache verwendet nur eine Diagrammform und erschwert somit die Integration verschiedener Modelle (Grobshtein, et al. 2011).

3 Problemstellung und Zielsetzung

Die vorgestellten Methodiken eine Entscheidung zur Fügetechnologieauswahl zu treffen haben Defizite. Die Systematik der Entscheidung ist oft nicht holistisch und berücksichtigt nicht alle auftretenden Aspekte des Entscheidungsprozesses. Es ist notwendig die Fügetechnologien multikriteriell in unsicherer Datenlage in verschiedenen qualitativen und quantitativen Aspekten miteinander zu vergleichen. Holistischere Ansätze (Choudry, Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien 2019) sind durch festgelegte Entscheidungsalgorithmen nicht modular aufgebaut und können somit nicht auf die spezifische Problemstellung der Stakeholder angepasst werden. Des Weiteren sind Entscheidungsansätze oft nicht implementiert in verbreiteten Softwaresystemen wie MATLAB oder häufig verwendeten Skriptsprachen verfügbar, womit eine Anwendungsnähe für den Benutzer erschwert wird. Eine Möglichkeit der Integration von Modellierungen in SysML ist nicht erforscht, wodurch eine Verknüpfung bestehender SysML-Modelle für Fügetechnologien mit einem Entscheidungsansatz zur Auswahl einer Fügetechnologie nicht möglich ist.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung eines implementierten Entscheidungsansatzes für die Auswahl einer Fügetechnologie. Innerhalb des Entscheidungsansatzes sollen qualitative und quantitative Kriterien der Fügetechnologien unter verschiedenen Unsicherheiten mit einem gegebenen Anforderungsprofil verglichen werden können. Informationen über die Fügetechnologien sollen dabei neben Literaturwerten auch die Erfahrung der Stakeholder des Projektes berücksichtigen. Dabei soll eine Datenbank vom Benutzer erweiterbar sein und die Möglichkeit bestehen, quantitative Aspekte dynamisch in Modellen mit SysML zu beschreiben. Modelle, welche die quantitativen Aspekte einer Fügetechnologie beschreiben, sollen jeweils für jede Fügetechnologie als Solution-Element zusammengefasst werden. Ein Solution-Element beschreibt die Fügetechnologien dabei in einer definierten Form mit Modellen und dazugehörigen Workflows, die die Modelle ausführen können. Die Solution-Elements sollen die Funktion „Kraft leiten“ erfüllen und in einer Solution-Element Library aufgebaut werden. Die Solution-Elements sollen den projektspezifischen Use-Case der Fragestellung des Benutzers berücksichtigen können, sodass sich quantitative Kriterien angepasst auf die Problemstellung des Projektes beziehen. Die Abgrenzung zum Stand der Technik und bisheriger Ansätze soll durch den Fokus auf den modularen und erweiterbaren Aufbau des Entscheidungsansatzes mit Möglichkeit der Integration von standardisierten Modellen in SysML deutlich werden.

Der Aufbau des Entscheidungsansatzes wird in zwei Hauptkapiteln erfolgen. Der Entscheidungsansatz gliedert sich in die Module Entscheidungsmodell und Solution-Element Library.

Zunächst wird in Kapitel 4 das Entscheidungsmodell vorgestellt. Das Entscheidungsmodell ist ein Zusammenschluss von einer Datenbank und mehreren Python-Skripten. Der Code in Python vergleicht dabei Informationen über die Fügetechnologien in der Datenbank mit einem in Python übergebenen Anforderungsprofil. Ein Fokus wird dabei auf die Berücksichtigung und Integration von dem Vergleich qualitativer und quantitativer Kriterien gelegt. Des Weiteren soll die Möglichkeit der Erweiterbarkeit des Skriptes aufgrund einer modularen Architektur ersichtlich werden. Das Entscheidungsmodell ist eine eigenständige Teillösung der Problemstellung und stellt ein Zwischenziel der Arbeit dar.

In Kapitel 5 wird die Teillösung erweitert mit der Zielsetzung quantitative Aspekte der Fügetechnologien abhängig von einem gegebenen Use-Case zu beschreiben und eine Unsicherheit innerhalb des Projektes zu berücksichtigen. Der Use-Case wird dabei als Erweiterung des schon vorgestellten Anforderungsprofils beschrieben und hat die Hauptanforderung „Kraft leiten“. Die

Hauptanforderung mit spezifischen Nebenforderungen des Use-Cases werden von Solution-Elements innerhalb einer Solution-Element-Library erfüllt. Die Solution-Element Library stellt folglich verschiedene Solution-Elements, welche die Anforderung „Kraft leiten“ erfüllen und somit Fügetechnologien darstellen, zur Verfügung. Dabei soll auf den Aufbau der Library, den Aufbau eines Solution-Elements und deren Modelle für verschiedene ausgewählte quantitative Aspekte eingegangen werden. Ein Fokus der Teilzielsetzung dieses Kapitels ist der Umgang mit Unsicherheiten innerhalb der Modelle. Ein Ausschnitt des Aufbaus der Solution-Element Library ist in Abbildung 10 gegeben.

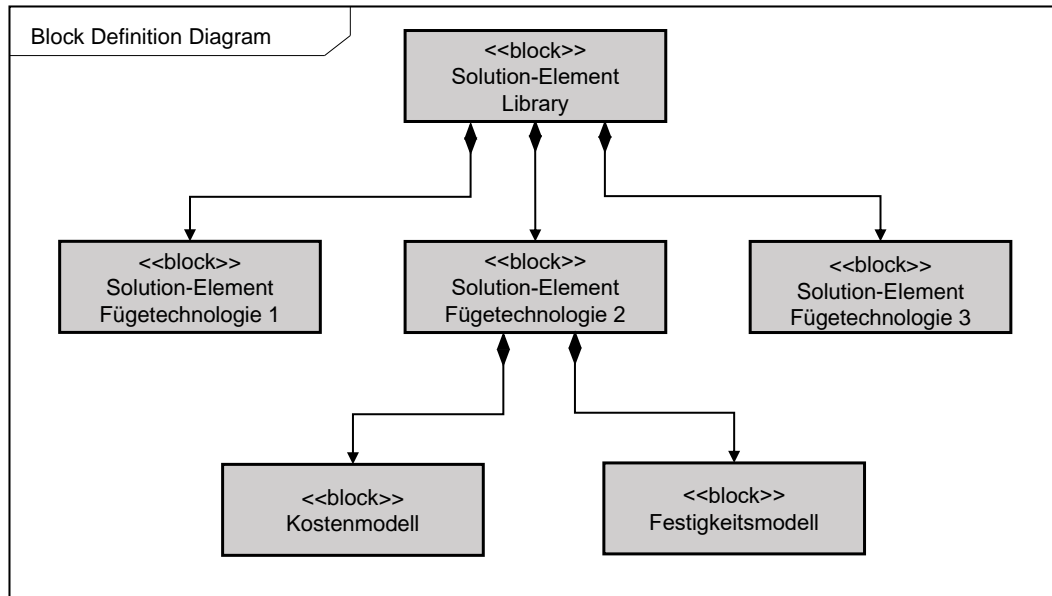


Abbildung 10: Aufbau der Solution-Element Library (Eigene Darstellung)

Die Solution-Element Library soll abschließend mit dem Entscheidungsmodell verbunden werden um den Entscheidungsansatz vollständig zu beschreiben. Dabei soll auf die modulare Zusammensetzung der Solution-Element Library und des Entscheidungsmodells nochmals näher eingegangen werden um die Möglichkeit der Erweiterung der vorgestellten Entscheidungsmethodik zu verdeutlichen. Abbildung 11 veranschaulicht die Erarbeitung des Entscheidungsansatzes als Zielsetzung der Arbeit in einem Ablaufdiagramm.

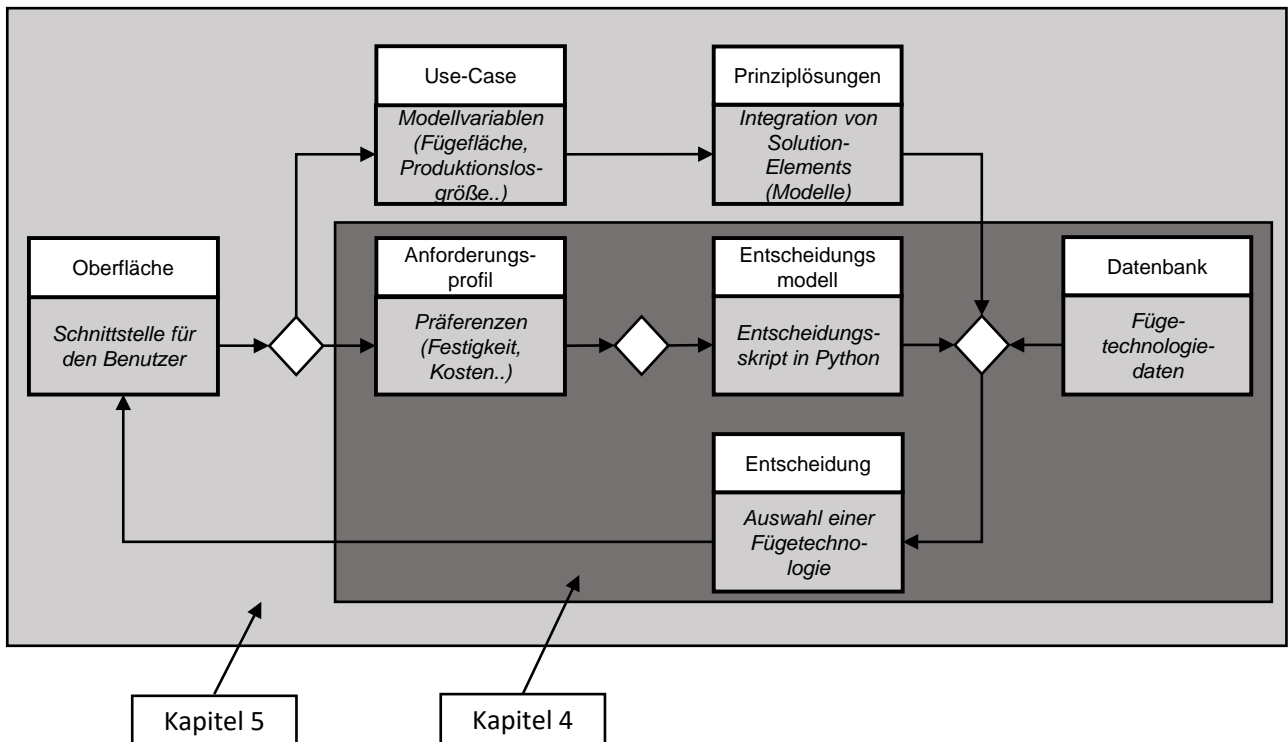


Abbildung 11: Ablaufdiagramm zur Erarbeitung des Entscheidungsansatzes (Eigene Darstellung)

Abschließend soll die Methodik in Kapitel 6 durch zwei Use-Cases validiert werden. Die Validierung soll des Weiteren eine kritische Hinterfragung und einen Ausblick auf weitere Forschung ermöglichen.

4 Entscheidungsmodell

In diesem Kapitel wird das Entscheidungsmodell zunächst in seinem Aufbau beschrieben. Dabei liegt ein Fokus zunächst auf dem Aufbau der Datenbank und der Integration verschiedener Kategorien von Kriterien. Die Datenbank soll die Basis der Informationen über die Fügetechnologien darstellen. Anschließend wird der Aufbau eines Skriptes in Python als Hauptbestandteil, der für die Entscheidung notwendigen Algorithmik, beschrieben und implementiert. Dabei soll die Modularität der Softwarearchitektur verdeutlichen wie der Entscheidungsalgorithmus angepasst werden kann.

In Kapitel 4.2 wird ein Entscheidungsalgorithmus vorgestellt und implementiert. Dieser berücksichtigt die Integration quantitativer und qualitativer Kriterien in der Datenbank und gibt dem Benutzer einen Vorschlag zur Auswahl einer Fügetechnologie auf Basis des übergebenen Anforderungsprofils und der zur Verfügung stehenden Datenbank mit Fügetechnologiespezifikationen.

4.1 Aufbau des Entscheidungsmodells

Das Entscheidungsmodell wird in Python implementiert. Die Klassifikation der verschiedenen Fügetechnologien ist dabei schematisch in einer Datenbank strukturiert. Das Skript liest diese Datenbank aus und erhält so die Informationen über die zur Verfügung stehenden Fügetechnologien. Das Anforderungsprofil, welches sich aus dem Projekt ergibt, ist der Input des Skripts. Dieses kann dem Skript über Windows Command (CMD) übergeben werden und wird zum Abschluss der Arbeit in Kapitel 5.3 in ein Graphical User Interface (GUI) integriert. Eine Fügetechnologieauswahlentscheidung wird anschließend in der Konsole ausgegeben. Die Interaktion zwischen dem Benutzer, Python und der Datenbank ist in Abbildung 12 einem UML-Sequenzdiagramm visualisiert.

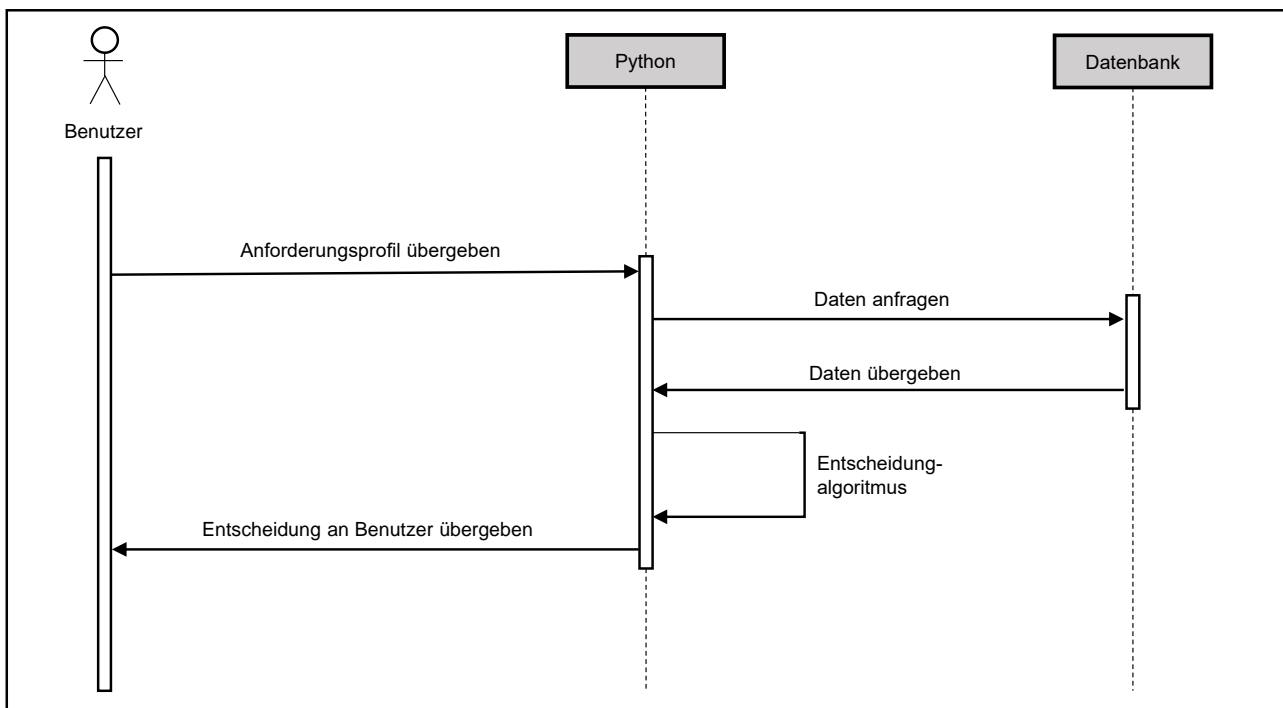


Abbildung 12: Interaktion zwischen dem Benutzer, Python und der Datenbank nach UML Notation (Sequenzdiagramm)
(Eigene Darstellung)

4.1.1 Aufbau der Datenbank

Die Daten werden in einem JavaScript Object Notation (JSON) Datenformat gelagert. JSON ist von der Programmiersprache unabhängig und Parser, sowie Generatoren stehen in allen verbreiteten Sprachen zur Verfügung. Im Unterschied zu einem relationalen Datenbanksystem werden zum Auslesen keine Zugriffsrechte benötigt. Die JSON Datei ist unterteilt in verschiedene Objekte. Ein Objekt ist im Kontext von JSON eine Liste von Eigenschaften, die jeweils Zahlen, Zeichenketten oder andere Datenformate sein können.

In der Datenbankstruktur entspricht ein Objekt dem Datensatz für eine Fügetechnologie. Dieser ist unterteilt in drei verschiedene Kategorien. Ausschlusskriterien der Fügetechnologien werden mit einem Booleschem Wert klassifiziert. Eine Fügetechnologie ist beispielsweise nicht für eine Kunststoff-Metall Verbindung geeignet. Ist diese im Projekt erwünscht, kann die Fügetechnologie ausgeschlossen werden und muss nicht weiter verglichen werden. Qualitative Faktoren hinterlegen nicht quantifizierbare Eigenschaften einer Fügetechnologie linguistisch. Die Auswahl der Wörter ist dabei innerhalb des Entscheidungsmodell vorgegeben, worauf in Kapitel 4.2.2 näher eingegangen wird. Des Weiteren wird auf die Erweiterbarkeit dieser Auswahl eingegangen. Die Wärmebeständigkeit einer Fügetechnologie kann etwa als hoch oder niedrig angenommen werden. Ist ein Faktor quantifizierbar kann dieser als konkreter Wert angegeben werden. Für die Abschätzung einer Unsicherheit kann der Wert mit einer Standardabweichung angegeben werden. Hierbei wird eine Gauß-Verteilung angenommen, worauf in Kapitel 4.2.3 näher eingegangen wird. In Tabelle 2 ist der beispielhafte Aufbau eines Datensatzes einer Fügetechnologie dargestellt.

Kategorie	Kriterium	Information
Boolescher Wert	Kunststoff-Metall Verbindung	Ja
Boolescher Wert	Nachbearbeitung nötig	Nein
Qualitativer Faktor	Wärmebeständigkeit	Hoch
Qualitativer Faktor	Dynamische Belastbarkeit	Normal
Quantitativer Faktor	Maximale Spannung	[12, 0] MPa
Quantitativer Faktor	Stückkosten	[3, 1.1] MPa

Tabelle 2: Beispielhafter Datensatzausschnitt einer Fügetechnologie (Eigene Darstellung)

Die Datenbank kann um weitere Kriterien der drei Kategorien, sowie um weitere Fügetechnologien ergänzt werden. Dies erfolgt durch eine Eintragung der jeweiligen Daten in den JSON-Dateien. Jede Fügetechnologie muss dabei alle definierten Kriterien hinterlegt haben, um eine Vergleichbarkeit im Entscheidungsmodell zu ermöglichen. Ein Kriterium ist definiert, sobald es für eine Fügetechnologie mit (Kategorie, Kriterium, Information) (Siehe Tabelle 2) in JSON hinterlegt wird. Fehlende Daten einer Fügetechnologie führen zu einem Warnhinweis und zu einem Ausschluss der Fügetechnologie im anschließenden Vergleich. Die Datenbank wird innerhalb der Implementierung der Entscheidungsmethodik mit den Fügetechnologien Kleben (Epoxidharz), Schweißen, Löten, Nieten, Schrauben und Tailored-Joints aufgebaut. Die hinterlegten Daten basieren dabei auf einer Literaturrecherche.

4.1.2 Aufbau des Skripts in Python

Der Aufbau des Skripts gliedert sich in die drei Module Main.py, Functions.py und Classes.py. In Main.py werden die Daten der Fügetechnologien aus der Datenbank gelesen und das übergebene Anforderungsprofil vom Benutzer entnommen. Das Modul Classes.py enthält die Struktur der Klasse einer Fügetechnologie. Für jede aus der Datenbank ausgelesene Fügetechnologie wird ein Objekt

dieser Klasse instanziiert. Die Klasse stellt verschiedene Methoden bereit, diese Objekte zu verändern. Dabei erfolgt die Veränderung nach einem modular zusammengesetzten Schema. In Main.py werden Funktionen des Moduls Functions.py aufgerufen, die alle Objekte der Fügetechnologien durchiterieren und nach der jeweiligen Funktion Methoden aufrufen, die die Objekte verändern. Die veränderten Objekte werden dann an Main.py zurückgegeben und dort in einem Dictionary festgehalten.

Sollen beispielsweise Fügetechnologien nach Ausschlusskriterien aussortiert werden, wird von Main.py die dafür vorgesehene Funktion in Functions.py aufgerufen, die die Liste mit den Objekten der Fügetechnologien durchiteriert und prüft die einzelnen Fügetechnologien die Ausschlusskriterien erfüllen. Erfüllt eine Fügetechnologie ein Kriterium nicht, wird eine interne Methode, des Objektes der betroffenen Fügetechnologie aufgerufen, welche das Objekt löscht. Eine Information wird zurückgegeben und das Dictionary mit den möglichen Fügetechnologien aktualisiert. Das Entscheidungskript ist als eine Abfolge der zur Verfügung stehenden Funktionen zu verstehen. (Siehe Abbildung 13)

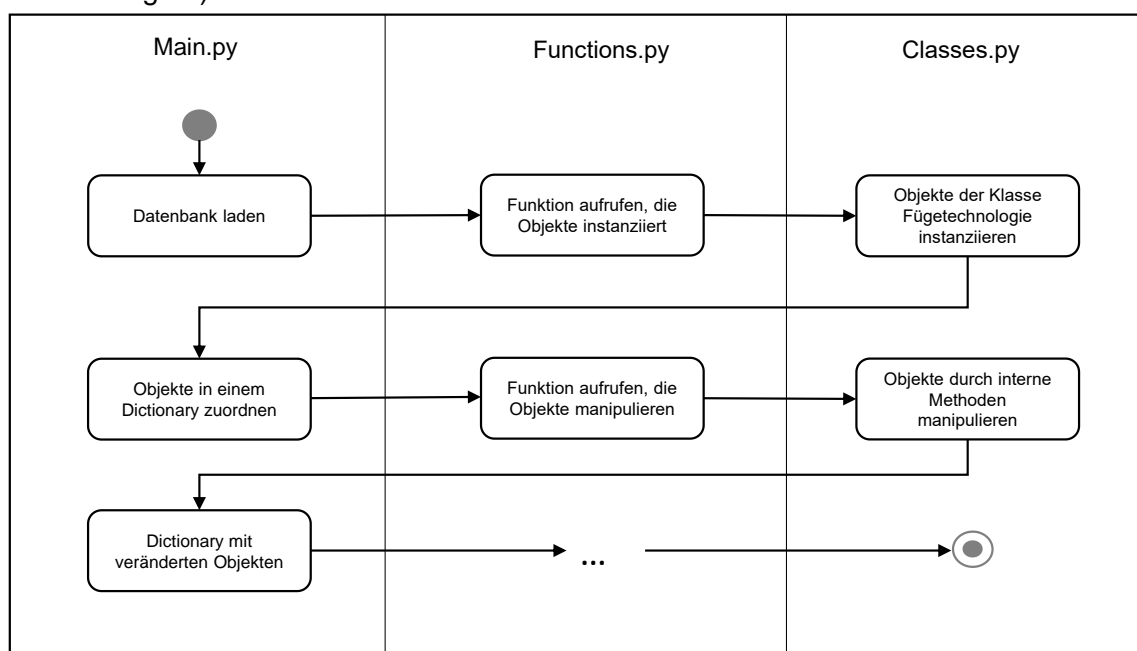


Abbildung 13: Interaktion zwischen verschiedenen Modulen des Entscheidungskripts nach UML-Notation (Aktivitätsdiagramm) (Eigene Darstellung)

Die objektorientierte Softwarearchitektur ermöglicht eine schnelle Anpassung und Modifikation der Fügetechnologieentscheidung. Funktionen und Methoden, welche bestimmte Vergleiche zwischen dem Anforderungsprofil und der Fügetechnologie realisieren, können implementiert werden ohne dass sie zwangsläufig benutzt werden müssen. Somit kann die Architektur einfach erweitert werden. Unterschiedliche Möglichkeiten die Fügetechnologieauswahl zu treffen, können durch weitere Funktionen und Methoden realisiert werden, ohne das bestehende Skript in seiner Struktur verändern zu müssen.

4.2 Entscheidungsalgorithmus für eine Fügetechnologieauswahl

Die implementierte Lösung der Fügetechnologieentscheidung folgt einem festgelegten Schema, Zunächst werden Fügetechnologien aussortiert, welche feste Rahmenbedingungen des Anforderungsprofils nicht erfüllen können. Anschließend werden zunächst qualitative Faktoren und dann quantitative Faktoren der Fügetechnologien mit dem Anforderungsprofil verglichen. Jede

Fügetechnologie wird nach den Vergleichen bewertet. Der Abschließende Vergleich der Bewertung der Fügetechnologien ermöglicht eine Auswahlentscheidung, welche die Handlungsempfehlung für den Benutzer darstellt. Abbildung 14 gibt eine kompakte Übersicht des Ablaufs.

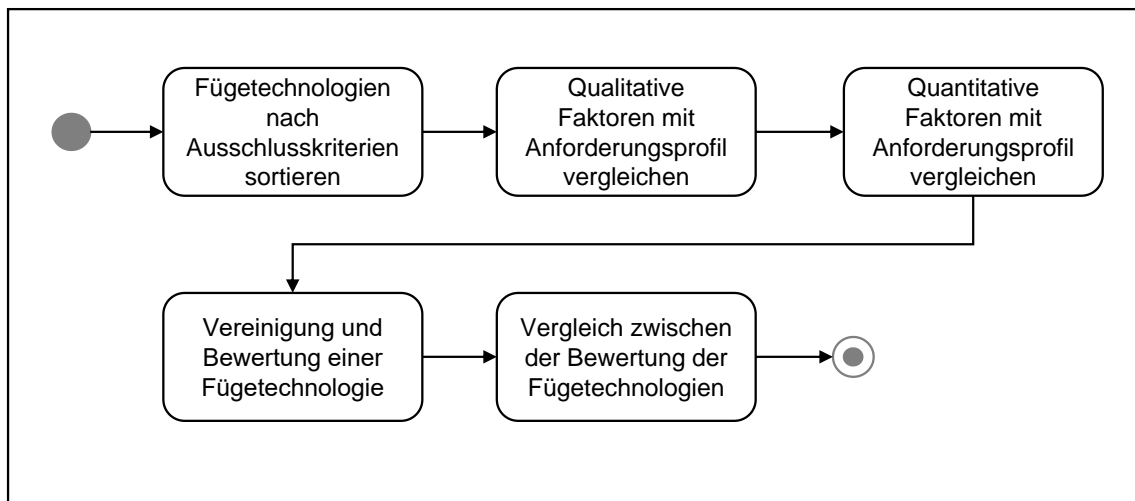


Abbildung 14: Prozedurale Aktivität des Entscheidungsskripts in der objektorientierten Softwarestruktur nach UML-Notation (Aktivitätsdiagramm) (Eigene Darstellung)

Die abschließende Auswahlentscheidung wird in den folgenden Kapiteln in zwei unterschiedlichen Modifikationen vorgestellt. Die unterschiedlichen Modifikationen beziehen sich auf den letzten Schritt des Algorithmus. Die Vorstellung dieser erfolgt ab Kapitel 4.2.4.

Unterschiedliche Modifikationen können dabei aufgrund der Architektur des Entscheidungsmodells in jeder Ebene der Entscheidung hinzugefügt werden. Beispielsweise kann eine weitere alternative Funktion für einen Vergleich von qualitativen Faktoren mit dem Anforderungsprofil hinzugefügt und in den Entscheidungsalgorithmus integriert werden. Die Auswahl zwischen der implementierten Methodik qualitative Faktoren zu bewerten (siehe Kapitel 4.2.2) und der hinzugefügten Lösung kann dann je nach Anwendungsfall erfolgen.

4.2.1 Einschränkung der Fügetechnologieauswahl durch Ausschlusskriterien

Ausschlusskriterien des Anforderungsprofils werden mit den Booleschen Werten der Fügetechnologien (Siehe Tabelle 2) verglichen um die Auswahl der Fügetechnologien sinnvoll einzuschränken. Ein Ausschlusskriterium kann dabei nach Definition eines Booleschen Wertes zwei Ausprägungen annehmen. Die Ausprägung eines Ausschlusskriteriums kann anschließend mit der jeweiligen Fügetechnologie verglichen werden. Ist eine Kunststoff-Metall-Verbindung gewünscht, werden Fügetechnologien, welche diese nicht realisieren können, aussortiert. Die Bedingungen müssen lediglich erfüllt werden, wenn sie auch projektbedingt erfordert sind. Dies bedeutet beispielsweise, dass wenn die Gewährleistung einer einseitigen Montierbarkeit der Fügezone keine Relevanz darstellt, Fügetechnologien die einseitige Montierbarkeit ermöglichen, nicht ausgeschlossen werden. Ist ein Ausschlusskriterium von einer Fügetechnologie nur bedingt erfüllt, kann je nach Voreinstellung des Entscheidungsmodells, ein Ausschluss oder nur ein Hinweis erfolgen. Die Beispiele sind in Tabelle 3 gezeigt. Die Fügetechnologie Schrauben wird folglich ausgeschlossen, da sie keine Kunststoff-Metall-Verbindung realisieren kann.

Kategorie	Anforderung	Tailored-Joints	Schrauben	Kleben (Epoxidharz)
-----------	-------------	-----------------	-----------	------------------------

Kunststoff-Metall-Verbindung	Ja	Ja	Nein	Ja
Einseitige Montierbarkeit	Nein	Ja	Ja	Ja
Punktförmige Verbindung	Ja	Bedingt	Ja	Ja

Tabelle 3: Beispielhafte Anforderungen von Ausschlusskriterien und Anforderungserfüllung von 3 verschiedenen Fügetechnologien (Eigene Darstellung)

Die Anforderungserfüllung der einzelnen Fügetechnologien können in der Datenbank verändert werden. Kann der Benutzer eine Kunststoff-Metall Verbindung durch Schrauben innerhalb eines Projektes realisieren, kann er die Datenbank anpassen, um die Fügetechnologie für einen weiteren Vergleich zu berücksichtigen. Der anschließende qualitative und quantitative Vergleich erfolgt dann lediglich mit den Fügetechnologien, welche nicht aufgrund der Ausschlusskriterien aussortiert werden.

4.2.2 Vergleich von qualitativen Faktoren

Verschiedene Aspekte der Fügetechnologien können lediglich qualitativ klassifiziert werden. Dies kann durch zwei verschiedene Gründe bedingt sein. Einerseits kann es möglich sein, dass über den jeweiligen Aspekt nicht hinreichend genügend Daten vorhanden sind. Die Temperaturbeständigkeit einer Fügetechnologie kann beispielsweise nur quantitativ angegeben werden, wenn ein physikalisches Modell oder ein experimenteller Versuch verfügbar sind. Des Weiteren ist es möglich, dass ein Aspekt nicht modelliert werden kann und ein quantitatives Modell somit nicht sinnvoll wäre. Ist die von dem Anwender wahrgenommene Ästhetik der Fügezone ein Entscheidungskriterium, kann dieser Aspekt mithilfe von Umfragen qualitativ in das Entscheidungsmodell integriert werden.

Im Rahmen des Entscheidungsmodells werden die qualitativen Faktoren (Siehe Kapitel 2.2.3) mit einer definierten Liste von Wörtern beschrieben. Diese Wörter werden anschließend einem Wert zwischen Null und Eins zugeordnet. Der Aspekt „Umweltfreundlichkeit“, welcher im Entscheidungsmodell qualitativ eingeordnet wird, kann beispielsweise die Ausprägung „Sehr niedrig“ oder „Hoch“ haben. Je höher die Umweltfreundlichkeit, desto näher wird der Wert der Eins zugeordnet. Diese Richtung hängt von dem jeweiligen Aspekt ab. Aspekte, bei der eine niedrige Ausprägung besonders positiv ist, werden umgekehrt skaliert. Der qualitative Aspekt „Gewicht“ ist in der Ausprägung „Normal“ näher an der eins als in der Ausprägung „Sehr hoch“. Die Liste der Wörter und ihre Entschlüsselung sind dabei nach Bedarf erweiterbar. Dafür wird eine Ausprägung für ein Kriterium in JSON definiert und die dazugehörige Entschlüsselung in Python implementiert.

Qualitative Aspekte werden in dem Anforderungsprofil ebenfalls mit Wörtern angegeben. Die hier zur Verfügung stehende Liste skaliert die Werte analog. Die Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Skalierungen des qualitativen Anforderungsprofils und der qualitativen Fügetechnologiebeschreibungen. (siehe Tabelle 4)

Anforderungsprofil	Skalierung	Fügetechnologiespezifikation	Skalierung
Sehr wichtig	1	Sehr hoch	1
Wichtig	0,75	Hoch	0.75
Normal	0,5	Normal	0.5
Weniger wichtig	0,25	Niedrig	0.25

Wichtig	0	Sehr Niedrig	0
---------	---	--------------	---

Tabelle 4: Skalierung von Qualitativen Anforderungen und Qualitativen Fügetechnologiespezifikationen

Da qualitative Faktoren jeweils mit Ihren zugehörigen qualitativen Anforderungen im Anforderungsprofil verglichen werden, ist eine einheitliche Entscheidung ob ein Aspekt qualitativ oder quantitativ modelliert wird, notwendig. Der qualitative Vergleich zwischen den Anforderungen und den Fügetechnologien erfolgt in einem festgelegten Schema, welches nach Bedarf anpassbar oder austauschbar ist (siehe Kapitel 4.2). Die Anforderungserfüllung, ein Wert zwischen Null und Eins, gibt an in wie weit eine Fügetechnologie eine qualitative Anforderung erfüllt. Ist die Skalierung der Fügetechnologiespezifikation einer qualitativen Anforderung höher als die des Anforderungsprofils, wird die Anforderungserfüllung mit Eins angegeben. Dies würde einer vollständigen Anforderungserfüllung entsprechen. Die Fügetechnologie Tailored-Joints würde beispielsweise mit einer Beschreibung der Umweltfreundlichkeit „Sehr hoch“ die Anforderung an die Umweltfreundlichkeit „Normal“ vollständig erfüllen (siehe Tabelle 5).

Kriterium	Anforderung	Tailored-Joints	Anforderungserfüllung
Umweltfreundlichkeit	Normal (0.5)	Sehr hoch (1)	1
Dynamische Beanspruchbarkeit	Sehr Wichtig (1)	Hoch (0.75)	0.66

Tabelle 5: Beispielhafte qualitative Anforderungen und Anforderungserfüllungen von einer Fügetechnologie (Eigene Darstellung)

Ist die Skalierung der Fügetechnologiespezifikation nicht höher als die der Anforderung, ergibt sich die Anforderungserfüllung aus dem Quotienten der beiden Werte (5).

$$\text{Anforderungserfüllung} = \frac{\text{Skalierung}(\text{Fügetechnologiespezifikation})}{\text{Skalierung}(\text{Anforderungsprofil})} \quad (5)$$

Eine qualitative Anforderung „Sehr Wichtig“ an das Kriterium Dynamische Beanspruchbarkeit würde bei einer Fügetechnologiespezifikation „Hoch“ der Fügetechnologie Tailored-Joints einer Anforderungserfüllung von 0.66 entsprechen. (siehe Tabelle 5)

Eine weitere Lösung, ist die Bewertung der Anforderungserfüllung nach Unschärfe. Die Fügetechnologiespezifikationen werden dabei in einer zwischen Null und Eins skalierten Spannweite bewertet. Die Spezifikation „Sehr hoch“ könnte beispielsweise mit [0,9-1] beschrieben werden. Das Anforderungsprofil wird analog in Spannweiten skaliert. (Siehe Abbildung 15)

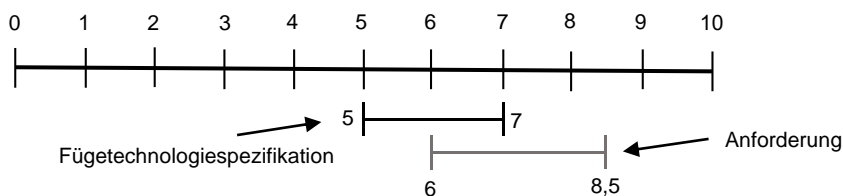


Abbildung 15: Beschreibung von Anforderungen und Fügetechnologiespezifikationen in einem unscharfen Spektrum (Eigene Darstellung)

Die Anforderungserfüllung eines Kriteriums ergibt sich anschließend aus der Wahrscheinlichkeit der Überschneidung der Spannweiten. Im Beispiel der Abbildung 15 befindet sich die Überschneidung im Intervall [6,7]. Die Fügetechnologiespezifikation des Beispiels befindet sich im Intervall [5,7] und ist folglich mit der Wahrscheinlichkeit $P(A) = 50\%$ im Intervall [6,7]. Analog ist die Anforderung mit einer Wahrscheinlichkeit $P(B) = 40\%$ im Intervall [6,7].

Mit dem Multiplikationssatz der Stochastik ist die Wahrscheinlichkeit $P(A \cap B)$ beider Teilwahrscheinlichkeiten durch die Multiplikation dieser gegeben. (6)

$$P(A \cap B) = P(A) * P(B) \quad (6)$$

Dies entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass das beide Teilwahrscheinlichkeiten eintreten und sich Fügetechnologiespezifikation und Anforderungsprofil überschneiden. Die Überschneidung entspricht dabei der Erfüllung der Anforderungen. Durch (5) entspricht dies im gegebenen Beispiel der Wahrscheinlichkeit von $P(A \cap B) = 20\%$.

Ist die Fügetechnologiespezifikation oberhalb der Anforderung ergibt sich eine Anforderungserfüllung automatisch. In der Annahme, dass im gegebenen Beispiel der Abbildung 15 die Anforderung der Fügetechnologiespezifikation und die Fügetechnologiespezifikation der Anforderung entspricht würde sich die Anforderung im Intervall $[5,7]$ und die Fügetechnologiespezifikation im Intervall $[6,8.5]$ befinden. Durch die angenommene Definition, dass eine Überschneidung einer Anforderungserfüllung entspricht, wäre in dem modifizierten Beispiel, die Anforderung zu $P(A \cap B) = 100\%$ erfüllt.

Diese Lösung ist im Entscheidungsmodell nicht implementiert. Eine feste Skalierung der qualitativen Fügetechnologiespezifikation und -Anforderungen ist für den Benutzer bei Veränderung der Datenbank oder dem übergeben der Anforderungen im Anforderungsprofil vorteilhaft. Die Ausprägung der Begriffe ist bei einer festen Skalierung klar ersichtlich.

Die qualitativen Anforderungserfüllungen werden innerhalb des Entscheidungsalgorithmus in Python gespeichert und für die Fügetechnologieauswahl (siehe Kapitel 4.2.4) verwendet,

4.2.3 Vergleich von quantitativen Faktoren

Kriterien können auch quantitativ beschrieben werden. Dies eignet sich besonders, wenn Versuche oder sichere Datenquellen verfügbar sind. Die Taktzeit der stoffschlüssigen Verbindung Löten kann beispielsweise durch vergangene Projekte abgeschätzt worden sein und so mit den Anforderungen eines neuen Projektes verglichen werden. Im Rahmen des Entscheidungsmodell wird angenommen, dass quantitative Kriterien durch eine Gauß-Verteilung beschrieben werden können. Diese Annahme wurde getroffen, da die Ausprägung von quantitativen Kriterien oft abhängig von verschiedenen Aspekten ist und nur schwer auf einen festen Wert verallgemeinert werden kann. Diese Lösung kann als eine statische Abschätzung der Kriterien verstanden werden, da die Verteilungen statisch in der Datenbank hinterlegt werden. Für eine dynamische Abschätzung werden in Kapitel 5 die Verteilungen der quantitativen Kriterien durch Modelle abgebildet. In der folgenden Beschreibung des Vergleichs von quantitativen Kriterien ist es nicht relevant, ob der jeweilige Aspekt statisch aus der Datenbank oder dynamisch aus einem Modell der Solution-Element Library, welche in Kapitel 5 vorgestellt wird, kommt. Beide beschreiben das jeweilige Kriterium in Form von [Mittelwert, Standardabweichung] als Gauß-Verteilung.

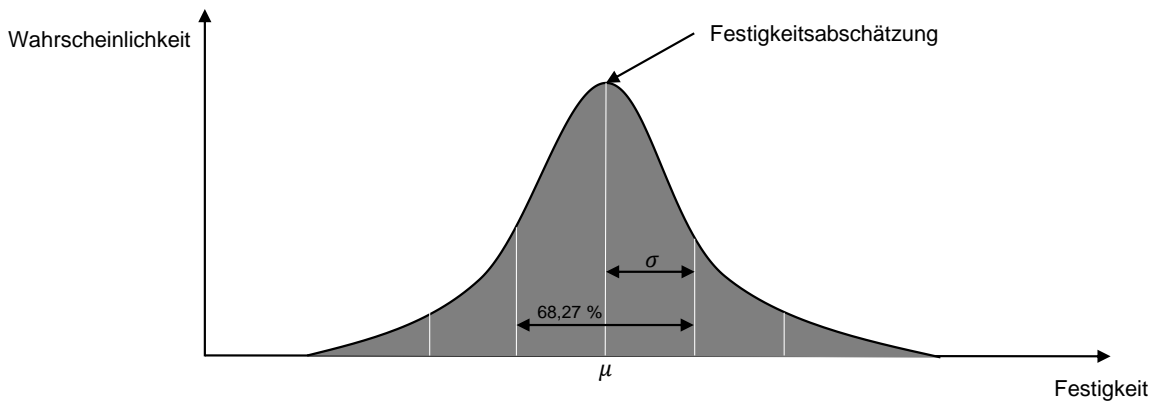


Abbildung 16: Gauß-Verteilung zur Abschätzung der Festigkeit (Eigene Darstellung)

Die Dichtefunktion der Gauß-Verteilung $G(x)$ (7) kann mit den Parametern Mittelwert μ und Standardabweichung σ vollständig beschrieben werden.

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} * e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

Die quantitativen Spezifikationen der Fügetechnologien werden folglich mit [Mittelwert, Standardabweichung] angegeben. Ist für die Abschätzung keine Normalverteilung notwendig, kann die Standardabweichung als Null angegeben werden. (Siehe Tabelle 6)

Kriterien	Anforderung	Kleben (Epoxidharz)	Löten
Festigkeit [MPa]	25 MPa	[25, 2] MPa	[26, 0] MPa
Produktionszykluszeit [s]	2 s	[2, 1] s	[2, 2] s

Tabelle 6: Beispielhafte quantitative Anforderungen und Anforderungserfüllung von zwei verschiedenen Fügetechnologien (Eigene Darstellung)

Die Anforderungen werden hingegen als feste Werte angegeben. Die Anforderung an die Festigkeit kann dabei beispielsweise von dem Konstrukteur als 25 MPa angegeben werden (Siehe Tabelle 6). Die Erfüllung der Anforderungen ergibt sich aus dem Anteil der Fläche unter der Dichtefunktion der Gauß-Verteilung des Kriteriums, bei welcher der Funktionswert Festigkeit höher als die gegebene Festigkeitsanforderung ist (Siehe Abbildung 17). Der Quotient der anteiligen Fläche und der gesamten Fläche ist die Wahrscheinlichkeit, dass der normalverteilte Parameter die gegebene Anforderung erfüllt. Dieser zwischen Null und Eins liegende Wert wird im folgenden Anforderungserfüllung genannt.

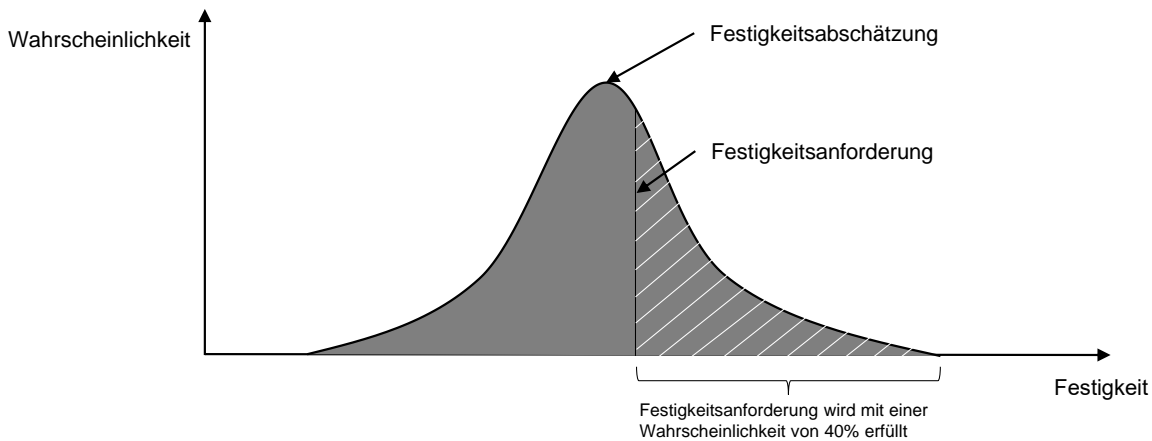


Abbildung 17: Anforderungserfüllung der gaußverteilten Festigkeitsabschätzung (Eigene Darstellung)

Mathematisch entspricht die Anforderungserfüllung der Subtraktion des Integrals der Dichtefunktion bis zur gegebenen Anforderung des Integrals der Dichtefunktion über die gesamte Fläche. (8)

$$\text{Anforderungserfüllung} = \int_{-\infty}^{\infty} G(x) dx - \int_{-\infty}^{\text{Anforderung}} G(x) dx \quad (8)$$

Die eingeschlossene Fläche unter der Dichtefunktion entspricht der Verteilungsfunktion, sodass eine mathematische Beschreibung der Anforderungserfüllung auch über die Verteilungsfunktion (9) erfolgen kann.

$$\text{Anforderungserfüllung} = \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(\frac{x - \mu}{\sqrt{2\sigma^2}})] - \frac{1}{2} [1 + \operatorname{erf}(\frac{\text{Anforderung} - \mu}{\sqrt{2\sigma^2}})] \quad (9)$$

Innerhalb des Entscheidungsskripts wird die Anforderungserfüllung über der in Python zur Verfügung stehenden Frameworks analog berechnet. Die Anforderungserfüllungen werden anschließend gespeichert und in der Fügetechnologieauswahlentscheidung miteinander verrechnet (siehe Kapitel 4.2.4).

4.2.4 Fügetechnologieauswahl

Um eine vollständige Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Fügetechnologien und dem Anforderungsprofil zu ermöglichen müssen die Anforderungserfüllungen aller Kriterien berücksichtigt werden. Tabelle 7 gibt einen Überblick über ein beispielhaftes Anforderungsprofil mit der dazugehörigen Anforderungserfüllung der Fügetechnologie Kleben (Epoxidharz).

Kategorie	Kriterium	Anforderung	Kleben (Epoxidharz)	Anforderungserfüllung
Qualitativer Faktor	Umweltfreundlichkeit	Sehr Wichtig	Normal	0.5
Qualitativer Faktor	Dynamische Beanspruchbarkeit	Weniger Wichtig	Hoch	1
Qualitativer Faktor	Wärmebeständigkeit	Sehr Wichtig	Hoch	0.75
Quantitativer Faktor	Produktionszykluszeit	2 s	[2, 1] s	0,51

Quantitativer Faktor	Festigkeit	12 MPa	[9, 5] MPa	0.38
----------------------	------------	--------	------------	------

Tabelle 7: Beispielhaftes Anforderungsprofil mit Anforderungserfüllung der Fügetechnologie Kleben (Epoxidharz) (Eigene Darstellung)

Die Gesamtbewertung der Fügetechnologie ergibt sich nun aus dem Quotienten der Summe der Anforderungserfüllungen und der Anzahl n der beachteten Kriterien (10).

$$\text{Gesamtbewertung} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Anforderungserfüllung}_i}{\sum_{i=1}^n i} \quad (10)$$

Die Fügetechnologie Kleben (Epoxidharz) würde im gegebenen Beispiel (siehe Tabelle 7) eine Gesamtbewertung von 0,68 erhalten. Bedingt durch die vorgestellte mathematische Definition (7) ist die Gesamtbewertung somit ebenfalls ein skaliertes Wert zwischen Null und Eins. Tabelle 8 gibt einen beispielhaften Überblick über die Gesamtbewertung verschiedener Fügetechnologien.

Fügetechnologie	Gesamtbewertung
Tailored-Joints	0,72 (Höchste Gesamtbewertung)
Kleben (Epoxidharz)	0,68
Schrauben	Ausgeschlossen
Nieten	0,55

Tabelle 8: Beispielhafter Vergleich der Gesamtbewertung verschiedener Fügetechnologien (Eigene Darstellung)

Die zwischen Null und Eins skalierte Gesamtbewertung kann als prozentualer Anteil der gesamten Anforderungserfüllung einer Fügetechnologie an ein gegebenes Anforderungsprofil verstanden werden. Die Fügetechnologie mit der höchsten Gesamtbewertung wird für das gegebene Anforderungsprofil empfohlen. Im gegebenen Beispiel wird die Fügetechnologie Tailored-Joints empfohlen. (Siehe Tabelle 8)

Der vorgestellte Auswahlalgorithmus schlägt somit die Fügetechnologie vor, die die gegebenen Anforderungen im Durchschnitt aller Kriterien am besten erfüllt. Bei einer Bewertung innerhalb von zwei Kriterien würde somit die vollständige Erfüllung eines Kriteriums bei einer vollständigen Nichterfüllung des anderen Kriteriums, die gleiche Gesamtbewertung wie eine Erfüllung der beiden Kriterien mit einer Bewertung von 0.5 (50% Anforderungserfüllung) erhalten.

Eine alternative Implementierung berücksichtigt zusätzlich einen weiteren Aspekt. In einigen Fällen kann es innerhalb des Projektes wichtig sein, dass alle Anforderungen zu einem Mindestmaß erfüllt werden. Beispielsweise müssen alle Anforderungen mit einer angegebenen Wahrscheinlichkeit erfüllt werden. Ist dies nicht der Fall wird die Fügetechnologie aussortiert. Der Unterschied wird an einem Beispiel deutlich. Unter der Annahme, dass die Fügetechnologie Tailored-Joints im Mittelwert wie in Tabelle 8 gezeigt die beste Gesamtbewertung haben würde, könnte es dennoch ausgeschlossen werden. Dies wäre der Fall, wenn der Benutzer eine Mindestbefriedigung aller Kriterien zu 30% vorgeben würde. Kann Tailored-Joints diese Anforderung innerhalb eines Kriteriums nicht erfüllen, wäre die Auswahl eine Fügetechnologie, welche eine niedrigere Gesamtbewertung aufweisen würde, jedoch jedes Kriterium zu einem gegebenen Mindestmaß erfüllen würde. Tabelle 9 zeigt das in Tabelle 8 gegebene Beispiel in Hinblick auf den alternativen Auswahlalgorithmus.

Fügetechnologie	Gesamtbewertung
-----------------	-----------------

Tailored-Joints	0.72 (Ausgeschlossen) *
Kleben (Epoxidharz)	0,68 (Höchste Gesamtbewertung)
Schrauben	Ausgeschlossen
Nieten	0,55

Tabelle 9: Beispielhafter Vergleich einer alternativen Gesamtbewertung von Fügetechnologien (Eigene Darstellung) * Die einzelnen Kriterien sind nicht zu einer definierten Mindestanforderungserfüllung von 30% erfüllt

Der Auswahlalgorithmus kann in Python durch das verändern einer Variablen umgestellt werden. Wie in den letzten zwei Unterkapiteln beschrieben, können weitere Algorithmen implementiert und nach Bedarf konfiguriert werden. Die Entscheidung wird in Python in der Konsole ausgegeben. Im folgenden Kapitel 5 wird eine Erweiterung der quantitativen Kriterien durch Modelle vorgestellt. Des Weiteren wird die Konsole mit einer grafischen Benutzeroberfläche verbunden und somit durch diese ersetzt. Dieser erste Teil des Hauptkapitels der Arbeit bildet das Entscheidungsmodell, welches mit Verknüpfung der in Kapitel 5 vorgestellten Solution-Element Library die gesamte Methodik der Fügetechnologieentscheidung bildet.

5 Aufbau und Integration einer Solution-Element Library

Im Rahmen der modellbasierten Produktentwicklung ist eine Solution-Element Library eine Ansammlung von Prinziplösungen (Solution-Elements), die definierte Systemanforderungen in technischen Systemen lösen können (G. Jacobs 2021). Eine Anforderung kann dabei beispielsweise das Umwandeln von elektrischer zu mechanischer Energie sein. In dieser Arbeit wird die Solution-Element Library nur mit Solution-Elements, die die vorgegebene Anforderung „Kraft leiten“ erfüllen, aufgebaut. Die Solution-Elements sind folglich digitale Abbildungen von Fügetechnologien. Die Modelle der Solution-Elements beschreiben quantitative Kriterien der Fügetechnologien und können die in der Datenbank vorhandenen Abschätzungen ersetzen.

Im Folgenden wird zunächst die Struktur der Solution-Element Library aufgebaut, vorgestellt und der übergeordnete Aufbau eines Solution-Elements erläutert. Anschließend wird ein beispielhaftes Solution-Element einer Fügetechnologie, sowie ein Modell der Prinziplösung (Festigkeitsmodell, Kostenmodell etc.) aufgebaut und die Vorteile der Modelle zu den in der Datenbank vorhandenen Abschätzungen erklärt. Dabei wird insbesondere auf den Umgang mit Unsicherheiten eingegangen. Der Aufbau der Solution-Element Library und der Solution-Elements mit den jeweiligen Modellen erfolgt in der Software Cameo Systems Modeler (CSM). Abschließend wird die Solution-Element Library in das bestehende Entscheidungsmodell in Python integriert und eine grafische Oberfläche der zusammengefügten Software vorgestellt.

5.1 Struktur der Solution-Element Library

Die Solution-Element Library besitzt die Solution-Elements der verschiedenen Fügetechnologien als „Parts“. Dies bedeutet innerhalb der Systems Modelling Language, dass die einzelnen Modelle ein Bestandteil der Library sind. Abbildung 18 illustriert dies kompakt in einem Block Definition Diagram.

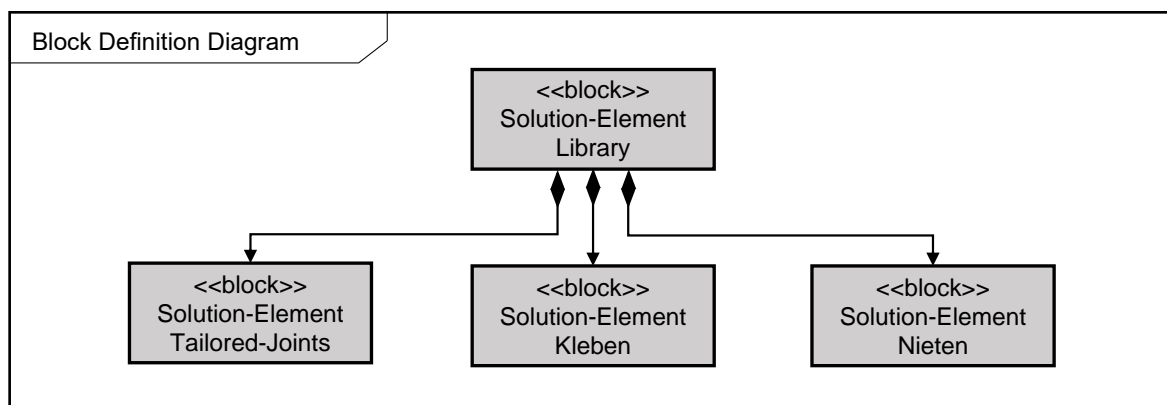


Abbildung 18: Ausschnitt der Struktur der Solution-Element Library in einem BDD (Eigene Darstellung)

Ein Solution-Element stellt eine Prinziplösung für eine technische Problemstellung dar. Innerhalb der agilen Produktentwicklung werden ingenieurswissenschaftliche Lösungsansätze (Prinziplösungen) mit technischen Problemstellungen verknüpft. Die Problemstellung dieser Arbeit ist definiert als „Kraft leiten“. Die Problemstellung kann analog als das Verbinden von zwei Bauteilen betrachtet werden. Die Prinziplösungen dieser Problemstellung sind folglich Fügetechnologien.

Ein Solution-Element wird im Rahmen der Forschung des Instituts für Maschinenelemente und Systementwicklung (IMSE) in einem definierten Schema illustriert. Dabei wird der Physikalische Effekt, die Modelle und die verschiedenen Möglichkeiten die Modelle auszuführen (Workflows) hervorgehoben. In Abbildung 19 ist das Solution-Element Tailored-Joints veranschaulicht.

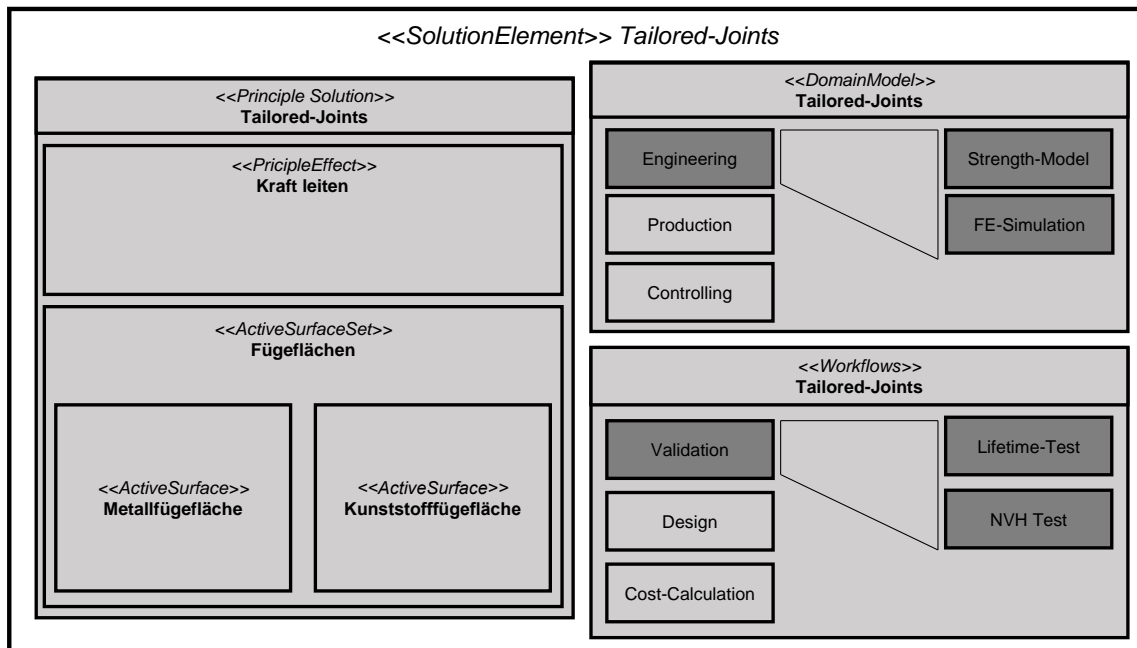


Abbildung 19: Solution-Element der Fügetechnologie Tailored-Joints nach (Jacobs, Zerwas und Spütz 2021) (Eigene Darstellung)

Wird die Problemstellung in verschiedenen Aspekten konkretisiert, wird im Folgenden der Begriff Use-Case verwendet. Ein Use-Case wäre somit, dass Fügen von zwei Bauteilen unter bestimmten technologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen. Dabei sind die Größe der Fügefläche oder die Anzahl der Fügeprozesse innerhalb eines Projektes (Losgröße) beispielhafte Rahmenbedingungen. Diese Parameter können in der Solution-Element Library hinterlegt und den Solution Elements übergeben werden. Die Modelle der Solutions Elements verwenden die Parameter und beschreiben die Prinzipiellösung somit bezogen auf den gegebenen Use-Case. Da sich ein Modell auf einen gewissen Aspekt eines Solution-Elements bezieht, wird im Folgenden der Begriff Expertenmodell (Domain Modell) (siehe Abbildung 19) verwendet.

Innerhalb dieser Arbeit beziehen sich die Expertenmodelle auf die quantitativen Aspekte der Fügetechnologie, die auch statisch in der Datenbank hinterlegt sind (Siehe 4.1.1). Dabei können diese nun im Zusammenhang mit dem gegebenen Use-Case modelliert werden und die jeweilige Abschätzung in der Datenbank ersetzen. Die Modelle sollen dabei ebenfalls die quantitativen Aspekte als Gaußverteilung modellieren. Die Modelle ersetzen die Abschätzungen in der Datenbank dabei nur wenn sie vorhanden sind. Die Modelle innerhalb der Solution-Element Library sind somit eine Untermenge der quantitativen Abschätzungen in der Datenbank.

Die Übergabe der Parameter in die verschiedenen Expertenmodelle der Prinzipiellösungen ist in Abbildung 20 illustriert. Das Internal Block Diagram des übergeordneten Blocks „Solution-Element Library“ übergibt die Parameter des Use-Case in die Expertenmodelle der Solution Elements. Dabei kann eine Rahmenbedingung innerhalb des Use-Case auch für mehrere Modelle relevant sein.

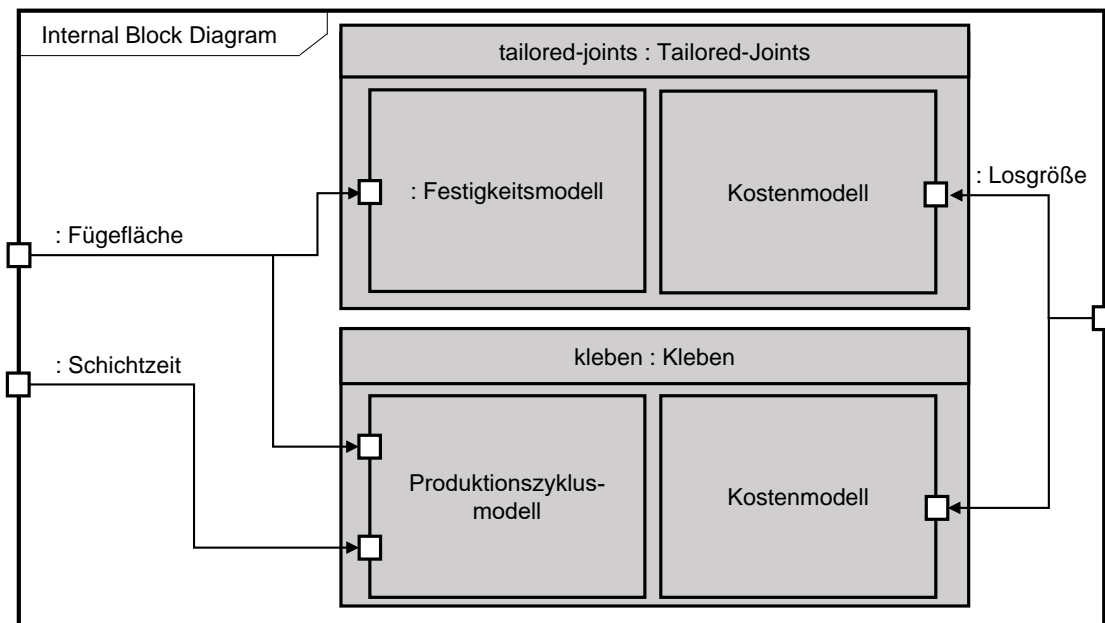


Abbildung 20: Interne Strukturmodellierung der Solution-Element Library mit zwei beispielhaften Solution-Elements in einem IBD (Eigene Darstellung)

Die aus den jeweiligen Modellen hervorgehenden Gaußverteilungen werden an den übergeordneten Block der Solution-Element Library zurückgegeben. Die Verbindung und Integration mit dem Entscheidungsmodell erfolgt in Kapitel 5.3.

Im Folgenden soll auf den Aufbau eines einzelnen Expertenmodells eingegangen werden und die Vorteile der Modellierung der quantitativen Aspekte verglichen zu statischen Abschätzungen der Datenbank hervorgehoben werden.

5.2 Aufbau eines Expertenmodells eines Solution-Elements

Ein Expertenmodell (Domain Model) (siehe Abbildung 19) ist ein Modell, das einen spezifischen Aspekt des Solution-Elements modelliert. Dies kann beispielsweise die Festigkeit sein. Das Kapitel befasst sich zunächst mit dem internen Aufbau eines beispielhaften Expertenmodells eines Solution-Elements und erweitert das Modell anschließend um den Umgang mit statistischen Unsicherheiten und Unsicherheiten aufgrund fehlender Daten. Dabei wird ein Expertenmodell in einem Parametric Diagram in CSM aufgebaut.

Die Inputparameter eines Expertenmodells sind eine Untermenge der Parameter des Use-Case. Der Output ist eine Gaußverteilung, beschrieben durch [Mittelwert, Standardabweichung]. Ist eine Modellierung ohne eine Unsicherheitsabschätzung möglich kann der Output als fester Wert angegeben werden. Innerhalb der Datenstruktur entspricht dies dann [Mittelwert, Standardabweichung] mit einer Standardabweichung von Null. In Abbildung 21 ist ein Expertenmodell ohne Unsicherheitsabschätzung gegeben. Das Expertenmodell des Solution Elements Tailored-Joints berechnet die maximale Kraft der Fügetechnologie Tailored-Joints für einen gegebenen Use-Case. Der Input aus dem Use-Case ist dabei die Fläche der Fügezone. Mithilfe der maximalen Belastbarkeit in MPa und der gegebenen Fläche kann die maximale Kraft, mit der die Fügefläche beansprucht werden kann, angegeben werden. Die maximale Spannung wird dabei aus einer Simulation in der Software Abaqus berechnet, welche mit diesem Modell verknüpft ist. Dafür werden dem Modell interne Simulationsparameter übergeben, welche spezifisch für die verknüpfte Simulation sind.

Verschiedene Simulationen können so in die Expertenmodelle der Prinziplösungen integriert werden und sind folglich Bestandteil der übergeordneten Solution-Element Library.

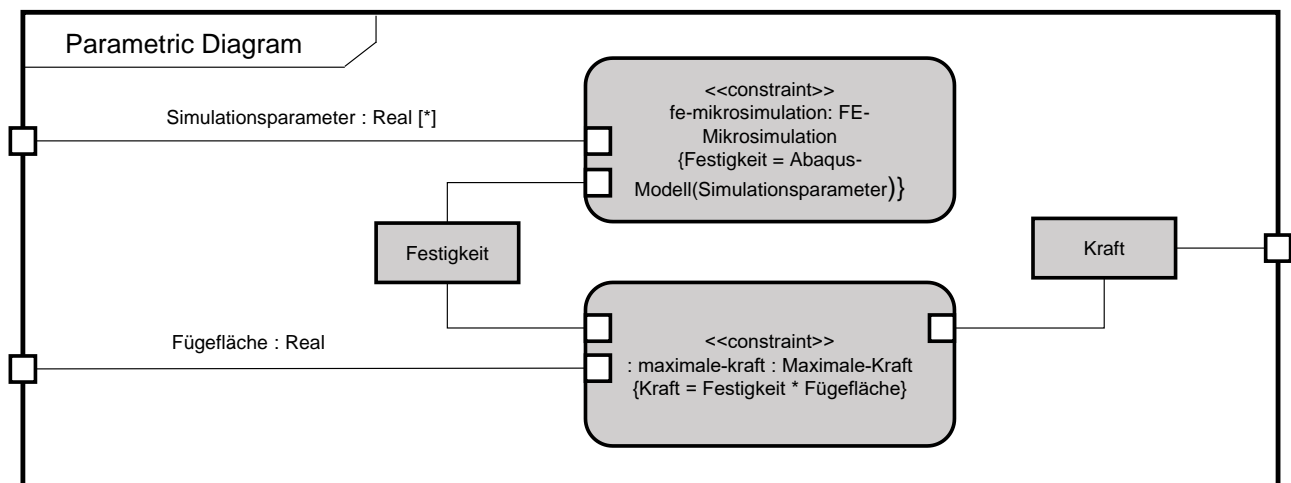


Abbildung 21: Festigkeitsmodellierung des Solution-Elements Tailored-Joints in einem Parametric Diagram (Eigene Darstellung)

Der Output „Kraft“ wird über die Systemgrenze des Modells an die übergeordnete Solution-Element Library übergeben. Ohne die Unsicherheitsabschätzung würde im gegebenen Beispiel also ein fester Wert die zugehörige Verteilung des quantitativen Kriteriums in der Datenbank ersetzen. Aufgrund der Abhängigkeit des Ergebnisses in Bezug auf die Input-Parameter des Use-Case ist eine höhere Güte des Ergebnisses verglichen mit der Datenbank zu erwarten. Eine Möglichkeit zur Integration von Unsicherheiten innerhalb der Modelle kann sinnvoll sein, wenn bestimmte Parameter nur geringfügig bekannt oder statistisch verteilt sind. Im Folgenden wird auf die Modellierung verschiedener Unsicherheiten und deren Implementierung in den Expertenmodellen eingegangen.

5.2.1 Modellierung von statistischen Unsicherheiten

Durch den Use-Case übergebene Parameter können statistischen Unsicherheiten unterliegen. Ebenfalls können interne Modell- und Simulationsparameter statistische Unsicherheiten aufweisen. Innerhalb dieser Arbeit werden statistische Unsicherheiten durch Normalverteilungen modelliert. Unterliegt ein Simulationsparameter im Beispiel der Abbildung 21 einer statistischen Unsicherheit, wird dieser folglich mit [Mittelwert, Standardabweichung] angegeben. Es wird im Folgenden angenommen, dass im gegebenen Beispiel der Festigkeitsberechnung der Fügetechnologie Tailored-Joints die Festigkeit abhängig von der Materialdichte des Kunststoffes ist, welcher mit Metall verbunden wird. Kann dieser vorher nur experimentell durch mehrere Stichproben bestimmt werden, unterliegt er einer solchen statistischen Unsicherheit. Aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes kann die Materialdichte durch eine Normalverteilung (6) beschrieben werden. Dieser beschreibt, dass viele unabhängige Stichproben von physikalischen, technischen oder ökonomischen Beobachtungen annähernd normalverteilt sind. Der Umgang und die Grenzen der Modellierungsmöglichkeiten mit statistischen Unsicherheiten innerhalb dieser Arbeit werden mit einer kurzen mathematischen Beschreibung eingeleitet.

Die Normalverteilung kann durch die Dichtefunktion $G(x)$ (7) beschrieben werden. Integriert man die Dichtefunktion $G(x)$ über die gesamte Fläche erhält man den Wert eins. (siehe 11) Dies bedeutet, dass im gegebenen Beispiel die Materialdichte innerhalb ihrer Normalverteilung einen Wert annehmen wird.

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(x) dx = 1 \quad (11)$$

Der Erwartungswert μ der Verteilung $G(x)$ ergibt sich dabei aus dem Integral des Produktes der Verteilung und dem Funktionswert x über die gesamte Fläche (12). Die Materialdichte ist folglich um den Erwartungswert μ verteilt sein.

$$E(G(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} x * G(x) dx = \mu \quad (12)$$

Die Varianz $Var(G(x))$, welche die Abweichung vom Erwartungswert μ beschreibt, ergibt sich aus dem Integral des Produktes $G(x)$ und der zweiten Potenz der Differenz zwischen dem Funktionswert x und dem Erwartungswert μ . Sie beschreibt die Verteilung der Materialdichte um den Erwartungswert. (13)

$$Var(G(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 * G(x) dx = \sigma^2 \quad (13)$$

Der gaußverteilte Wert der Materialdichte ist nur ein Parameter innerhalb des Modells der Festigkeit. Durch die Verteilung der Materialdichte ist die Festigkeit bei sonst konstanten Parametern ebenfalls eine Gaußverteilung. Die übrigen Parameter des Modells werden im Folgenden als Konstante k angenommen. Diese wird nun mit der Verteilung der Materialdichte multipliziert. Die Festigkeit würde sich somit durch das Produkt von k und der Verteilung $G(x)$ ergeben.

$$Festigkeit(x) = k * G(x) \quad (14)$$

Der Erwartungswert der Festigkeit $\tilde{\mu}$ ergibt sich folglich aus den Formeln (11) und (13) zu (14) und entspricht dem Produkt des Erwartungswertes der normalverteilten Zufallsvariablen der Materialdichte μ und den zusammengefassten übrigen Modellparametern k .

$$E(\tilde{G}(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} (k * x) * G(x) dx = k * \mu = \tilde{\mu} \quad (15)$$

Die Standardabweichung der Festigkeit $\tilde{\sigma}$ als Wurzel der Varianz entspricht dabei ebenfalls dem Produkt der Standardabweichung der Materialdichte σ und den übrigen Modellparametern k . (16)

$$Var(\tilde{G}(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} (kx - k\mu)^2 * G(x) dx = k^2 * Var(G(x)) = k^2 * \sigma^2 = \tilde{\sigma}^2 \quad (16)$$

Der Einfluss der Modellparameter k auf die normalverteilte Festigkeit ist in Abbildung 22 veranschaulicht mit $k = 2$.

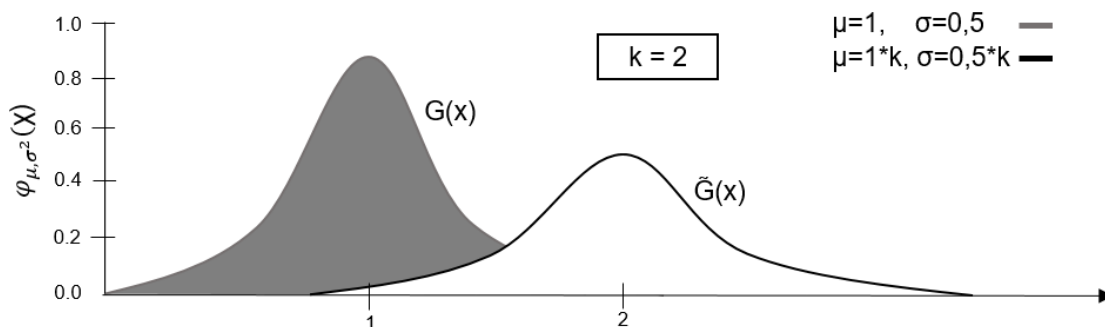


Abbildung 22: Einfluss eines gaußverteilten Faktors auf ein Produkt mit einem konstanten Faktor k (Eigene Darstellung)

Dies bedeutet im Rahmen der Modellierung in den Parametric Diagrams, dass statistische Unsicherheiten eines Modellparameters als [Mittelwert, Standardabweichung] dem jeweiligen Modell übergeben werden können. Der Output wird dann ohne weitere Modifikationen innerhalb des jeweiligen Modells als [Mittelwert, Standardabweichung] weitergegeben.

Durch die getroffene Annahme (10) bedingt dies jedoch, dass der normalverteilte Parameter ausschließlich multiplikativ mit den übrigen Parametern eines Modells zusammenhängt. Unter der Annahme eines additiven Zusammenhangs zwischen der normalverteilten Variable und den übrigen Parameters (17) würde sich der Mittelwert des Modellergebnisses $\tilde{\mu}$ ebenfalls additiv aus der Summe des Mittelwertes des unsicheren Parameters μ und den übrigen Parametern k ergeben (18)

$$Festigkeit(x) = k + G(x) \quad (17)$$

$$E(\tilde{G}(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} (k + x) * G(x) dx = k + \mu = \tilde{\mu} \quad (18)$$

Die Standardabweichung des Modellergebnisses $\tilde{\sigma}$ hängt in einem additiven Zusammenhang jedoch nur von der Standardabweichung des unsicheren Parameters ab und wird nicht mit dem Wert der übrigen Parameter k addiert. Sie entspricht der Standardabweichung des unsicheren Modellparameters. (19)

$$Var(\tilde{G}(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} (k + x - k + \mu)^2 * G(x) dx = Var(G(x)) = \sigma^2 = \tilde{\sigma}^2 \quad (19)$$

Bei Übergabe des unsicheren Parameters in Form von [Mittelwert, Standardabweichung] würde das Modell die Standardabweichung mit k summieren und das Modellergebnis würde mit einer mathematisch falschen Standardabweichung beschrieben werden. Hängt der ausgewählte unsichere Modellparameter mit den übrigen Modellparametern in einem additiven Zusammenhang zusammen, kann eine Unsicherheitsabschätzung des Modellergebnisses mit der gegebenen Implementierung nicht erfolgen. Hierfür müssten zusätzliche Berechnungsböcke den Zusammenhang erkennen und die Standardabweichung nach (17) berechnen. Die Arbeit beschränkt sich in Bezug auf statistische Unsicherheiten jedoch auf den Umgang mit einem unsicheren Modellparameter in einem multiplikativen Verhältnis zu den übrigen Modellparametern.

5.2.2 Modellierung von Unsicherheiten aufgrund fehlender Daten

Neben statistischen Unsicherheiten kann es aufgrund eines frühen Projektstadiums zu Unsicherheiten des geforderten Use-Cases kommen. Dabei kann beispielsweise die Losgröße der Produktion oder die Größe der Fügefläche noch nicht vollständig bestimmt werden. Innerhalb der Arbeit wird davon ausgegangen, dass solche Unsicherheiten in einem Intervall angegeben werden können. Der jeweilige Parameter kann dabei mit einer unteren Grenze und einer oberen Grenze abgeschätzt werden.

Da jeder Aspekt für mindestens ein Expertenmodell verwendet wird (Siehe Abbildung 20), sind die zugehörigen Modellergebnisse abhängig von dem Wert, den der unsichere Parameter annimmt. Mit der unteren, sowie der oberen Abschätzung kann eine Analyse der von dem Parameter abhängigen Modellergebnisse erfolgen. Dabei wird das Intervall zwischen oberer und unterer Abschätzung des jeweiligen Parameters in diskreten skalierten Werten abgebildet und dem Modell übergeben. In der verwendeten Software CSM kann die Berechnung nun mit jedem diskreten Wert innerhalb des Intervalls ausgeführt werden. Das Ergebnis ist folglich eine Liste mit Modellergebnissen in

Abhängigkeit des Wertes des ausgewählten unsicheren Parameters. Die Menge an diskreten Datenpunkten innerhalb des Intervalls des unsicheren Parameters wird in dieser Arbeit auf 10 eingestellt und kann nach Bedarf verändert werden. Abbildung 23 zeigt das Ergebnis von zwei unterschiedlichen Modellen in Abhängigkeit von dem gleichen unsicheren Modellparameter in 10 diskreten Werten. Dabei steht dieser in einem Modell in einem linearen und in dem anderen Modell einem exponentiellen Zusammenhang mit den jeweiligen Modellen.

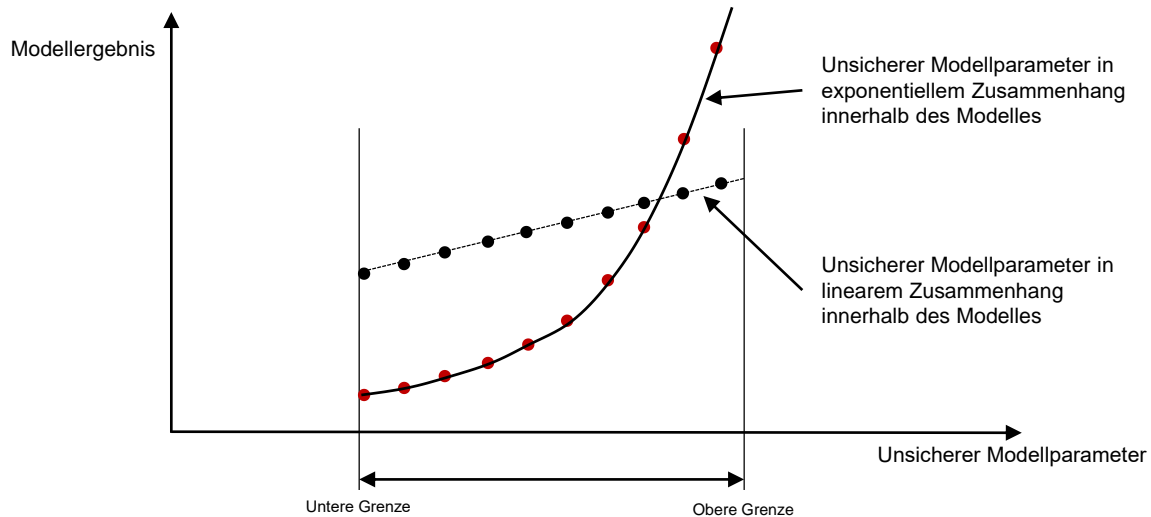


Abbildung 23: Regression zur Interpolation eines Intervalls (Eigene Darstellung)

Innerhalb dieser Arbeit werden quantitative Modellierungen als feste Parameter (siehe Kapitel 4.2.3) oder als normalverteilte Zufallsvariablen in Form von [Erwartungswert, Standardabweichung] angegeben. Die Transformation der berechneten Liste als Modellergebnis mit diskreten Werten in Abhängigkeit von einem unsicheren Modellparameter in eine Normalverteilung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird das arithmetische Mittel der Liste gebildet und stellt dabei den Erwartungswert der Verteilung dar. Anschließend ergibt sich die Standardabweichung durch die einzelnen Abweichungen der Werte der Liste von dem arithmetischen Mittel. (20)

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \mu)^2}{n}} \quad (20)$$

Eine solche Unsicherheitsabschätzung kann innerhalb eines Modells in einem Parametric Diagrams in Cameo Systems Modeler modular aufgebaut werden. Dafür wird der jeweilige unsichere Parameter als Liste mit [Untere Grenze, Obere Grenze] einem in der Software CSM zur Verfügung stehenden Constraint-Block „Regression“ übergeben. Der Block kann dabei einfach nach Bedarf in das Modell hinzugefügt und wieder entfernt werden. Das Modellergebnis wird als diskrete Datenmenge in einer Liste in Abhängigkeit der Grenzen des unsicheren Parameters berechnet. Dieses kann nun mit einem dem Block „Gauß-Verteilung“ in eine Normalverteilung transformiert werden, um die für das Entscheidungsmodell benötigte Form [Mittelwert, Standardabweichung] zu erhalten. Dieser Block steht dabei ebenfalls innerhalb der Software CSM zur Verfügung. Abbildung 24 zeigt den modularen Aufbau eines Modells mit Unsicherheitsabschätzung aufgrund fehlender Daten mit den Blöcken Regression und Gaußverteilung.

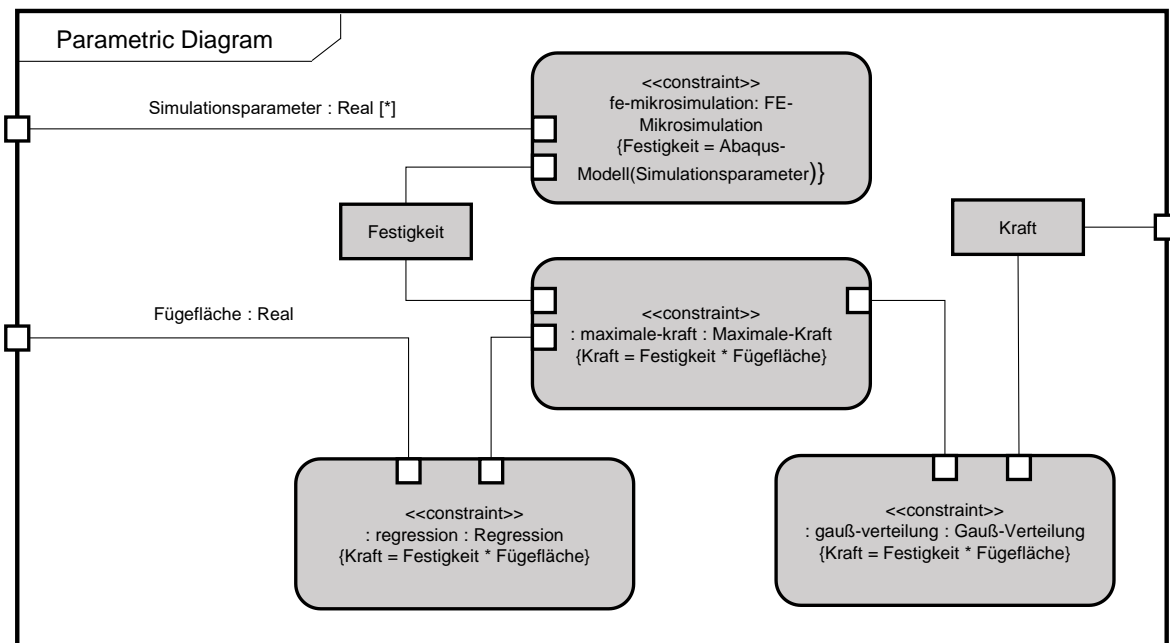


Abbildung 24: Modulare Zusammensetzung der Unsicherheitsabschätzung aufgrund fehlender Daten in einem Parametric Diagram (Eigene Darstellung)

Die hier vorgestellte Unsicherheitsabschätzung der Modelle bezieht sich auf die Abschätzung eines projektbedingten unsicheren Parameters ohne einen weiteren statistisch unsicheren Parameter. Dies bedeutet, dass jedes Modell insgesamt einen unsicheren Parameter aufweisen kann.

5.3 Integration in das Entscheidungsmodell

Das Modellierungstool Cameo Systems Modeler (CSM), in dem die Solution-Element Library aufgebaut wird, stellt eine interne Schnittstelle zu MATLAB zur Verfügung. Durch diese konnte die vorgestellte Abaqus Simulation in eine Modellierung integriert werden (siehe Kapitel 5.2). MATLAB ermöglicht über eine integrierte Application Programming Interface (API) die Kommunikation mit Python. Durch die API kann MATLAB folglich als Datenschnittstelle zwischen der Solution-Element Library und dem Entscheidungsmodell in Python fungieren. Die Datenschnittstelle stellt die Kommunikation der beiden Modelle sicher. Die zusammengesetzte Software ist in Abbildung 25 mit einem vereinfachten Ablaufdiagramm illustriert.

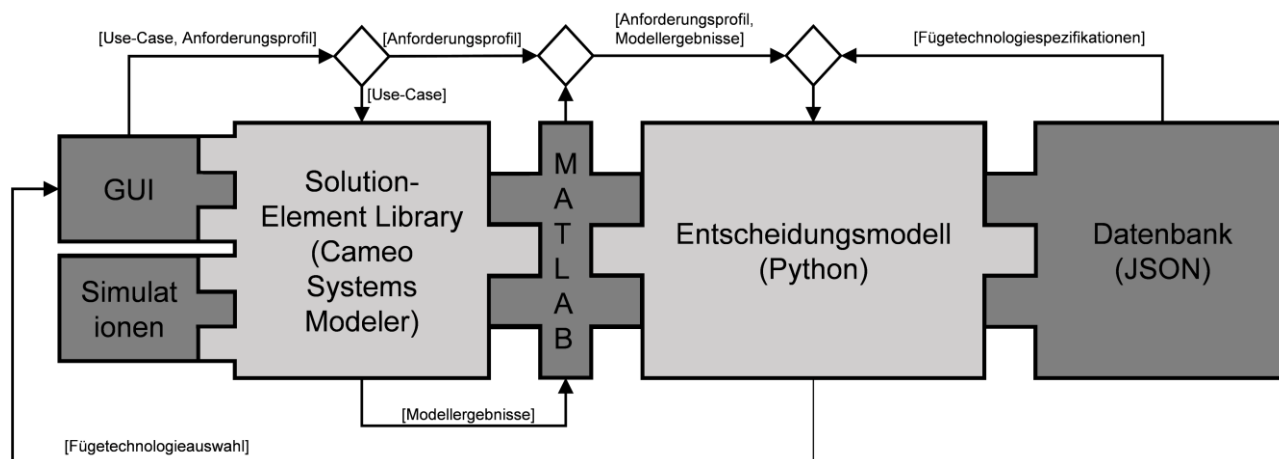


Abbildung 25: Modularer Aufbau der Software mit Ablaufdiagramm (Eigene Darstellung)

Durch das Hinzufügen einer grafischen Oberfläche (GUI) (Siehe Abbildung 25) in Cameo Systems Modeler kann eine intuitive Interaktion der gesamten Fügetechnologieentscheidung für den Benutzer ermöglicht werden. Das Anforderungsprofil wird nun nicht mehr in Python (Siehe Abbildung 12), sondern in CSM übertragen und von Python über MATLAB aufgenommen. Parallel übergibt der Benutzer die Angaben seines Use-Case der Problemstellung „Kraft leiten“. Mit diesen werden alle verfügbaren Expertenmodelle der Solution-Element Library ausgeführt und mit gegebenen Unsicherheitsabschätzungen von Python aufgenommen. Das Skript prüft nun die Anzahl der Modelle und verwendet diese um statische Abschätzungen der quantitativen Faktoren in der Datenbank zu ersetzen. Das Entscheidungsmodell wird nun mit den Daten der Datenbank und der Expertenmodelle, sowie des Anforderungsprofils ausgeführt. Die Auswahl alternativer Entscheidungsansätze kann dabei ebenfalls in der grafischen Oberfläche in CSM erfolgen und wird nun dem Entscheidungsmodell übergeben. Das Ergebnis des Algorithmus wird abschließend an die grafische Oberfläche zurückgegeben. Der gesamte Ablauf ist in Abbildung 27 veranschaulicht.

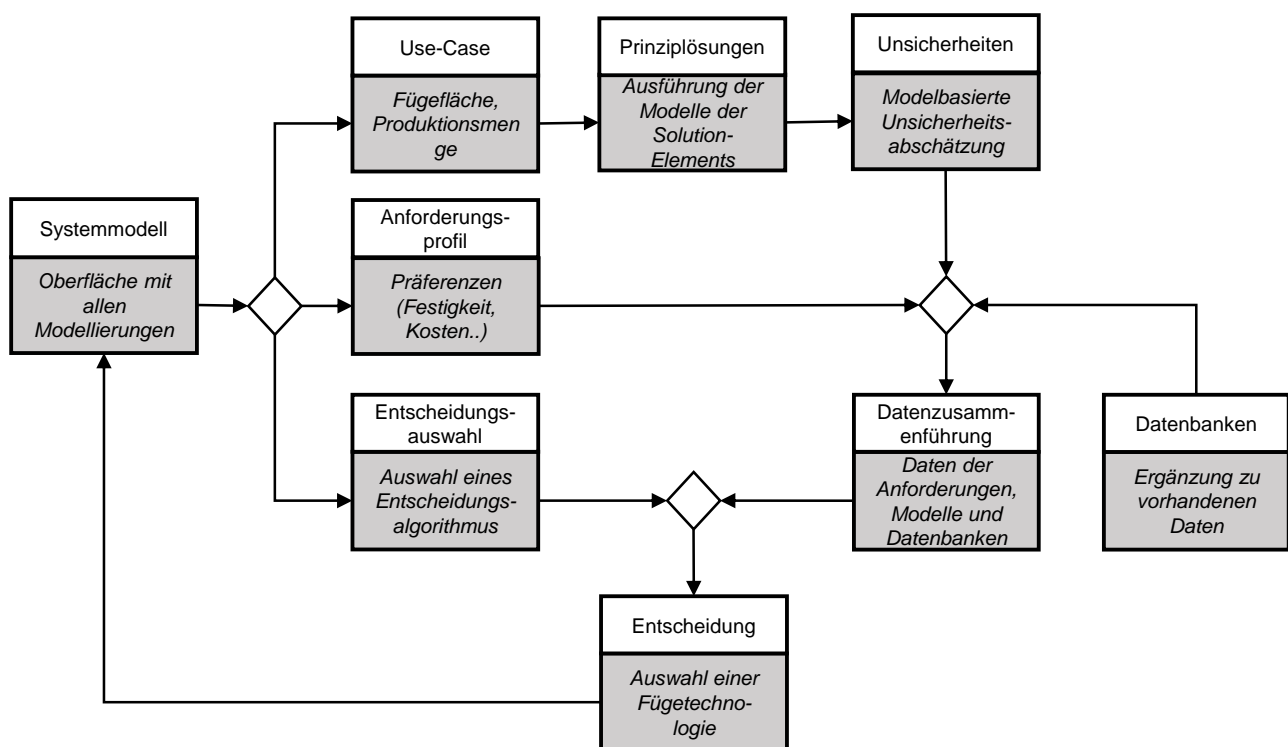


Abbildung 26: Ablaufdiagramm (Eigene Darstellen)

Die beschriebene Benutzeroberfläche soll dabei die Komplexität der Datenstruktur hinter dem gesamten Entscheidungsprozess unberücksichtigt lassen und dem Benutzer lediglich eine kompakte Schnittstelle zur Übergabe aller relevanten Informationen geben. Informationen über den Quellcode erscheinen lediglich bei Fehlern innerhalb eines Bestandteils der zusammengesetzten Software. Eine Fehlermeldung in Python oder MATLAB wird dann folglich in der Benutzeroberfläche gemeldet. Die Ausgabe und damit die Empfehlung einer Fügetechnologie erfolgt ebenfalls in der

grafischen Benutzeroberfläche. Abbildung 28 zeigt eine Übersicht der Benutzeroberfläche in Cameo Systems Modeler.

Fügetechnologieentscheidung – Graphical User Interface

Ausschlusskriterien	Quantitative Anforderungen	Qualitative Anforderungen
Lösbarkeit	Kosten	Wärmebeständigkeit
Ja	2 [€/Stk]	Wichtig
...	Festigkeit	Umweltfreundlichkeit
...	...	Unwichtig
...	Zyklus	...
...

Modellparameter	Algorithmusmodifikationen
Höhe (Fügefläche)	Zusätzliche Information
20 mm	Nein
Breite (Fügefläche)	
...	
Losgröße	
...	

Fügetechnologieauswahl: Unter dem gegebenen Anforderungsprofil ist die Auswahl der Fügetechnologie „Kleben mit Epoxidharz“, aufgrund einer Anforderungserfüllung von 88% im Use-Case empfohlen

Abbildung 27: Graphical-User-Interface in Cameo Systems Modeler (Eigene Darstellung)

6 Validierung durch Fallbeispiele

Die implementierte Entscheidungsmethodik soll anhand von Fallbeispielen genauer vorgestellt werden. Der Begriff Fallbeispiel soll dabei für einen gegebenen Use-Case in Kombination mit einem gegebenen Anforderungsprofil stehen.

Dabei erfolgt zunächst die Vorstellung des Use-Cases. Dieser beschreibt Aspekte des Projektes, welche von den aufgebauten Modellen verwendet werden. In den implementierten Expertenmodellen der Solution-Elements sind die Aspekte die Fügefläche und die Losgröße innerhalb der Produktion. Im Rahmen der Fallbeispiele wurden Modelle für die Produktionszykluszeit, die maximale Kraft, die die Fügefläche leiten kann (Problemstellung (siehe Kapitel 5.1)) und die Kosten pro Fügezone aufgebaut.

Anschließend erfolgt die Vorstellung des Anforderungsprofils. Das Anforderungsprofil beschreibt die Rahmenbedingungen, die innerhalb der gefügten Verbindung, gefordert werden. Die Datenbank stellt dabei ökonomische, ökologische und technologische Rahmenbedingungen der Fügetechnologien in Ausschlussbedingungen, sowie quantitativen- und qualitativen Kriterien bereit. Die Datenbank wurde auf Basis einer Literaturrecherche aufgebaut und ist im Anhang im verwendeten JSON-Format illustriert (siehe Anhang 4). Innerhalb der Fallbeispiele werden die in der JSON-Datenbank beschriebenen Fügetechnologien berücksichtigt. Neben der Fügetechnologie Tailored-Joints wird Kleben (Epoxidharz), Schweißen (WIG), Löten, Nieten und Schrauben berücksichtigt. Mit sechs Fügetechnologien und jeweils drei modellierten quantitativen Kriterien, stellt die Solution-Element Library somit sechs Solution-Elements mit insgesamt 18 Expertenmodellen bereit.

Abschließend wird das Ergebnis der Entscheidungsmethodik des jeweiligen Fallbeispiels gezeigt und genauer analysiert. Die Fügetechnologieauswahlentscheidung der Fallbeispiele soll die Grundlage für eine Diskussion und eine kritische Hinterfragung der Methodik in Kapitel 7 ermöglichen.

6.1 Dachträger

Im Rahmen der Forschung des Projektes Tailored-Joints wurde ein Fallbeispiel als Anwendungsfall für die Fügetechnologie Tailored-Joints (Moers 2021) vorgestellt. Dabei handelt es sich um einen Dachträger für ein Personenkraftwagen, welcher beispielsweise für den Transport von Fahrrädern notwendig ist. (Siehe Abbildung 29)

Im Folgenden werden zunächst die für den Use-Case notwendigen Parameter begründet ausgewählt. Anschließend wird der Belastungsfall des Dachträgers beschrieben und vereinfacht. Dieser ist ein Bestandteil des Anforderungsprofils. Die übrigen Kriterien des Anforderungsprofils werden in einer Tabelle zusammengefasst dargestellt.

Die Fügefläche als ein Parameter des Use-Cases ergibt sich durch die Geometrie der Konstruktion. In Abbildung 29 ist diese in einer technischen Zeichnung veranschaulicht. Die Anzahl der zu fügenden Bauteile (Batchsize) der Produktion wird aufgrund der Größe der Automobilindustrie und den damit verbundenen hohen Losgrößen auf 100000 geschätzt.

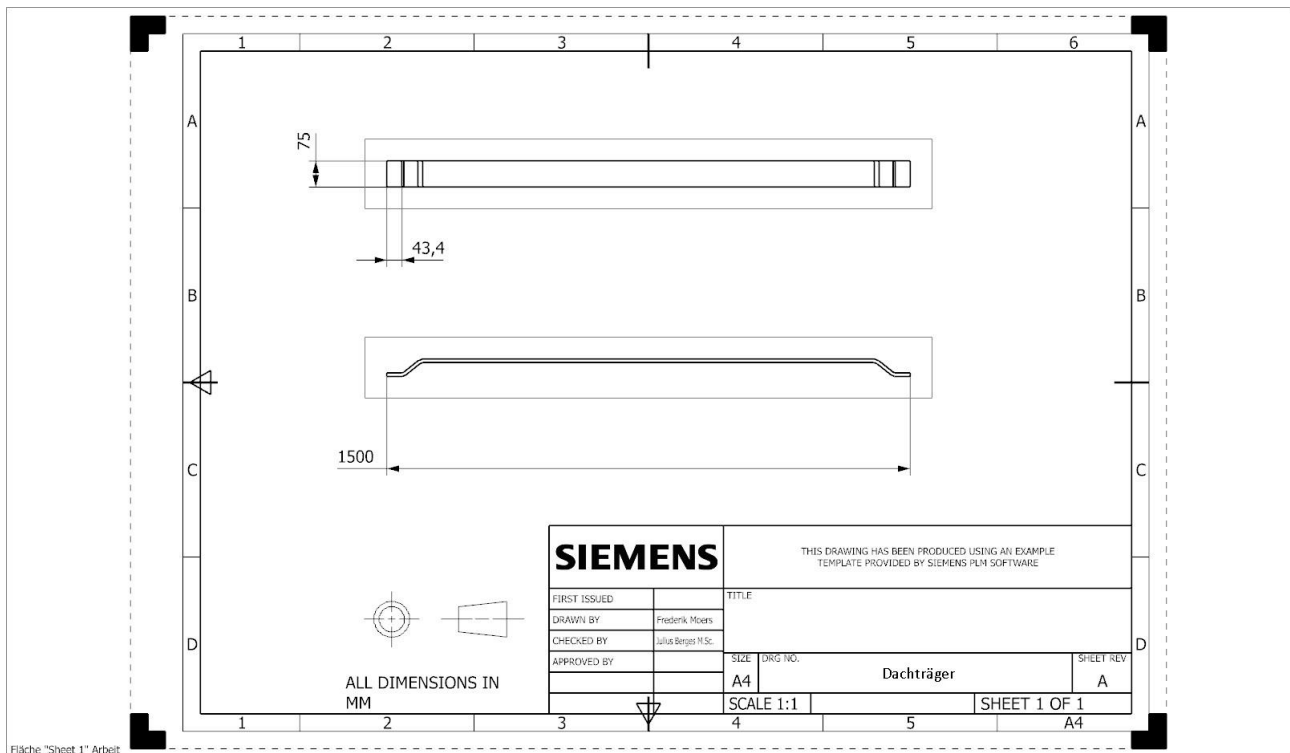


Abbildung 28: Technische Zeichnung des Dachträgers in Anlehnung an die Konstruktion von Moers, Frederik in SiemensNX (Eigene Darstellung)

Der Dachträger besteht aus Kunststoff und soll an eine Metalloberfläche eines Autos gefügt werden. Eine Simulation mit der Software Abaqus berechnet im Use-Case die maximal auftretende Kraft an den Fügeflächen bei einer gleichmäßigen Belastung, welche von oben auf den Dachträger einwirkt. Im Folgenden soll der Belastungsfall vereinfacht werden um ihn für eine analytische Betrachtung zugänglich zu machen. Der Dachträger wird dabei als starrer Balken angenommen, welcher mit einer gleichmäßigen Linienbelastung q_0 belastet wird. In Abbildung 30 ist dieser Belastungsfall illustriert.

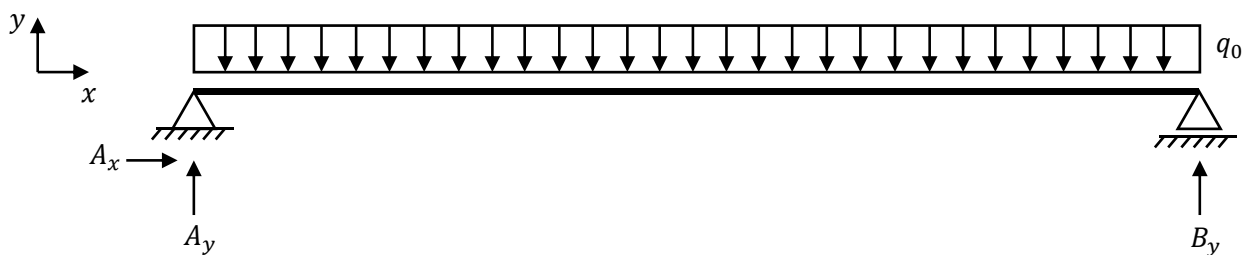


Abbildung 29: Vereinfachter Belastungsfall des Dachträgers (Eigene Darstellung)

Aufgrund der Gleichmäßigkeit im Belastungsfall kann der Belastungsfall auf eine in der Mitte des Dachträgers einwirkende Gesamtkraft reduziert werden. Es wird angenommen, dass Schnee in einer Höhe von 100mm gleichmäßig auf dem Dachträger verteilt liegt. Unter der weiteren Annahme der Dichte $0,2g/cm^3$, ergibt sich die auf den Dachträger einwirkende Kraft F_{ges} durch das Produkt der Dichte ρ , dem Gesamtvolumen V und der Erdbeschleunigung g . (21)

$$F_{ges} = (\rho * V) * g \quad (21)$$

Die Belastung der Fläche lässt sich bei zwei Verbindungsflächen durch die Division der einwirkenden Gesamtkraft durch den Faktor zwei berechnen (22).

$$A_y = \frac{F_{ges}}{2} \quad (22)$$

Die Gesamtkraft einer Fügefläche ergibt sich damit zu $A_y = 11,03$ N. Neben der Einwirkenden Kraft A_y als Belastungsfall, ist das Anforderungsprofil durch weitere Kriterien beschrieben. In Tabelle 10 zeigt das Anforderungsprofil des Fallbeispiels kompakt. Eine vollständige Tabelle mit Begründungen zur Auswahl der Anforderungen ist in Anhang 1 gezeigt. (siehe Tabelle 16)

Kategorie	Kriterium	Anforderung	Kategorie	Kriterium	Anforderung
Ausschlusskriterium	Reine Metall-Verbindung	Nein	Quantitatives Kriterium	Kosten	1 €/Fügezone
Ausschlusskriterium	Verbindung mit Kunststoffteil	Ja	Qualitatives Kriterium	Dynamische Beanspruchbarkeit	Normal
Ausschlusskriterium	Nachbearbeitung hinnehmbar	Ja	Qualitatives Kriterium	Umweltfreundlichkeit	Wichtig
Ausschlusskriterium	Einseitige Montierbarkeit	Nein	Qualitatives Kriterium	Automatisierbarkeit	Wichtig
Ausschlusskriterium	Lösbare Verbindung	Nein	Qualitatives Kriterium	Gewicht	Wichtig
Ausschlusskriterium	Fügefläche (Flächig, Linie, Punkt)	Flächig	Qualitatives Kriterium	Temperaturbeständigkeit	Wichtig
Qualitatives Kriterium	Taktzeit	15 s	Qualitatives Kriterium	Niedrige Sicherheitsvorkehrungen	Weniger Wichtig
Quantitatives Kriterium	Maximale Kraft der Fügefläche	11 N			

Tabelle 10: Anforderungsprofil des Use-Case Dachträger (Eigene Darstellung)

Der Use-Case und das Anforderungsprofil sind mit den gegebenen Informationen beschrieben. Die Expertenmodelle, welche mit den im Use-Case übergebenen Parametern und internen statischen Modellparametern quantitative Abschätzungen berechnen, unterliegen im vorliegenden Fallbeispiel verschiedenen Unsicherheiten. Dabei sind in den Expertenmodelle der Fügetechnologie verschiedene statistische und informationsbezogene Unsicherheiten (siehe Kapitel 5.2.1 und Kapitel 5.2.2) modelliert. Ein Beispiel ist die Annahme, dass die Anschaffungskosten der Produktionsmaschinen als Parameter für die Berechnung der Kosten pro Fügefläche nur in einem Intervall abgeschätzt werden kann. Die Unsicherheitsabschätzungen innerhalb dieses Fallbeispiels ist folglich nur mit internen Modellparametern getroffen wurden. Eine Angabe der Fügefläche oder der Losgröße in einem unsicheren Intervall als von dem Benutzer übergebenen Modellparameter ist ebenfalls möglich, aber in diesem Fallbeispiel nicht angewandt.

Innerhalb des Entscheidungsalgorithmus werden zunächst Ausschlusskriterien überprüft (Siehe Abbildung 14). Ist ein Ausschlusskriterium durch eine Fügetechnologie nicht erfüllt, wird diese aussortiert. Im gegebenen Use-Case ist das Ausschlusskriterium „Kunststoff-Metall-Verbindung“

entscheidend. Die Bedingung einer Kunststoff-Metall Verbindung wird in der Datenbank nur von den Fügetechnologien Kleben (Epoxidharz) und Tailored-Joints erfüllt. Durch neuere Schweißverfahren wie dem thermischen Direktfügen kann unter gegebenen Bindungen auch mit der Fügetechnologie „Schweißen“ eine Verbindung realisiert werden. Bei projektinterner Möglichkeit einer solchen Verbindung kann folglich die Angabe in der Datenbank angepasst werden. Im gegebenen Fallbeispiel wird Schweißen in klassischer Form (WIG-Schweißen) angenommen und somit für den Use-Case ausgeschlossen. Tabelle 11 fasst das Ausschlusskriterium bezogen auf die verfügbaren Fügetechnologien zusammen.

Fügetechnologie	Verbindung mit Kunststoffteil
Kleber (Epoxidharz)	Ja
Schweißen (WIG)	Begrenzt (Nein)
Löten	Nein
Schrauben	Nein
Tailored-Joints	Ja
Nieten	Nein

Tabelle 11: Ausschluss verschiedener Fügetechnologien beim Use-Case Dachträger (Eigene Darstellung)

Die Fügetechnologien Kleben (Epoxidharz) und Tailored-Joints werden anschließend nach quantitativen und qualitativen Anforderungen im gegebenen Use-Case mit dem von Benutzer übergebenen Anforderungsprofil verglichen. Die Entscheidung wird anschließend in die grafische Benutzeroberfläche in Cameo Systems Modeler zurückgegeben. Zusätzlich zu der Entscheidung werden Informationen über einzelne nicht erfüllte Kriterien übergeben. Im Folgenden sollen die Informationen kompakt in einer Tabelle dargestellt werden (siehe Tabelle 12). Der vollständige Auszug ist im Anhang zu finden. (siehe Anhang 1)

Kriterium	Kleben (Epoxidharz)	Tailored-Joints
Umweltbedingungen (Qualitatives Kriterium)	Nicht erfüllt	
Produktionszykluszeit (Quantitatives Kriterium)		Nicht erfüllt (<33,33%)
Kosten (Quantitatives Kriterium)		Erfüllt zu einer Wahrscheinlichkeit von 50,64%

Tabelle 12: Anforderungserfüllung ausgewählter Kriterien der Fügetechnologien Kleben (Epoxidharz) und Tailored-Joints im Use-Case Dachträger (Eigene Darstellung)

In Bezug auf nicht erfüllte Anforderungen kann das Kleben mit Epoxidharz den geforderten Umweltbedingungen nicht gerecht werden. Die Umweltbedingungen wurden aufgrund des Umstandes, dass Epoxidharz nur schwierig recyclebar ist, als schlecht eingestuft.

Die Fügetechnologie Tailored-Joints kann die geforderte Produktionszykluszeit nicht und die geforderten Kostenbedingungen nur zu einer Wahrscheinlichkeit von 50% erfüllen. Die Kosten sind in neuartigen und nicht industrialisierten Fügetechnologien nur unscharf einschätzbar, weswegen der normalverteilte Parameter der Kosten von Tailored-Joints eine hohe Standardabweichung hat. Innerhalb des bisherigen Modells der Produktionszykluszeit von Tailored-Joints ist eine Berücksichtigung der Produktionszeit des zu fügenden Kunststoffparts der Verbindung ebenfalls modelliert. Dadurch entstehen längere Produktionszeiten und eine Vergleichbarkeit des Aspektes mit Kleben (Epoxidharz) ist nur bedingt gegeben.

Insgesamt ist die berechnete Gesamterfüllung der Fügetechnologie Tailored-Joints 83,40%, während Kleben (Epoxidharz) mit 96,28% Gesamterfüllung das gegebene Anforderungsprofil erfüllt und somit ausgewählt wird.

6.2 Fahrradlenker

Fahrradlenker sind ein elementarer Bestandteil jedes Fahrrads. Klassischerweise werden Sie als separate Bauteile produziert und anschließend durch Verbindungstechnik an den Fahrradrahmen gefügt. Die open-source Software GrabCAD stellt einen beispielhaften Fahrradlenker mit zugehörigem Verbindungsteil als CAD-Konstruktion zur Verfügung. In Abbildung 31 ist eine technische Zeichnung der Konstruktion gegeben.

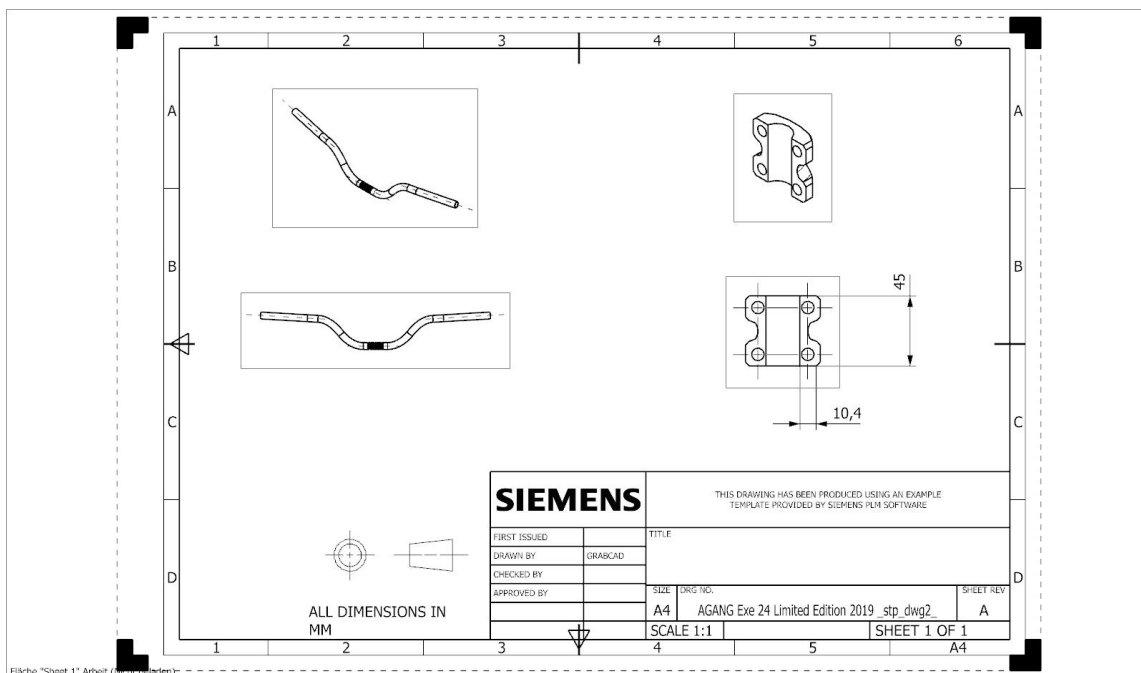


Abbildung 30: Technische Zeichnung eines Fahrradlenkers in Anlehnung an eine open-source Konstruktion von GrabCAD (Eigene Darstellung)

Im Folgenden werden zunächst die für den Use-Case notwendigen Parameter begründet ausgewählt. Anschließend wird der Belastungsfall des Fahrrads beschrieben. Dieser ist ein Bestandteil des Anforderungsprofils. Die übrigen Kriterien des Anforderungsprofils werden in einer Tabelle zusammengefasst dargestellt.

Die Verbindung wird mit zwei Flanschhälften realisiert. Eine Flanschhälfte ist dabei fest mit dem Rahmen verbunden und wird durch eine ebene Fügefläche an die andere Flanschhälfte gefügt. Diese ist fest mit dem Fahrradlenker verbunden und eine Verbindung des Lenkers mit dem Rahmen ist somit realisiert. Im Folgenden wird die Geometrie der Fügefläche auf eine quadratische Fläche ohne Kerben mit den in der Abbildung gezeigten Maßen vereinfacht. (Siehe Abbildung 31)

Mit den vereinfachten Maßen der technischen Zeichnung ergibt sich die Geometrie der Fügefläche $A = 416\text{mm}^2$. Die Geometrie ergibt mit der Losgröße der Produktion die notwendigen Parameter für die Expertenmodelle. Bedingt durch eine kleinere Losgröße in der Fahrradproduktion wird eine Batchsize von 500 gewählt.

Im Anforderungsprofil wird angenommen, dass eine Normalkraft $F_{ges} = 0.2kN$ senkrecht auf die Fläche von dem Rahmen in Richtung des Lenkers wirkt. Diese kann beispielsweise durch eine Stoßbelastung des Rahmens auftreten. Die übrigen Anforderungen sind in Tabelle 13 dargestellt.

Kategorie	Kriterium	Anforderung	Kategorie	Kriterium	Anforderung
Ausschluss-kriterium	Reine Metall- verbindung	Ja	Quantitatives Kriterium	Kosten	2 €/Fügezone
Ausschluss-kriterium	Verbindung mit Kunststoffteil	Nein	Qualitatives Kriterium	Dynamische Beanspruchbarkeit	Wichtig
Ausschluss-kriterium	Nachbearbeit- ung hinnehmbar	Nein	Quantitatives Kriterium	Umweltfreundlichkeit	Weniger wichtig
Ausschluss-kriterium	Einseitige Montierbarkeit	Nein	Quantitatives Kriterium	Automatisierbarkeit	Weniger wichtig
Ausschluss-kriterium	Lösbare Verbindung	Ja	Quantitatives Kriterium	Gewicht	Wichtig
Ausschluss-kriterium	Fügefläche (Flächig, Linie, Punkt)	Flächig	Quantitatives Kriterium	Temperaturbeständigkeit	Weniger wichtig
Quantitativ-es Kriterium	Taktzeit	60 s	Quantitatives Kriterium	Niedrige Sicherheitsvor- kehrungen	Wichtig
Quantitativ-es Kriterium	Maximale Kraft der Fügefläche	0.2 kN			

Tabelle 13: Anforderungsprofil des Use-Case Fahrradlenker (Eigene Darstellung)

Durch die Ausschlusskriterien des Anforderungsprofils werden einige Fügetechnologie nicht näher betrachtet. Das Kriterium, welches für den Ausschluss vieler Fügetechnologien verantwortlich ist, ist „Lösbare Verbindung“. Dieses kann im Folgenden Beispiel nur von den Fügetechnologien Schrauben und Nieten gewährleistet werden. Die Fügetechnologie Tailored-Joints ermöglicht ebenfalls das Lösen einer Verbindung durch eine Erwärmung des Kunststoffteils. Diese wird jedoch aufgrund des Umstandes, dass es sich im gegebenen Fallbeispiel um eine Metallverbindung handelt, ausgeschlossen. Tabelle 14 illustriert die für den Ausschluss entscheidenden Kriterien.

Fügetechnologie	Lösbare Verbindung	Metallverbindung
Kleber (Epoxidharz)	Nein	Nein
Schweißen (WIG)	Nein	Ja
Löten	Nein	Ja
Schrauben	Ja	Ja
Tailored-Joints	Ja	Nein
Nieten	Ja	Ja

Tabelle 14: Ausschluss verschiedener Fügetechnologien beim Use-Case Fahrradlenker

Die Fügetechnologien Schrauben und Nieten werden von dem Entscheidungsmodell anschließend nach qualitativen und quantitativen Anforderungen im gegebenen Use-Case mit dem in Tabelle 13

illustrierten Anforderungsprofil verglichen. Die nicht erfüllten Kriterien sind in Tabelle 15 kompakt dargestellt. Im Anhang ist die Ausgabe des Use-Cases, welche in der grafischen Oberfläche angezeigt wird, zu finden. (siehe Anhang 1)

Kriterium	Schrauben	Nieten
Gewicht (Qualitatives Kriterium)	Nicht erfüllt	Nicht erfüllt
Dynamische Beanspruchbarkeit (Qualitatives Kriterium)	Nicht erfüllt	Nicht erfüllt
Kosten (Quantitatives Kriterium)	Nicht erfüllt (<33,33%)	Nicht erfüllt (<33,33%)

Tabelle 15: Anforderungserfüllung ausgewählter Kriterien von Schrauben und Nieten im Use-Case Fahrradlenker (Eigene Darstellung)

Die Fügetechnologien können in den gleichen Kriterien die geforderten Anforderungen nicht erfüllen. Die dynamische Beanspruchbarkeit ist aufgrund von Setzeffekten nur bedingt gegeben. Auch Nieten sind häufig nicht für dynamische Beanspruchungen optimal, weswegen innerhalb der Datenbank eine linguistisch schlechtere Bewertung gewählt wurde. Die qualitative Anforderung Gewicht wird von beiden Fügetechnologien ebenfalls nicht erfüllt. Die Spezifikation ist bei den Fügetechnologien Nieten und Schrauben verglichen mit anderen Fügetechnologien eher schlecht, weil die Verbindung nur mit dem Zusatzgewicht der Schraube, beziehungsweise der Niete realisiert werden kann. Dies ist bei der Fügetechnologie Tailored-Joints beispielsweise anders. Das Kriterium Kosten kann aufgrund der niedrigen Stückzahl der Produktion nicht erfüllt werden. Innerhalb der Modellierung der Kosten wird von einer industriellen Produktion mit einer Produktionsmaschine ausgegangen. Dies bedeutet, dass das Kostenmodell Maschinenkosten für eine Nietmaschine, beziehungsweise eine Schraubmaschine und deren Instandhaltung auf die Stückzahl der Produktion überträgt. In der Praxis würde für die Realisierung des Projektes bei einer Losgröße von 500 keine Maschinen benötigen.

Insgesamt ist die berechnete Gesamterfüllung der Fügetechnologie Schrauben und Nieten 77,77% der geforderten Anforderungen. Die gleiche Empfehlung ergibt sich durch den Umstand, dass die qualitativen Spezifikationen der beiden Fügetechnologien das Anforderungsprofil in gleicher Ausprägung erfüllen. Die quantitativen Abschätzungen der Modelle liefern tendenziell durch ihre Stetigkeit unterschiedliche Ergebnisse. Ist jedoch die durch die Modelle abgeschätzte Gauß-Verteilung außerhalb der Anforderungen, ergibt sich eine vollständige Anforderungserfüllung oder die Anforderungen sind sicher nicht erfüllt. Ersteres ergibt sich im gegebenen Fallbeispiel bei der Festigkeitsabschätzung und der Produktionszykluszeit. Letzteres bei der gegebenen Kostenabschätzung.

In der Praxis würde eine Auswahl auf die Fügetechnologie Schrauben treffen. Fahrradlenker sind üblicherweise mit Schrauben an den Rahmen verbunden, da sie sich sehr einfach lösen lassen. Das Lösen einer Nietverbindung ist beispielsweise für den Kunden nur schwer möglich. Die Nietverbindung würde des Weiteren bei dem Lösen wohlmöglich zerstört werden, wodurch eine neue Niete notwendig wäre. Dadurch ergibt sich eine Kritik an den Ausschlusskriterien. Sie können die Unschärfe nicht berücksichtigen und lediglich kategorisiert Fügetechnologien einordnen. Bei der Fragestellung der Lösbarkeit einer Verbindung könnte die Beschreibung ebenfalls als qualitativer Faktor in einem unscharfen linguistischen Spektrum erfolgen.

7 Kritische Hinterfragung und Diskussion der Methodik

Die Methodik wurde vorgestellt, implementiert und an zwei Fallbeispielen validiert. Innerhalb der Fallbeispiele wurden kritische Aspekte kurz erläutert. Ausschlusskriterien können keine Unschärfe berücksichtigen, qualitative Kriterien keine genau auf den Use-Case angepassten Angaben ermöglichen, und Modelle lassen sich bei unterschiedlichem Aufbau nur beschränkt miteinander vergleichen.

Jede Fügetechnologieauswahlentscheidung ist durch den gegebenen Use-Case, sowie dem Anforderungsprofil der Stakeholder eine individuelle Problemstellung. Durch diesen Umstand werden die Stärken und die Kritik hinter der vorgestellten Methodik erkennbar. Angepasst auf die Problemstellung kann die Einordnung von Ausschlusskriterien, qualitativen und quantitativen Faktoren individuell zugeschnitten werden. Neue Kriterien können definiert und integriert werden. Deren Bewertung in der Datenbank kann dabei beliebig angepasst werden. Ist das Kriterium Umweltbedingungen in Bezug auf CO₂-Ausstoß der Fügetechnologien quantifizierbar, kann beispielsweise eine Modellierung innerhalb der Prinziplösungen erfolgen. Zusätzlich kann ein qualitatives Kriterium Umweltbedingung in Bezug auf die Recyclebarkeit der Abfallprodukte bei Lösen der Verbindung eingeführt werden, wenn dies innerhalb des Projektes sinnvoll ist.

Die Kritik bezieht sich dabei auf die Vergleichbarkeit der einzelnen Kriterien. Der Aspekt Umweltbedingungen sollte sich dabei bei den verschiedenen Fügetechnologien entweder auf den gleichen Teilaspekt einer Umweltbedingung (CO₂-Außstoß) beziehen oder eine zusammengefasste Sicht auf den Aspekt richten. Ist die Umweltbedingung des Klebers auf Recyclebarkeit und die einer anderen Fügetechnologie auf deren CO₂-Ausstoß bezogen, ergibt sich ein verzerrtes Bild des Vergleiches. Eine Iteration des Ergebnisses einer Fügetechnologieauswahl kann helfen mögliche nicht sinnvolle Vergleiche aufzudecken. Der Anwender sollte die Entscheidung kritisch hinterfragen und die Begründungen aufmerksam lesen. Dadurch kann die Datenbank angepasst oder die Modellierungen verbessert werden. Abbildung 32 illustriert eine solche Iteration in einem UML-Diagramm.

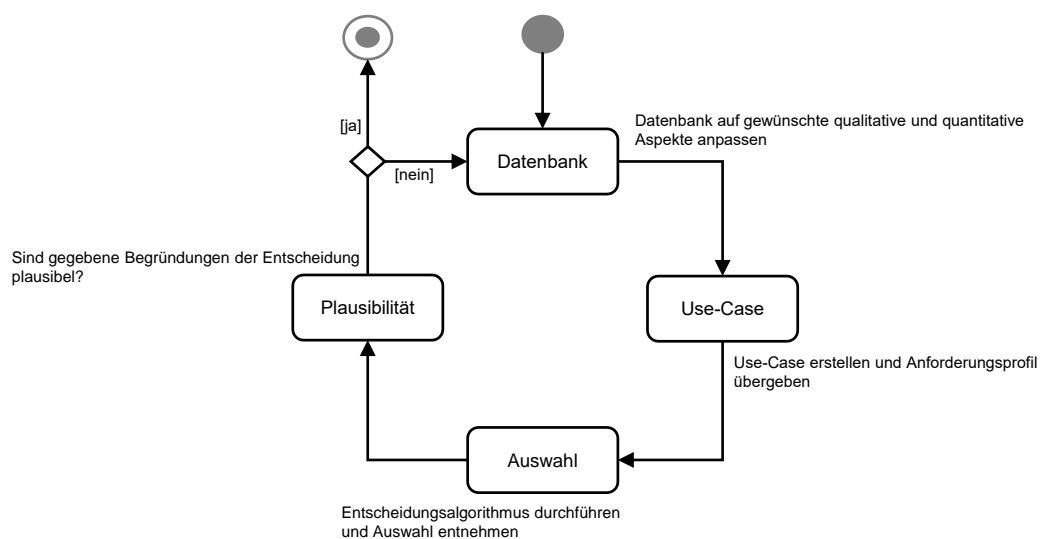


Abbildung 31: Fügetechnologieentscheidung mithilfe der vorgestellten Methodik aus einer iterativen Perspektive nach UML-Notation (Aktivitätsdiagramm) (Eigene Darstellung)

8 Fazit und Ausblick

Die modular aufgebaute Software aus Entscheidungsmodell und Solution-Element Library der Fügetechnologien ist eine Alternative eine Fügetechnologieentscheidung systematisch zu treffen. Es besteht die Möglichkeit quantitative und qualitative Aspekte zu berücksichtigen und verschiedene Unsicherheitsfaktoren innerhalb des Projektes oder der Modellierungen zu integrieren. Die Implementierung in MATLAB, Python und CSM ermöglicht durch eine grafische Oberfläche eine benutzerfreundliche Schnittstelle für den Anwender in der Praxis. Die Güte der Entscheidung ist abhängig von der Genauigkeit der Modelle und der kritischen Hinterfragung der berücksichtigten Faktoren. Die Auswahlentscheidung einer Fügetechnologie ist alternativ zu vorgestellten Ansätzen durch den Aufbau der Modelle und der individuellen Auswahl und Anpassung von Kriterien in der Datenbank abhängig, wodurch sich die beschriebenen Vor- und Nachteile ergeben. (siehe Kapitel 7)

Eine Anpassung kann ebenfalls innerhalb des Algorithmus des Entscheidungsmodells erfolgen. Weitere Funktionen zur Anpassung der Entscheidung, sowie Konventionen, wann ein hinzugefügter Teilalgorithmus in die Entscheidung integriert werden sollte, geben eine Möglichkeit die Methodik weiter zu optimieren. Die Integration von Informationen und Solution Elements neuer Fügetechnologien können dem Anwender die Möglichkeit geben ein breiteres Spektrum an technischen Möglichkeiten wahrzunehmen. Abbildung 33 sind die möglichen Erweiterungen in Anlehnung an Abbildung 25 dargestellt.

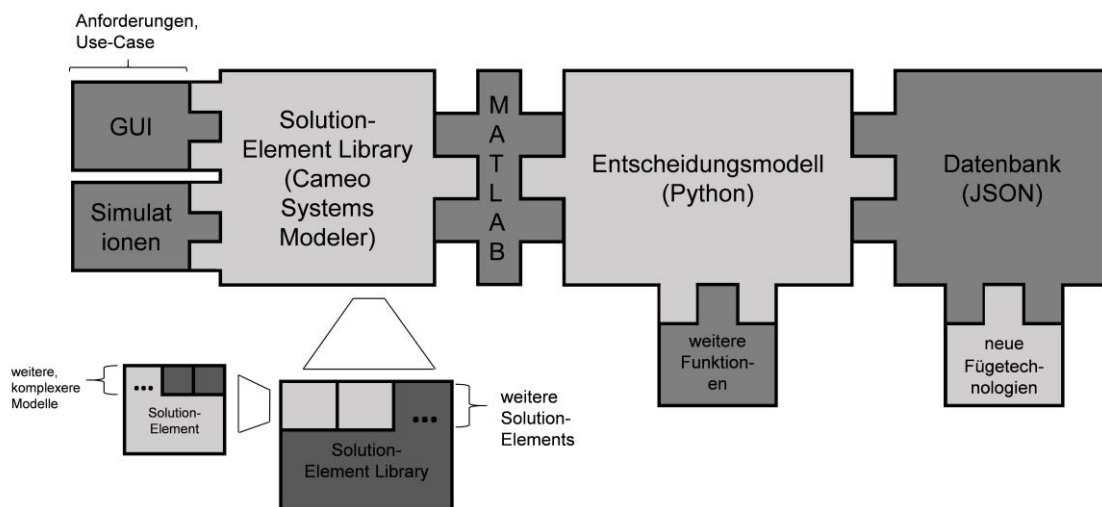


Abbildung 32: Möglichkeiten der Erweiterung des Modularen Aufbaus der Software (Eigene Darstellung)

Aus technischer Perspektive ist die Erweiterung der Unsicherheitsabschätzungen ein zentraler Aspekt. In der Realität ist die getroffene Annahme, dass sich eine Unsicherheitsabschätzung eines Modells nur durch einen statistisch oder einen informationsbezogenen unsicheren Parameter ergibt, nicht genügend.

Durch die Integration einer solchen Erweiterung, sowie weiteren Funktionen, ist die Sicherstellung der Robustheit einer digitalen Fügetechnologieentscheidung ebenfalls entscheidend. Innerhalb der Implementierung des Konzeptes dieser Arbeit sind immer wieder größere Programmfehler aufgetreten. Die in der Entwicklung wachsende Menge an Code in Python, die Datenschnittstelle durch MATLAB, die Interaktion mit JSON und die Integration von Modellen in SysML fordern eine systematische Auseinandersetzung mit der Fragestellung wie Programmcode und Softwarearchitektur robust aufgebaut werden können.

9 Literaturverzeichnis

- Abele, E., und G. Reinhart. *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. 2011.
- Aksoy, Ash, und Nursel Öztürk. „Design of an intelligent decision support system for global outsourcing decisions in the apparel industry.“ *The Journal of The Textile Institute* (Taylor & Francis), 2015: 15.
- Böhm, Wolfgang, Manfred Broy, Maximilian Junker, Andreas Vogelsang, und Sebastian Voss. *Praxisnahe Einführung von Model-based Systems Engineering*. München, Deutschland: fortiss gemeinnützige GmbH, kein Datum.
- Choudry, Saphir A. *Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien*. Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz, 2019.
- Choudry, Saphir A., Jerome Kaspar, Uwe Alber, und Dirk Landgrebe. „Integration of an Assessment Methodology for the Selection of Joining Technologies in Lightweight Engineering.“ *28th CIRP Design Conference*. Nantes, France: Elsevier, 2018. 6.
- Choudry, Saphir A., Steffen Sandmann, und Dirk Landgrebe. „A Methodical Approach for an Economic Assessment of Joining Technologies under Risk - Optimized Decision-making in Automobile Body Development.“ *25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference*. Kopenhagen, Dänemark: Elsevier, 2018. 6.
- Ehrlenspiel, K. *Integrierte Produktentwicklung*. München, 2003.
- Gebreegziabher, Tewodros Gebrerufael, Lihong Qiao, Yifan Qie, und Na Ca. „A Model-based Method for Assisting Decision Making.“ *5th International Conference on Enterprise Systems*. Beijing, China: IEEE explore, 2017. 6.
- Grobshtein, Yariv, Valeriya Perelman, Eliyahu Safra, und Dov Dori. *Systems Modeling Languages: OPM Versus SysML*. Haifa, Israel: Israel institution of Technology,, 2011.
- Jacobs, G. „MBSE - Structure of a system model.“ *ATK-CWD*. Aachen: Center Systems Engineering, 2021. 32.
- Jacobs, Georg, Thilo Zerwas, und Kathrin Spütz. „Mechanical concept development using principle solution models.“ *19th Drive Train Technology Conference*. Aachen, 2021.
- Jürgen Gausemeier, Rinje Brandis, Lydia Kaiser. *Auwahl von Montageverfahren auf Basis der Produktkonzeption*. Paderborn, Deutschland: Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, 2010.
- Kaspar, Jerome, Saphir A. Choudry, und Michael Vielhaber. „Optimized Decision-Making in Joining Selection by Alternative-Based Material and Design-Oriented Changes.“ *26th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference*. West Lafayette, USA: Elsevier, 2019. 6.
- Modecai, Yaniv, und Dov Dori. „Conceptual Modeling of System-Based Decision-Making.“ *INCOSE International Symposium*. Las Vegas, USA, 2014. 17.
- Moers, Frederik. „Dachträger.“ Aachen, 2021.
- Muggeo, Christian, und Dr. Regine Wolters. *Model-based Systems Engineering*. München, Deutschland: CONTACT Software GmbH, kein Datum.
- Müller, Steffen, Uwe Alber, Frank Riedel, Dirk Landgrebe, und Saphir A. Choudry. „A Multidimensional Assessment and Selection Methodology: Optimized Decision-making of

Joining Technologies in Automotive Body Development.“ *15th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. Haifa, Israel: Elsevier B.V., 2018. 9.

Nitzsch, Dr. Rüdiger von. *Entscheidungslehre*. Aachen: Verlagshaus Mainz GmbH , 2017.

OMG Systems Modeling Language. OMG Systems Modeling Language Publication, 2017.

Prüß, Hauke, Carsten Stechert, und Thomas Vietor. „Methodik zur Auswahl von Fügetechnologien in Multimaterialsystemen.“ *DfX-Symposium*. Hamburg, Deutschland, 2010. 13.

—. „Methodik zur Auswahl von Fügetechnologien in Multimaterialsystemen.“ *DfX-Symposium*. Hamburg, Deutschland, 2010. 6.

Riedel, Frank. „Selection of joining technologies for the car body manufacturing depending on energy and resource efficiency.“ *Automotive Engineering Congress*. Nürnberg, Deutschland : Fraunhofer IWU, 2013. 25.

Russell, Mike. „Using MBSE to Enhance System Design Decision Making.“ *Conference on Systems Engineering Research (CSER)*. St. Louis, USA: Elsevier, 2012. 6.

Saphir A. Choudry, Jerome Kaspar, Ferdinand Greinacher, Michael Vielhaber. „A Prediction-Model for an Improved Decision-making of Joining Technologies in the Early Stage of Automobile Body Development.“ *26th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference*. West Lafayette, USA: Elsevier, 2019. 5.

Anhang 1 Anforderungsprofil und FügeTechnologieauswahl der Fallbeispiele in der Benutzerschnittstelle in Cameo Systems Modeler

Abbildung 33: Grafische Benutzerschnittstelle in Cameo Systems Modeler zur Übergabe des Use-Cases und Anforderungsprofil

Kategorie	Kriterium	Anforderung	Begründung	Kategorie	Kriterium	Anforderung	Begründung
Ausschluss-kriterien	Reine Metallverbindung	Nein	/	Quantitatives Kriterium	Kosten	1 €/Fügezone	/
Ausschluss-kriterien	Verbindung mit Kunststoffteil	Ja	Dachträger aus Kunststoff	Qualitatives Kriterium	Dynamische Beanspruchbarkeit	Normal	Schwingungen bei Fahrt
Ausschluss-kriterien	Nachbearbeitung hinnehmbar	Ja	Hohe Batchsize: Nachbearbeitung bei Automatisierung hinnehmbar	Qualitatives Kriterium	Umweltfreundlichkeit	Wichtig	Nachhaltigkeit bei hoher Losgröße relevant
Ausschluss-kriterien	Einseitige Montierbarkeit	Nein	Zugänglichkeit nur einseitig gewährleistet: Dachträger wird auf das Autodach gefügt	Qualitatives Kriterium	Automatisierbarkeit	Wichtig	Hohe Losgröße
Ausschluss-kriterien	Lösbare Verbindung	Nein	Dachträger fest am Auto	Qualitatives Kriterium	Gewicht	Wichtig	Leichtbaukonstruktion
Ausschluss-kriterien	Fügefläche (Fläche, Linie, Punkt)	Fläche	siehe Technische Zeichnung (Abb 28)	Qualitatives Kriterium	Temperaturbeständigkeit	Wichtig	Temperaturbeständigkeit bei Automobilkomponenten gefordert
Quantitatives Kriterium	Taktzeit	15 s	Schnelle Taktzeit für Losgröße sinnvoll	Qualitatives Kriterium	Niedrige Sicherheitsvorkehrungen	Normal	Arbeitsschutzmaßnahmen bei hoher Losgröße finanziell hinnehmbar

Quantitatives Kriterium	Maximale Kraft der Fügefläche	11 N	Belastungsfall
-------------------------	-------------------------------	------	----------------

Tabelle 16: Anforderungsprofil des Fallbeispiels Dachträger (Eigene Darstellung)

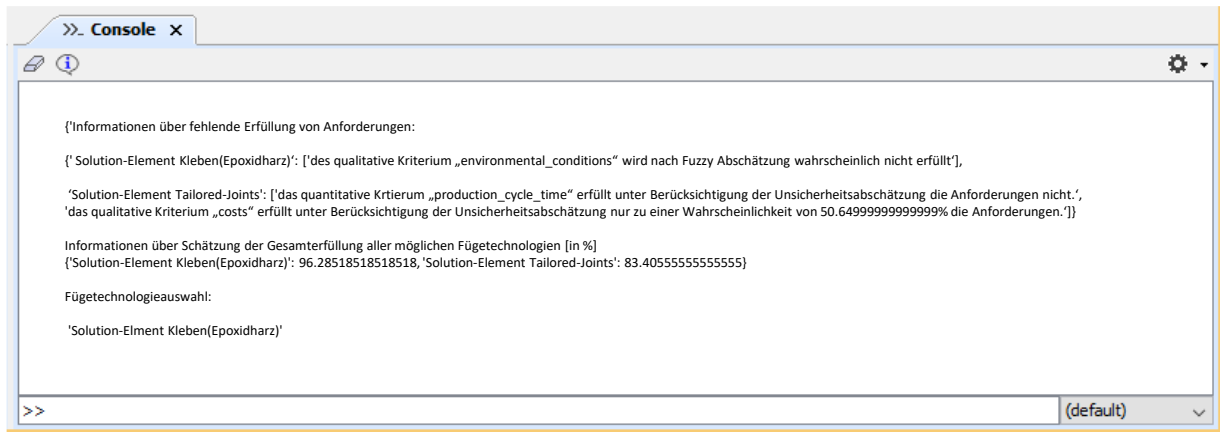


Abbildung 34: Konsolenausgabe des Fallbeispiels Dachträger in Cameo System Modeler

Kategorie	Kriterium	Anforderung	Begründung	Kategorie	Kriterium	Anforderung	Begründung
Ausschluss-kriterium	Reine Metallverbindung	Ja	Lenker und Rahmen aus Aluminium	Quantitatives Kriterium	Kosten	2 €/Fügezone	/
Ausschluss-kriterium	Verbindung mit Kunststoffteil	Nein	/	Qualitatives Kriterium	Dynamische Beanspruchbarkeit	Wichtig	Schwinungen bei Fahrt
Ausschluss-kriterium	Nachbearbeitung hinnehmbar	Nein	Geringe Batchsize: Nachbearbeitung zu aufwendig	Qualitatives Kriterium	Umweltfreundlichkeit	Weniger Wichtig	Geringe Stückzahl
Ausschluss-kriterium	Einseitige Montierbarkeit	Nein	Fahrradlenker gut zugänglich	Qualitatives Kriterium	Automatisierbarkeit	Weniger Wichtig	Geringe Stückzahl
Ausschluss-kriterium	Lösbare Verbindung	Ja	Zugänglichkeit des Lenkers gewährleistet	Qualitatives Kriterium	Gewicht	Wichtig	Leichtbaukonstruktion
Ausschluss-kriterium	Fügefläche(Flächig, Linie, Punkt)	Flächig	Technische Zeichnung (Abb 30)	Qualitatives Kriterium	Temperaturbeständigkeit	Weniger Wichtig	Temperaturbeständigkeit bei Fahrrädern nicht zwingend
Quantitatives Kriterium	Taktzeit	60 s	Keine schnelle Taktzeit notwendig	Qualitatives Kriterium	Niedrige Sicherheitsvorkehrungen	Wichtig	Aufgrund geringer Stückzahl ist eine Fügetechnologie mit gering
Quantitatives Kriterium	Maximale Kraft der Fügefläche	0.2 kN	Belastungsfall				

Tabelle 17: Anforderungsprofil des Fallbeispiels Fahrradlenker (Eigene Darstellung)

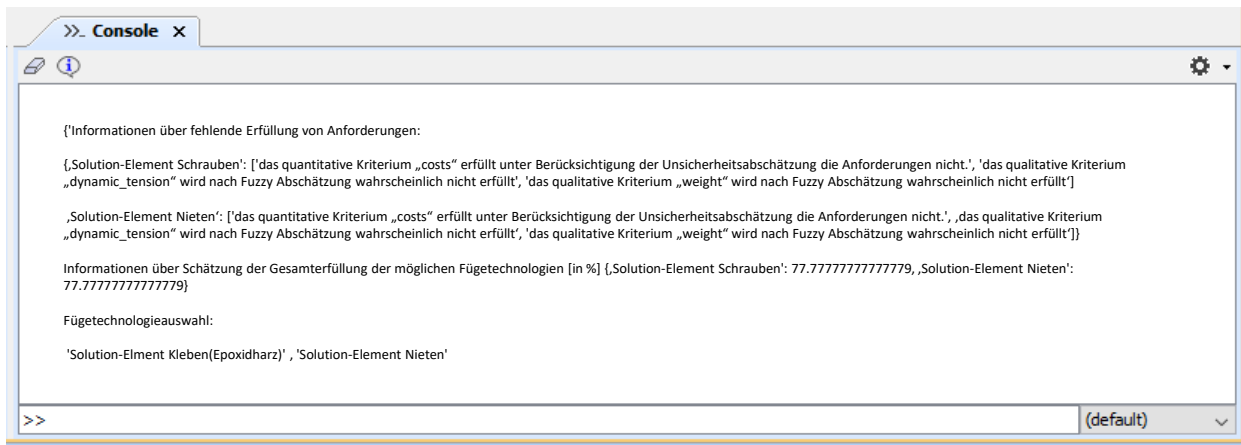


Abbildung 35: Konsolenausgabe des Fallbeispiels Fahrradlenker in Cameo Systems Modeler

Anhang 2 Ausschnitte aus der Struktur der Solution-Element Library und der Modellierung von Expertenmodellen

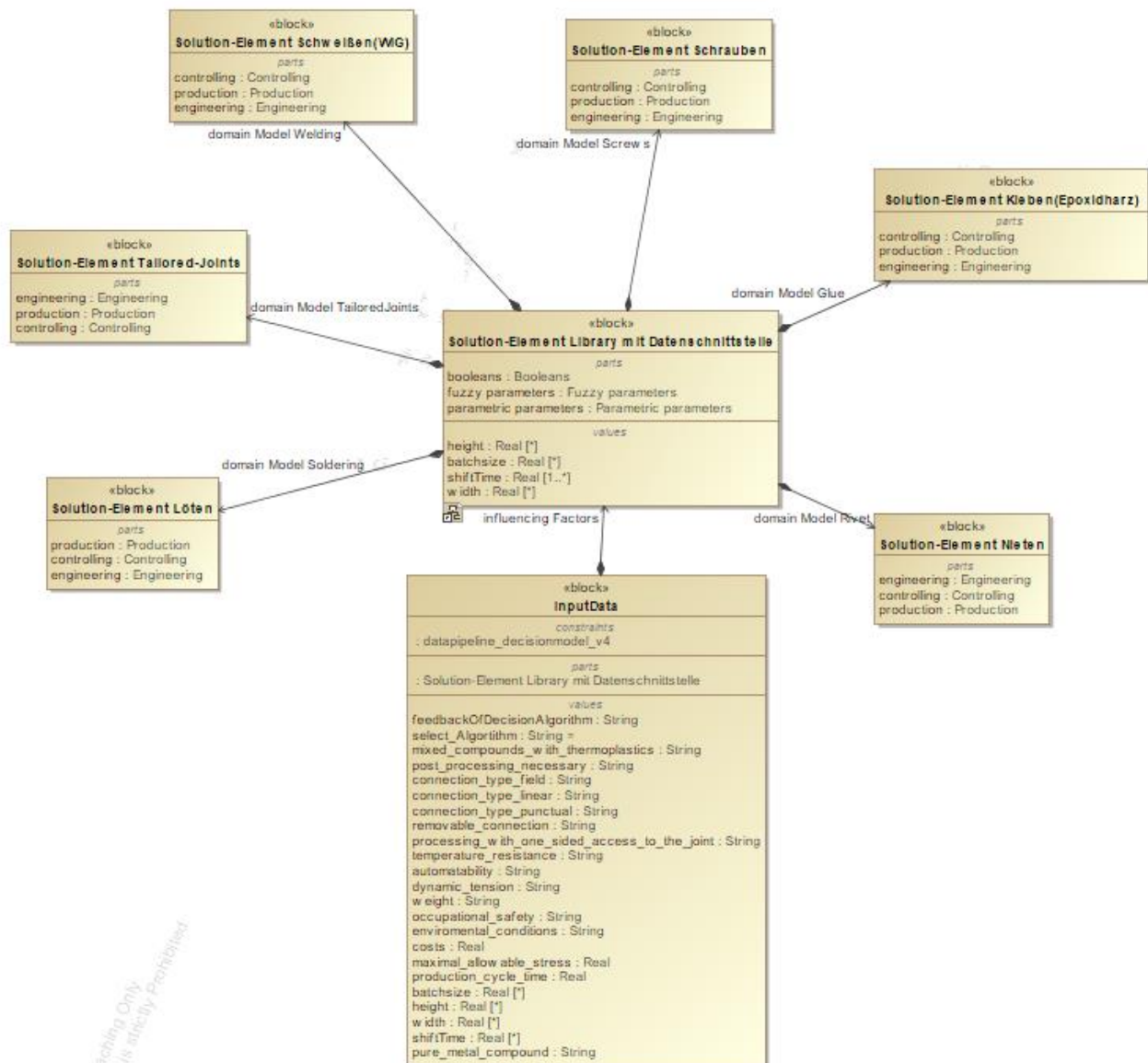


Abbildung 36: Struktur der Solution-Element Library als Block Definition Diagram in Cameo Systems Modeler

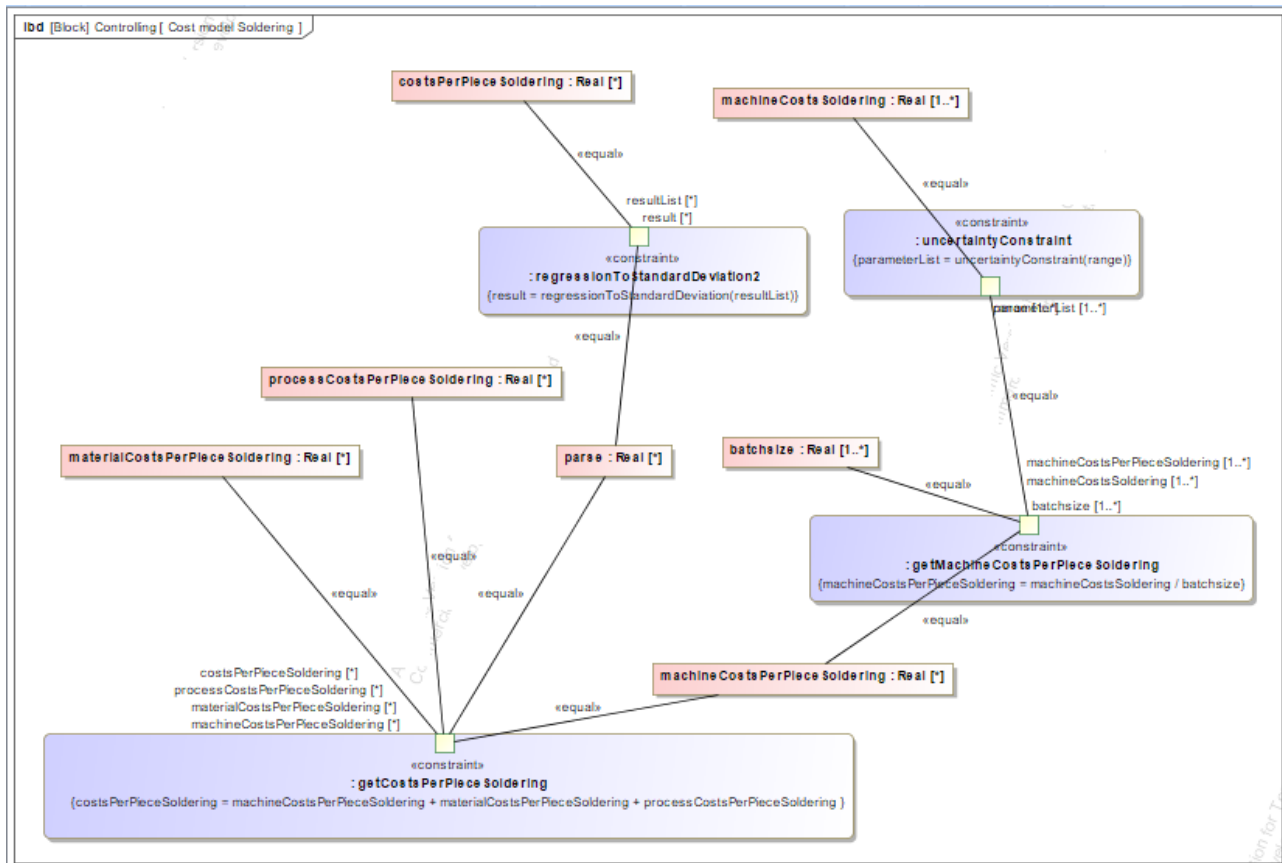


Abbildung 37: Expertenmodell (Kostenmodell des Solution-Elements Schweißen (WIG) mit Maschinenanschaffungskosten als unsicheren Parameter und Losgröße als Eingangsgröße des Use-Case) als Parametric Diagram in Cameo Systems Modeler

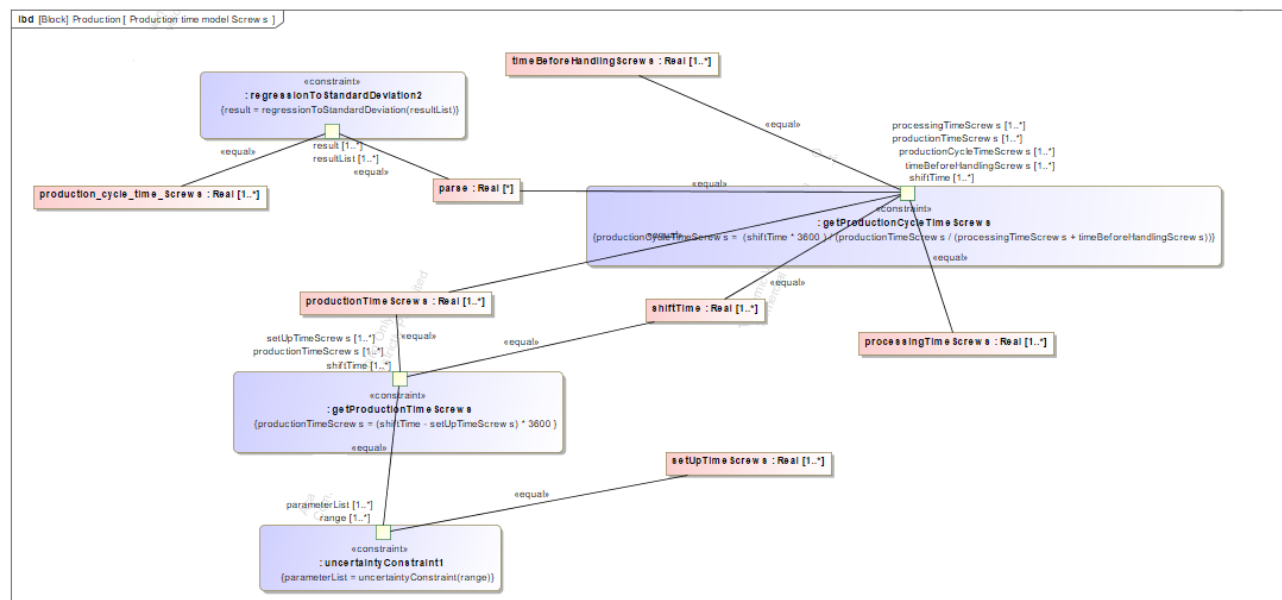


Abbildung 38: Expertenmodell (Produktionszykluszeitmodell des Solution-Elements Schrauben mit Produktionsanlaufzeit als unsicheren Parameter ohne spezifischen Eingang aus dem Use-Case) als Parametric Diagram in Cameo System Modeler

Anhang 3 Ausschnitte aus der Softwarearchitektur und dem Programmcode des Entscheidungsmodells in Python

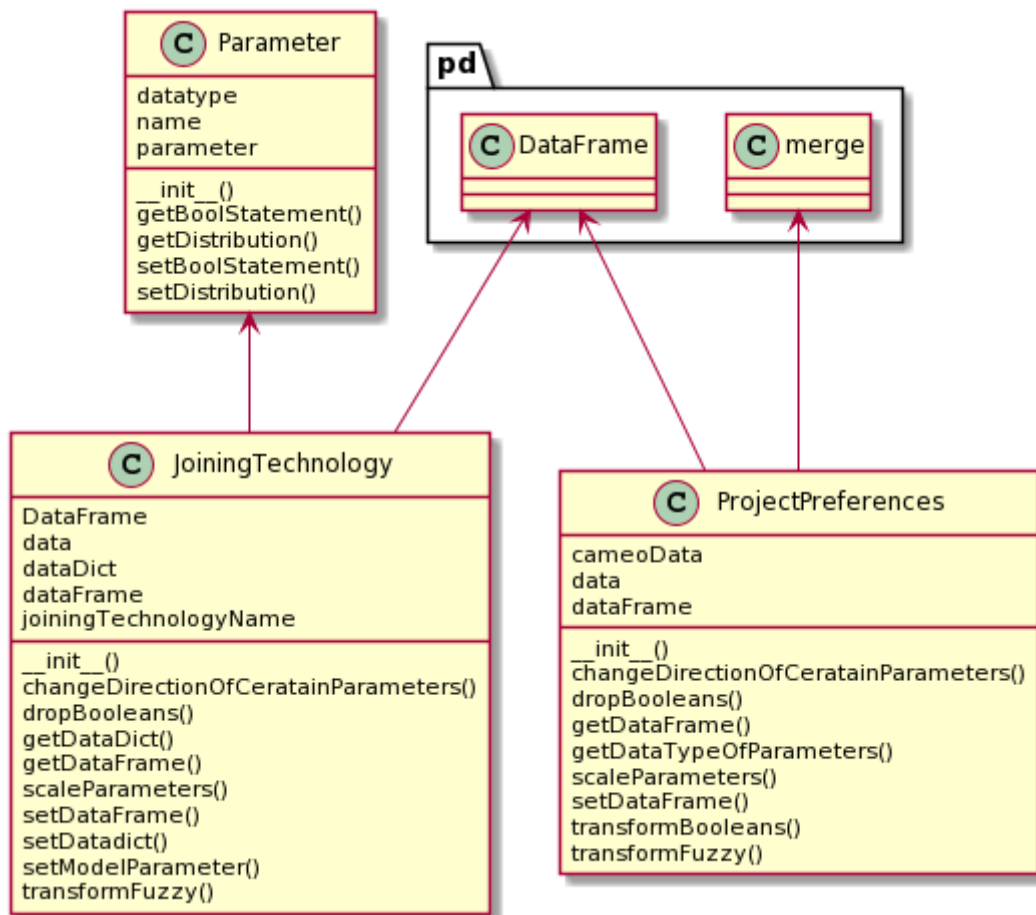


Abbildung 39: Klassenstruktur der Python Datei `Classes.py` in einem UML-Klassendiagramm in PlantUML

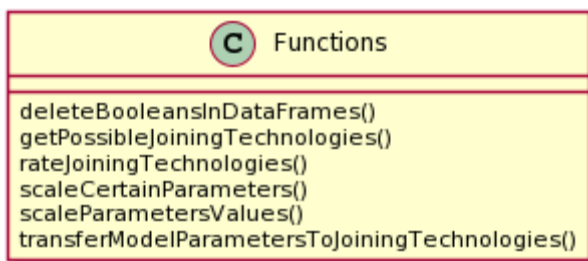


Abbildung 40: Funktionen der Python Datei `Functions.py` in einem UML-Klassendiagramm in PlantUML

```

16 class JoiningTechnology:
17
18
19     def __init__(self, name, data):
20
21         self.name = name
22         self.data = data
23
24         self.setDataFrame()
25         self.transformFuzzy()
26         self.setData()
27
28
29     def setDataFrame(self):
30
31         #Method to create dataframe from the given data
32
33         joiningTechnologies = self.data["joiningTechnologies"]
34         dfObj = pd.DataFrame(columns=['datatype', 'parameter', 'value'])
35
36         for i, category in enumerate (joiningTechnologies[self.name].keys()):
37
38             if i != 0:
39                 categorydict = joiningTechnologies[self.name][category]
40                 df = pd.DataFrame(list(categorydict.items()), columns = ['parameter', 'value'])
41                 datatype = [category for i in range(df.shape[0])]
42                 df['datatype'] = datatype
43                 dfObj = dfObj.append([df], sort=False)
44
45         self.dataFrame=dfObj
46
47         return

```

Abbildung 41: Ausschnitt des Programmcodes der Python Datei Classes.py in der Entwicklungsumgebung Spyder3 (Klasse JoiningTechnology mit Konstruktor und Methode zur Initialisierung der Datenbank in JSON)

```

14 def transferModelParametersToJoiningTechnologies(models, joiningTechnologiesDict):
15
16     for key, value in models.items():
17         joiningTechnologyOfModel = key.split("%")[0]
18         parameterOfModel = key.split("%")[1]
19         valueOfModel = value
20
21         if joiningTechnologyOfModel in joiningTechnologiesDict.keys():
22             joiningTechnologiesDict[joiningTechnologyOfModel].setModelParameter(parameterOfModel, valueOfModel)
23
24         else:
25             continue
26
27     return

```

Abbildung 42: Ausschnitt des Programmcodes der Python Datei Functions.py in der Entwicklungsumgebung Spyder3 (Funktion zur Übergabe der Expertenmodelle der Solution-Elements an die Instanzen der Fügetechnologien)

```

155 '''Decision algorithm design'''
156
157
158 joiningTechnologiesDict = Functions.getPossibleJoiningTechnologies(joiningTechnologiesList, joiningTechnologiesDict, projectPreferences)
159
160 Functions.deleteBooleansInDataFrames(joiningTechnologiesDict, projectPreferences)
161
162 Functions.transferModelParametersToJoiningTechnologies(models, joiningTechnologiesDict)
163
164 Functions.scaleParametersValues(joiningTechnologiesDict, projectPreferences)
165
166 Functions.scaleCertainParameters(joiningTechnologiesDict)
167
168 joiningTechnologiesRating, joiningTechnologiesInformation = Functions.rateJoiningTechnologies(joiningTechnologiesDict, projectPreferences, selectInformation)

```

Abbildung 43: Ausschnitt des Programmcodes der Python Datei Main.py in der Entwicklungsumgebung Spyder3 (Auswahl des Ablaufes des Entscheidungsalgorithmus)

Anhang 4 Fügetechnologiespezifikationen der ausgewählten Fügetechnologien in JSON

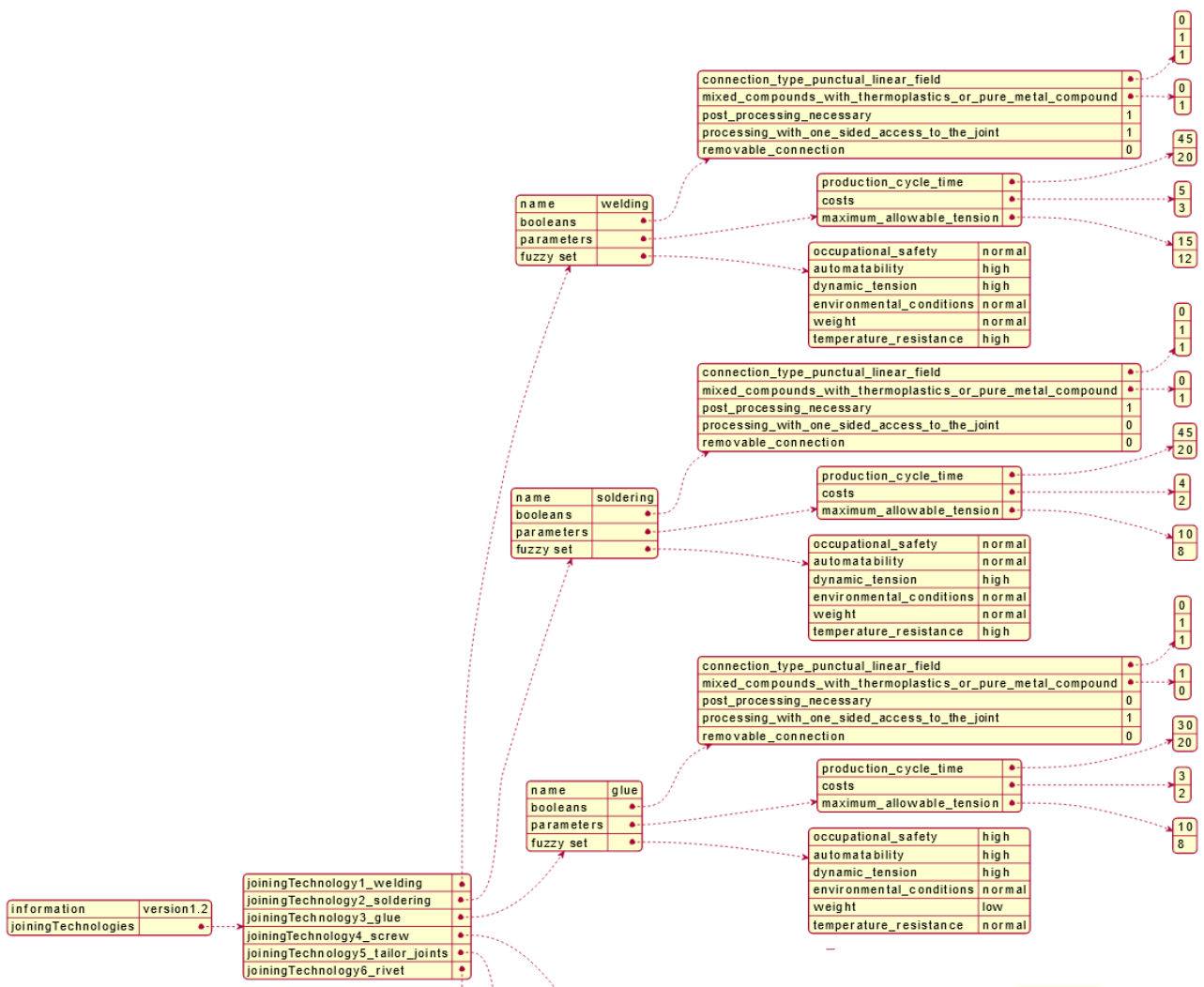


Abbildung 44: Fügetechnologiespezifikationen der Fügetechnologien Schweißen(WIG), Löten und Kleben(Epoxidharz) als JSON-Strukturdiagramm in PlantUML (Ausschlusskriterien=booleans,, Quantitative Kriterien=parameters, , Qualitative Kriterien=fuzzy set)

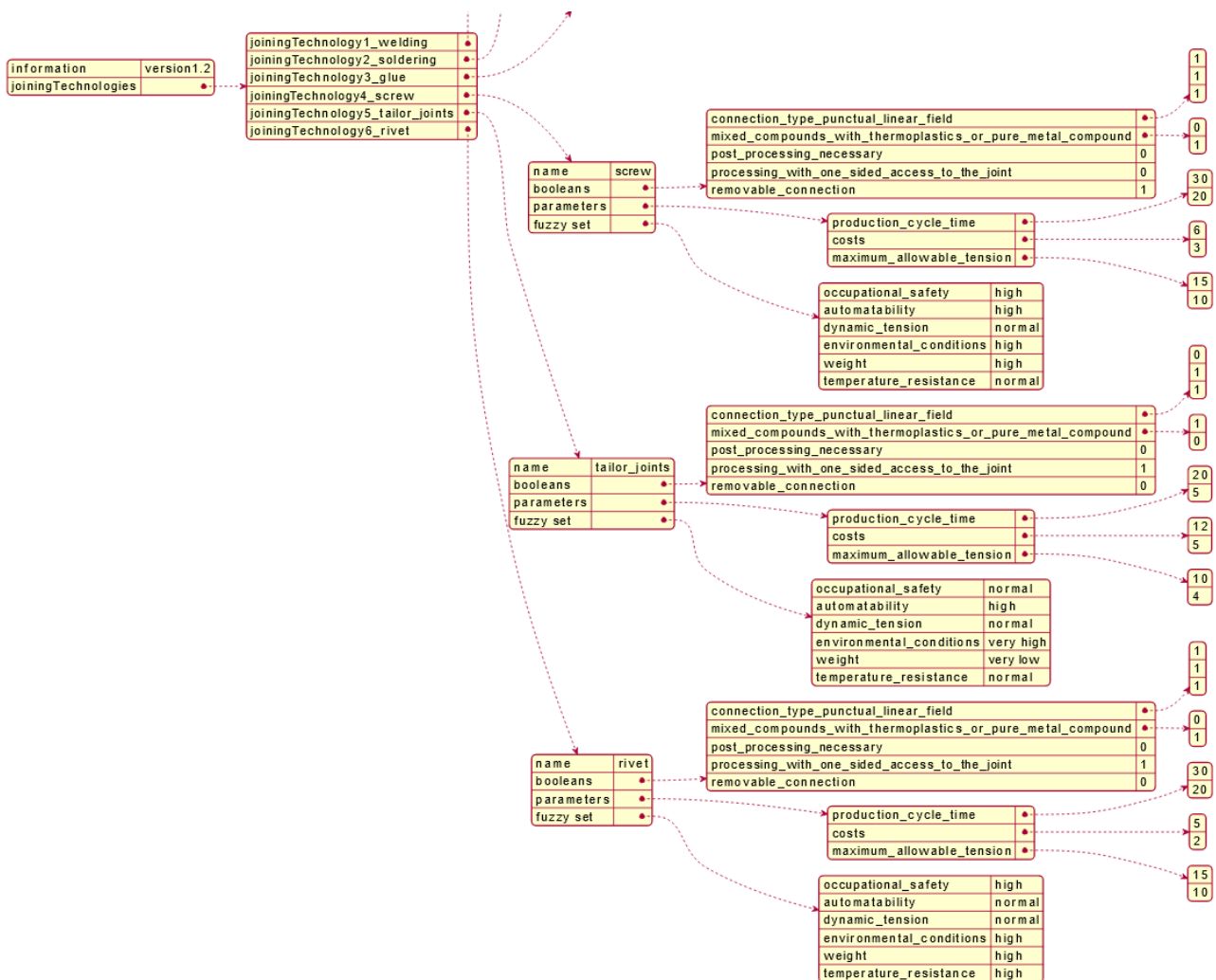


Abbildung 45: Fügetechnologiespezifikationen der Fügetechnologien Tailored-Joints, Schrauben und Nieten als JSON-Strukturdiagramm in PlantUML (Ausschlusskriterien=booleans, Quantitative Kriterien=parameters, , Qualitative Kriterien=fuzzy set)

```

62 "joiningTechnology3_glue":
63 {
64   "name": "glue",
65   "booleans":
66   {
67     "connection_type_punctual_linear_field" : [0,1,1],
68     "mixed_compounds_with_thermoplastics_or_pure_metal_compound": [1,0],
69     "post_processing_necessary": "0",
70     "processing_with_one_sided_access_to_the_joint": "1",
71     "removable_connection" : "0"},
72   "parameters":
73   {
74     "production_cycle_time": [30, 20],
75     "costs": [3, 2],
76     "maximum_allowable_tension": [10, 8]},
77   "fuzzy set":
78   {
79     "occupational_safety": "high",
80     "automatability": "high",
81     "dynamic_tension": "high",
82     "environmental_conditions": "normal",
83     "weight": "low",
84     "temperature_resistance" : "normal"}},
85

```

Abbildung 46: Fügetechnologiespezifikation der Fügetechnologie Kleben(Epoxydharz) in der Datenbank als JSON-Format

Anhang 5 Datenschnittstelle zwischen dem Entscheidungsmodell und der Solution-Element Library in MATLAB

```
1 function feedbackOfDecisionAlgorithm = datapipeline_decisionmodel_v(costs,
2 max_allowable_tension, production_cycle_time, automatability, enviromental_conditions, dynamic_tension,
3 occupational_safety, weight, temperature_resistance, mixed_compounds_with_thermoplastics, pure_metal_compound,
4 post_processing_necessary, processing_with_one_sided_access_to_the_joint, connection_type_punctual,
5 connection_type_linear, connection_type_field, select_Information, costs_TailoredJoints, cycle_TailoredJoints,
6 stress_TailoredJoints, costs_AdhesiveBonding, cycle_AdhesiveBonding, stress_AdhesiveBonding,
7 costs_Soldering, cycle_Soldering, stress_Soldering, costs_Rivet, cycle_Rivet, stress_Rivet, costs_Screws,
8 cycle_Screws, stress_Screws, costs_Welding, cycle_Welding, stress_Welding, removable_connection)
9
10 commandStr = ['activate.bat Coda & pushd "path to folder" & python Main.py ',
11 num2str(costs), ' ', num2str(max_allowable_tension), ' ', num2str(production_cycle_time), ' ', automatability, ' ',
12 enviromental_conditions, ' ', dynamic_tension, ' ', occupational_safety, ' ', weight, ' ', temperature_resistance, ' ',
13 mixed_compounds_with_thermoplastics, ' ', pure_metal_compound, ' ', post_processing_necessary, ' ',
14 processing_with_one_sided_access_to_the_joint, ' ', connection_type_punctual, ' ', connection_type_linear, ' ',
15 connection_type_field, ' ', select_Information, ' ', num2str(costs_TailoredJoints(1)), ' ',
16 num2str(costs_TailoredJoints(2)), ' ', num2str(cycle_TailoredJoints(1)), ' ',
17 num2str(cycle_TailoredJoints(2)), ' ', num2str(stress_TailoredJoints(1)), ' ', num2str(stress_TailoredJoints(2)), ' ',
18 num2str(costs_AdhesiveBonding(1)), ' ', num2str(costs_AdhesiveBonding(2)), ' ',
19 num2str(cycle_AdhesiveBonding(1)), ' ', num2str(cycle_AdhesiveBonding(2)), ' ',
20 num2str(stress_AdhesiveBonding(1)), ' ', num2str(stress_AdhesiveBonding(2)), ' ', num2str(costs_Soldering(1)), ' ',
21 num2str(costs_Soldering(2)), ' ', num2str(cycle_Soldering(1)), ' ', num2str(cycle_Soldering(2)), ' ',
22 num2str(stress_Soldering(1)), ' ', num2str(stress_Soldering(2)), ' ', num2str(costs_Rivet(1)), ' ',
23 num2str(costs_Rivet(2)), ' ', num2str(cycle_Rivet(1)), ' ', num2str(cycle_Rivet(2)), ' ',
24 num2str(stress_Rivet(1)), ' ', num2str(stress_Rivet(2)), ' ', num2str(costs_Screws(1)), ' ',
25 num2str(costs_Screws(2)), ' ', num2str(cycle_Screws(1)), ' ', num2str(cycle_Screws(2)), ' ',
26 num2str(stress_Screws(1)), ' ', num2str(stress_Screws(2)), ' ', num2str(costs_Welding(1)), ' ',
27 num2str(costs_Welding(2)), ' ', num2str(cycle_Welding(1)), ' ', num2str(cycle_Welding(2)),
28 ' ', num2str(stress_Welding(1)), ' ', num2str(stress_Welding(2)), ' ', removable_connection];
29
30 [status, commandOut] = system(commandStr);
31
32 if status~=0
33     disp("Failed to call decision script in Python");
34 end
35
36 feedbackOfDecisionAlgorithm = (commandOut);
37
38 out = [feedbackOfDecisionAlgorithm];
39
40 end
```

Abbildung 47: Programmcode der Datenschnittstelle in MATLAB zwischen Cameo Systems Modeler und Python