

Anwendung der in FlexA entwickelten Methodik in Maschinenbau-Unternehmen

M.Sc. **X.-L. Hoang**, Prof. Dr.-Ing. **A. Fay**, Institut für Automatisierungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg

1. Einleitung

In diesem technischen Bericht werden Ergebnisse der Anwendung des im Rahmen des DFG-Projekts FlexA entwickelten Assistenzsystems dargestellt. Dieser Bericht ergänzt somit die Veröffentlichungen in [HFMW18] und [HoFa19].

In Abschnitt 2. wird über die Anwendung in einem Unternehmen berichtet, welches Maschinen baut, in der elektrische Bauelemente auf Spannungsfestigkeit geprüft werden. In Abschnitt 3. wird die Anwendung bei einem Hersteller von Zigarettenmaschinen beschrieben. In beiden Fällen handelt es sich um Maschinen bzw. Typen von Maschinen, die bereits seit Jahren in der Serienproduktion eingesetzt werden. In beiden Fällen steht der Umgang mit Stückgütern bei hohem Durchsatz im Mittelpunkt. Die Unternehmen haben jeweils darum gebeten, dass der Name des Unternehmens, die Namen der beteiligten Mitarbeiter sowie bestimmte technische Daten nicht genannt werden. Eine Weitergabe dieses Berichts oder von Inhalten daraus ist nur mit ausdrücklicher Zustimmung der Autoren erlaubt.

2. Anwendungsfall Spannungsprüfmaschine

Die entwickelte Methodik wurde anhand einer industriellen Spannungsprüfmaschine evaluiert, die ein Teil des Produktportfolios eines Sondermaschinenbauers ist. Die betrachtete Industriemaschine wird genutzt, um zu prüfen, ob produzierte Verbindungsklemmen gegen Überspannungen gesichert sind. Die Maschine besteht aus einer Station für die Pol-zu-Pol Hochspannungsprüfung (auch *interne Prüfung*

genannt), einer Station für die Pol-zu-Potential Hochspannungsprüfung (auch *externe Prüfung* genannt), einer Aufnahme- und Abgabestation für die zu prüfenden bzw. geprüften Verbindungsklemmen sowie einem Rundschalttisch, der den Materialfluss zwischen den Stationen gewährleistet. Ziel des Anwendungsbeispiels war es, die verfügbaren Ressourcen mit dem aus FlexA erarbeiteten Ansatz zu modellieren, um

- mögliche Konfigurationen, d.h. mögliche Kombinationen von verschiedenen Stationen, für die Hochspannungsprüfung zu finden;
- zu analysieren, ob die Konfigurationen eine Anforderung hinsichtlich der Prüfung bestimmter Verbindungsklemmen erfüllen können;
- Anpassungsoptionen zu generieren, falls die Anforderungen nicht erfüllt werden können.

Eine detailliertere Beschreibung der Modelle befindet sich in [HoFa19]. Um verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten zu erhalten, wurden im Anwendungsbeispiel eine Station für die interne Prüfung (090689_BR294) und drei verschiedene Stationen für die externe Prüfung (077906_BR862, 100485_BR221 und 090206_BR294) betrachtet. Das Vorgehen wurde hierbei in drei Schritte aufgeteilt. Im ersten Schritt wurde auf Basis von Interviews mit den Konstrukteuren der technische Prozess der betrachteten Hochspannungsprüfmaschine in der Formalisierten Prozessbeschreibung (FPB) abgebildet (siehe Abbildung 1). Hierbei wurde zunächst der gesamte Prozess modelliert. Anschließend wurden die Teilprozesse für die Pol-zu-Pol sowie Pol-zu-Potential Prüfung im Detail analysiert und beschrieben, da diese beiden Teilprozesse im Fokus des Anwendungsbeispiels standen. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen jeweils den dekomponierten Prozess der beiden Teilprozesse in der Formalisierten Prozessbeschreibung. Der Ablauf des Pol-zu-Potential-Prüfprozesses der drei Stationen der externen Prüfung ist hierbei identisch. In der Formalisierten Prozessbeschreibung unterscheiden sich die Prozesse lediglich in den verwendeten technischen Ressourcen. Die Prozessbeschreibungen in FPB wurden anschließend

überführt in AutomationML (AML), um eine maschinenlesbare Darstellung des Modells zu erhalten. Im Rahmen der Überführung wurden die Objekte aus der Prozessbeschreibung in FPB mit Merkmalen inklusive deren Ausprägungen weiter ausspezifiziert, um dadurch die Fähigkeiten der Stationen zu beschreiben. Die Merkmale wurden durch Interviews mit den Konstrukteuren ermittelt und werden im AML-Modell als Attribute dargestellt.

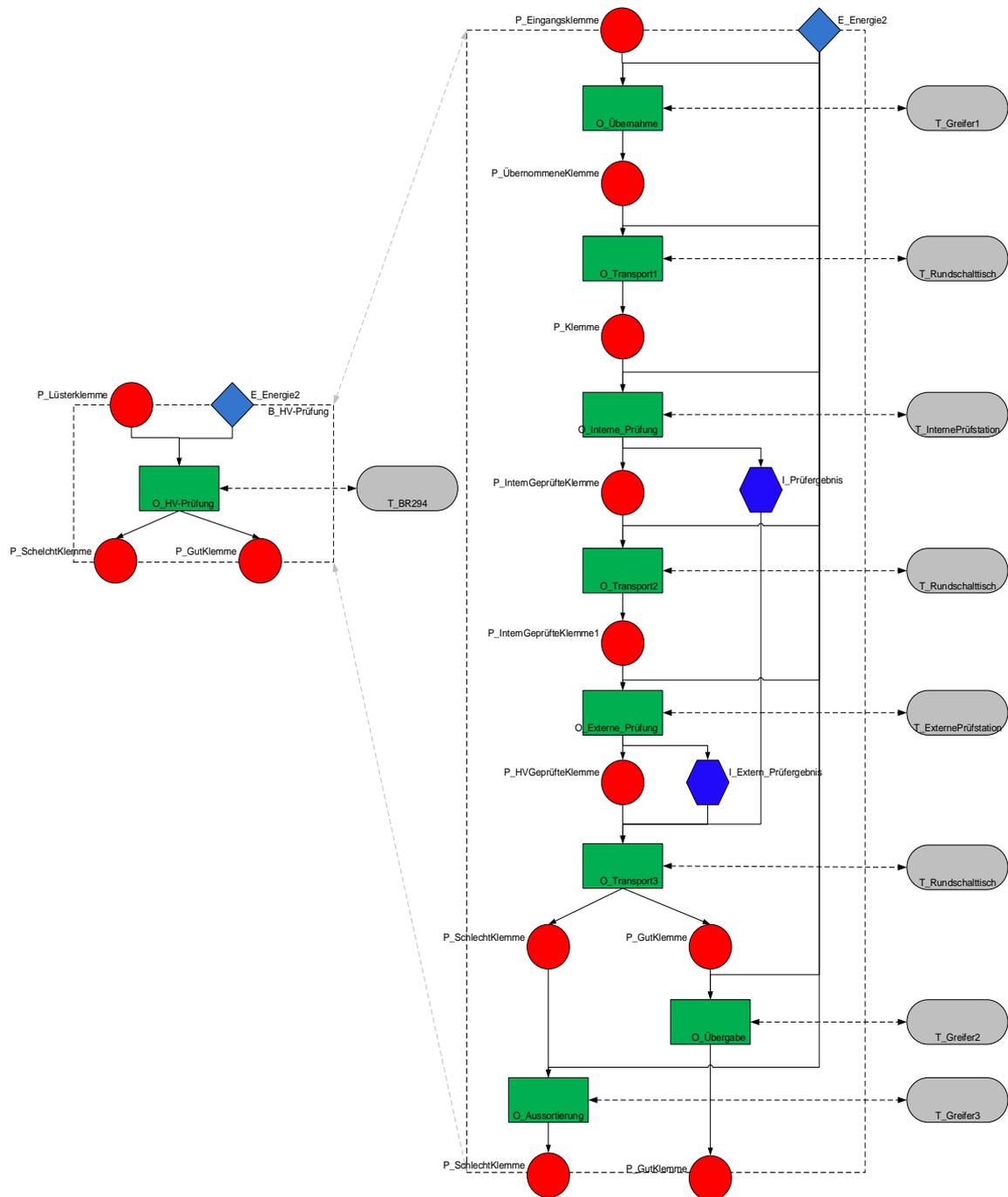


Abbildung 1: Gesamtprozess der Maschine in der Formalisierten Prozessbeschreibung

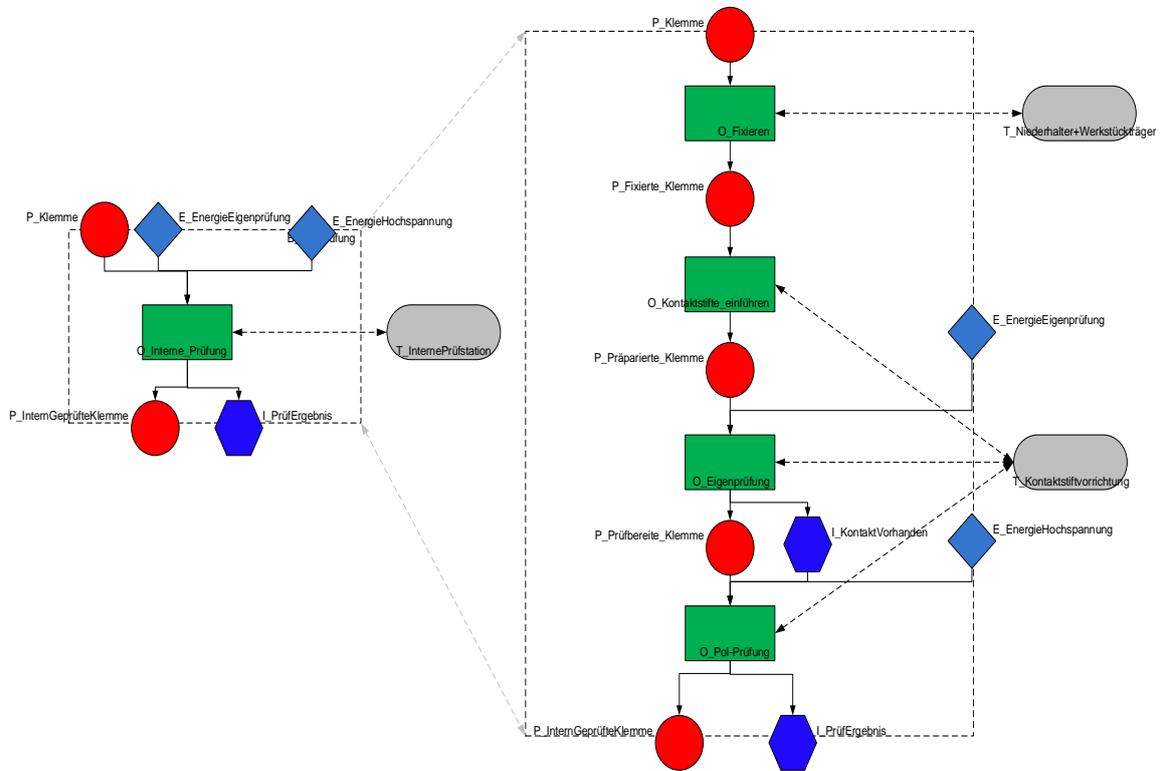


Abbildung 2: Dekomposition der internen Prüfung

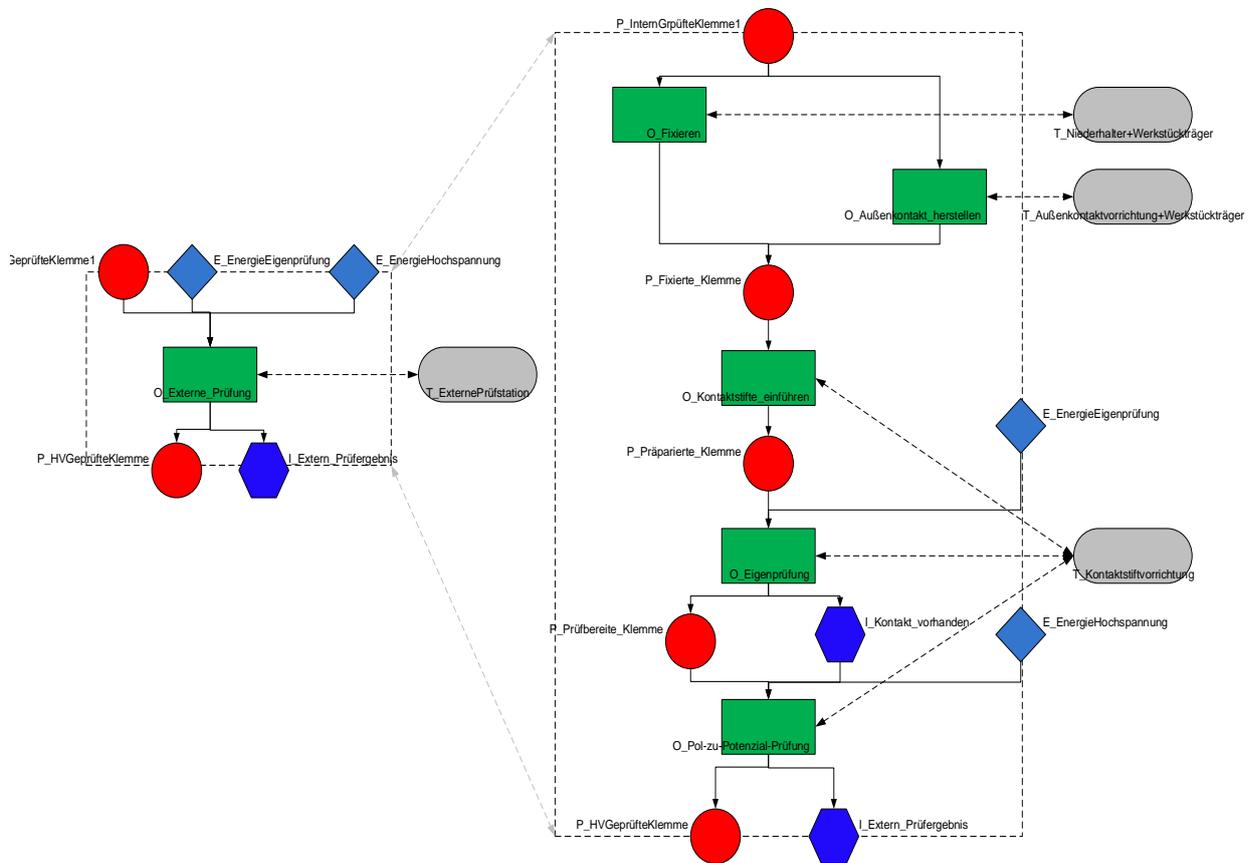


Abbildung 3: Dekomposition der externen Prüfung

Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt aus dem AML-Fähigkeitsmodells der Prüfstation 090689_BR294 für die interne Prüfung. In der Abbildung 4 ist zu erkennen, dass alle Objekte aus der FPB (siehe Abbildung 2) im AML-Modell vorhanden sind und kategorisiert wurden nach Prozessen, Ressourcen, Produkten, Informationen und Energie. Die Verbindungen zwischen den Objekten wurden anhand von definierten Interfaces abgebildet. Beispielsweise ist zu erkennen, dass das Produkt *Klemme* das Eingangsprodukt des Teilprozesses *Fixieren* ist. Des Weiteren ist in Abbildung 4 zu sehen, dass das Produkt *Klemme* neun Attribute besitzt. Das Attribut *Laenge* beispielsweise hat hierbei den Wert *10-166* mit der Einheit *Millimeter*. Dieses Attribut

ist hierbei so zu interpretieren, dass die zugehörige technische Ressource zum Teilprozess *Fixieren* Produkte verarbeiten kann, die eine Länge zwischen 10 [mm] und 166 [mm] besitzen.

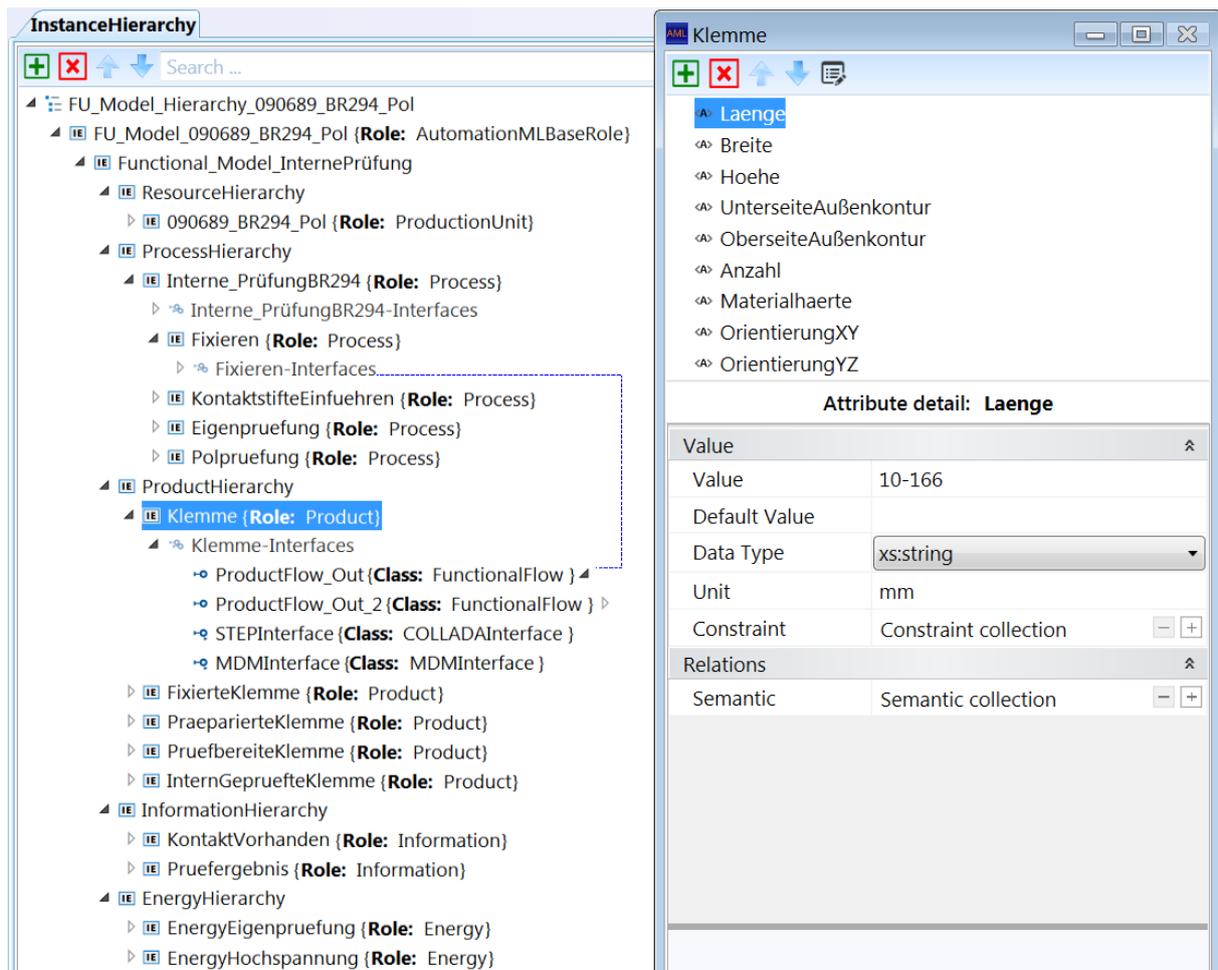


Abbildung 4: Ausschnitt aus der Fähigkeitsbeschreibung der Prüfstation für die interne Prüfung

Im zweiten Schritt des Vorgehens wurden die Abhängigkeiten der Merkmale innerhalb der Teilprozesse der internen und externen Prüfprozesse beschrieben. Als Resultat

wurde für die Interne-Prüfstation vier Multiple-Domain-Matrizen (MDMs) erstellt, für jeden Teilprozess eine. Analog wurden für die drei Stationen der externen Prüfung jeweils fünf MDMs erstellt. Elf der insgesamt 19 MDMs hatten hierbei eine Dimension von mindestens 40x40. Die verbleibenden Matrizen hatten eine Dimension zwischen 10x10 und 20x20. Die Ermittlung der Abhängigkeiten geschah hierbei auch durch Interviews mit den Konstrukteuren. Die Matrizen selbst wurden manuell in Microsoft Excel beschrieben. Ein Ausschnitt aus der MDM des Teilprozesses *Kontaktstifte einführen* der internen Prüfung ist in Abbildung 5 dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass in der MDM sowohl qualitative als auch quantitative Abhängigkeiten erfasst wurden. Beispielsweise ist zu sehen, dass die Abhängigkeit zwischen dem Merkmal *Aufnahme-090211:1 AussparungAnzahl* und dem Merkmal *100045:1-KontaktstifteAnzahlStifte* als eine Gleichheitsrestriktion sowie eine positive Korrelation ohne Quantifizierung beschrieben wurde. Zwischen dem Merkmal *100045:1-KontaktstifteLaengstkante* und dem Merkmal *100045:1-KontaktstifteAnzahlStifte* hingegen ist zu sehen, dass die Korrelationsbeziehung einen Faktor enthält, der noch von anderen Merkmalen abhängt. Die in Microsoft Excel erstellten Matrizen wurden in XML-Dateien gespeichert. Die XML-Beschreibung der MDMs wurde anschließend anhand von ExternalInterfaces in AML mit der Fähigkeitsmodellierung verknüpft. Die XML-Beschreibung wurde in [HoFa19] erläutert.

Kontaktstifte einführen	R 100045:1-Kontaktstifte AnzahlStifte	R 100045:1-Kontaktstifte Bohrunganzahl	R 100045:1-Kontaktstifte Bohrungsdurchmesse	R 100045:1-Kontaktstifte Bohrungsabstand1	R 100045:1-Kontaktstifte Bohrungsabstand2
R Aufnahme-090211:1 AussparungGesamtlaege					
R Aufnahme-090211:1 Breitkante					
R Aufnahme-090211:1 AussparungForm					
R Aufnahme-090211:1 AussparungAnzahl	=;+				
R Aufnahme-090211:1 AussparungLaenge					
R Aufnahme-090211:1 AussparungBreite					
R Aufnahme-090211:1 OrientierungXY					
R Aufnahme-090211:1 yPosition					
R 100065-Kontaktstift Laenge					
R 100065-Kontaktstift Durchmesser		=;+			
R 100065-Kontaktstift Kopfform					
R 100045:1-Kontaktstifte Laengstkante	>;+ 1/(Bohrungsabstand1+Bohrungsabstand2+2*Durchmesser)			>;+ 1/(AnzahlStifte/2)	>;+ 1/(AnzahlStifte/2-1)
R 100045:1-Kontaktstifte AnzahlStifte		=;+			
R 100045:1-Kontaktstifte Bohrunganzahl	=;+				
R 100045:1-Kontaktstifte Bohrungsdurchmesser					
R 100045:1-Kontaktstifte Bohrungsabstand1					
R 100045:1-Kontaktstifte Bohrungsabstand2					
R 100045:1-Kontaktstifte OrientierungXY					
R 100045:1-Kontaktstifte OrientierungYZ					
R 100044:1-Kontaktstiftaufnahme Laengstkante					
R 061130:2-HandlingH12x40L yVerfahrweg					
P Einfuehren zulPolorientierungXY					
P Einfuehren zul.Objektanzahl	= 0.5*AnzahlStifte/Polanzahl;+ 2*Polanzahl				
P Einfuehren zul.Polanzahl	+ 2				

Abbildung 5: Ausschnitt aus der MDM des Teilprozesses "Kontaktstift einführen" des Prozesses "Interne Prüfung"

Im dritten Schritt des Vorgehens wurden auf Basis der beiden erstellten Modelle drei Computer-basierte Analysen durchgeführt, um die oben genannten Ziele zu erreichen. In der ersten Analyse wurde auf Basis des Fähigkeitsmodells überprüft, ob eine gestellte Anforderung von den Stationen erfüllt werden kann. Die Anforderung wird hierbei durch Produktmerkmale und benötigte Prozesse spezifiziert und in Form einer Excel Tabelle beschrieben (siehe Abbildung 6).

Produktmerkmal	Wert	Einheit
Laenge	30	mm
Breite	28	mm
Hoehe	18	mm
Anzahl	10	int
Materialhärte	hart	string
PolorientierungXY	180	grad
PolorientierungYZ	0	grad
Polanzahl	7	int
Polquerschnitt	4	mm ²
Polkontaktflaechenposition	3	mm
Polkontaktflaechenkontur	rund	string
UnterseiteAußenkontur	Serie1	string
OberseiteAußenkontur	Serie1_ohne	string
UnterseitePrüfflächen	Serie1	string
OberseitePrüfflächen	Serie1_ohne	string
Potentialpruefungsspannung	1000	volt
Polpruefungsspannung	1000	volt

Abbildung 6: Anforderungsbeschreibung

Die aufgelisteten Produktmerkmale werden von der Applikation ausgelesen und mit den Produktmerkmalen der Eingangs- bzw. Ausgangsprodukte der Fähigkeitsbeschreibung verglichen. Wenn das Produktmerkmal vorhanden ist und die Werte der Merkmale zusammenpassen, gibt es keinen Änderungsbedarf. Falls die Werte nicht zusammenpassen wird ausgegeben, dass die Station die Anforderungen nicht erfüllen kann, inklusive des nicht erfüllten Merkmals, und eine Änderungsanalyse wird ausgeführt (siehe dritte Analyse). Wenn die Eingangs- bzw. Ausgangsobjekte des Prozesses ein Merkmal aus der Anforderung nicht besitzen, wird das Merkmal als nicht

relevant eingestuft und nicht weiter betrachtet. In der zweiten Analyse prüft die Applikation, ob es eine Kombination von Stationen gibt, die die geforderte Prozessreihenfolge erfüllt und miteinander kompatibel sind. Die Kompatibilität wird hierbei ermittelt indem die Merkmale der Ausgangsobjekte vom vorgelagerten Prozess mit den Merkmalen der Eingangsobjekte des nachgelagerten Prozesses. Auch hier werden Merkmale, die nicht bei den Eingangsobjekten des nachgelagerten Prozesses vorhanden sind als nicht relevant eingestuft. Bei Merkmalen, die bei den Ausgangs- sowie Eingangsobjekten vorhanden sind, wird überprüft, ob die Werte zusammenpassen. Abbildung 7 zeigt einen Ausschnitt der Ergebnisse der Kompatibilitätsanalyse. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Merkmale des Ausgangsprodukts „InternGepruefteKlemme“ des Prozesses „Interne_Prüfung“ der Station BR924 mit den Merkmalen des Eingangsprodukts des Prozesses „Externe_Prüfung“ der Station BR862 verglichen wurde. Beispielsweise ist hierbei zu sehen, dass das Merkmal „Laenge“ der beiden Produkte miteinander übereinstimmen, da das Ausgangsprodukt eine Länge von 10 bis 166 mm haben kann und der nachfolgende Prozess eine Klemme mit 60 mm benötigt. Wohingegen das Merkmale „Breite“ bei den Produkten nicht übereinstimmen, was dementsprechend in der Spalte „Result“ mit „Nicht_erfuellt“ dargestellt wird. Das Merkmal „PolorientierungXY“ ist nur beim Ausgangsprodukt vorhanden und wird daher in der Spalte „Result“ als „Nicht_relevant“ markiert. Für die Merkmale, die als „Nicht_erfuellt“ markiert wurden, wurden anschließend Änderungsanalysen (siehe dritte Analyse) durchgeführt. Es ist hierbei anzumerken, dass die ermittelten Änderungsbedarfe aus der ersten und zweiten Analyse zusammengefasst werden. Dies bedeutet, dass wenn in beiden Analysen als Ergebnis das gleiche Merkmal geändert werden musste, die beiden Wertänderungen aus den Analysen miteinander kombiniert wurden. Für die dargestellte Anforderung (siehe Abbildung 6) wurden drei verschiedene Prozesskombinationen gefunden, da der interne Prüfungsprozess von 090689_BR294 mit den drei verschiedenen

Stationen verbunden werden könnte. Jedoch wurde auch korrekt von der Applikation identifiziert, dass nur die Kombination von Station 090689_BR294 für die interne Prüfung mit Station 090206_BR294 für die externe Prüfung funktional zulässig ist.

1	Initial Process	Interne_PrüfungBR294(Pol-zu-Pol)	Subsequent Process	077906_BR862_Potential_v01 +Externe_PrüfungBR862	Overall Matchign Result	Not OK		
2								
3	Checked Output Element	Parameter	Required Value	Checked Input Element	Parameter	Assurance Value	Matching Value	Result
4	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	Breite	28	(class fpbElements.Product) Klemme	Breite	36		Nicht_erfuellt
5	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	Laenge	10-166	(class fpbElements.Product) Klemme	Laenge	60	60	OK
6	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	Hoehe	18	(class fpbElements.Product) Klemme	Hoehe	21.5		Nicht_erfuellt
7	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	Materialhaerte	{hart,weich}	(class fpbElements.Product) Klemme	Materialhaerte	hart	hart	OK
8	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	UnterseiteAußenkontur	Serie1	(class fpbElements.Product) Klemme	UnterseiteAußenkontur	Serie2		Nicht_erfuellt
9	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	OberseiteAußenkontur	Serie1_ohne	(class fpbElements.Product) Klemme	OberseiteAußenkontur	Serie2_ohne		Nicht_erfuellt
10	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	PolorientierungXY	90	(class fpbElements.Product) Klemme				Nicht_relevant
11	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	PolorientierungYZ	0	(class fpbElements.Product) Klemme				Nicht_relevant
12	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	OrientierungXY	90	(class fpbElements.Product) Klemme	OrientierungXY	180		Nicht_erfuellt
13	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	OrientierungYZ	0	(class fpbElements.Product) Klemme				Nicht_relevant
14	(class fpbElements.Product) InternGepruefteKlemme	Anzahl	1-5.533333333333333	(class fpbElements.Product) Klemme	Anzahl	1	1	OK
15								
16								
17								
18								

Abbildung 7: Darstellung der Kompatibilitätsanalyse

Basierend auf den Ergebnissen der ersten beiden Analysen wurden mithilfe der Informationen aus den erstellten MDMs verschiedene Änderungsoptionen generiert. Hierbei wurden Änderungsoptionen für alle Merkmale erstellt, die die spezifizierte Anforderung nicht erfüllen und/oder geändert werden müssen, um funktional kompatibel mit einer anderen Ressource zu sein. Die Änderungsoptionen wurden automatisch durch die erstellte Softwareapplikation generiert. Die Applikation erstellte dabei einen Baumgraphen, welches die gesamten Abhängigkeiten einer Ausgangsänderung anzeigte, und generierte daraus einen Änderungsbaum, der einzelne Änderungsoptionen repräsentiert. Abbildung 8 zeigt die Änderungsoption für die Erhöhung der Polanzahl einer zu prüfenden Klemme des internen Prüfprozesses. Beim Produkt handelt es sich dabei um die bereits fixierte Klemme, die ein Eingangsprodukt des Teilprozesses „Kontaktstifte Einfuehren“ ist. Es ist zu sehen, dass

das Merkmal „Polanzahl“ der fixierten Klemme, um 2 Einheiten erhöht werden muss. Dies ging bereits aus der ersten Analyse hervor. Aufgrund einer größer-gleich-Restriktion, die in der MDM modelliert ist, muss das Merkmal „zul.Polanzahl“ des Teilprozesses auch um 2 Einheiten erhöht werden. Durch die weitere Analyse der dazugehörigen MDM hat die Applikation ermittelt, dass dies zu erreichen die Anzahl der Kontaktstifte der Kontaktstiftaufnahme um 2 erhöht werden muss aufgrund einer positiven Korrelationsbeziehung. Weiterhin wurde erkannt, dass diese Änderung weitere Änderungen bedingt wie beispielsweise die Erhöhung der Längs-Kante der Kontaktstiftaufnahme um 24 Einheiten. Der Wert der Änderung wurde hierbei auf Basis der quantitativen Informationen der Abhängigkeit in der MDM berechnet.

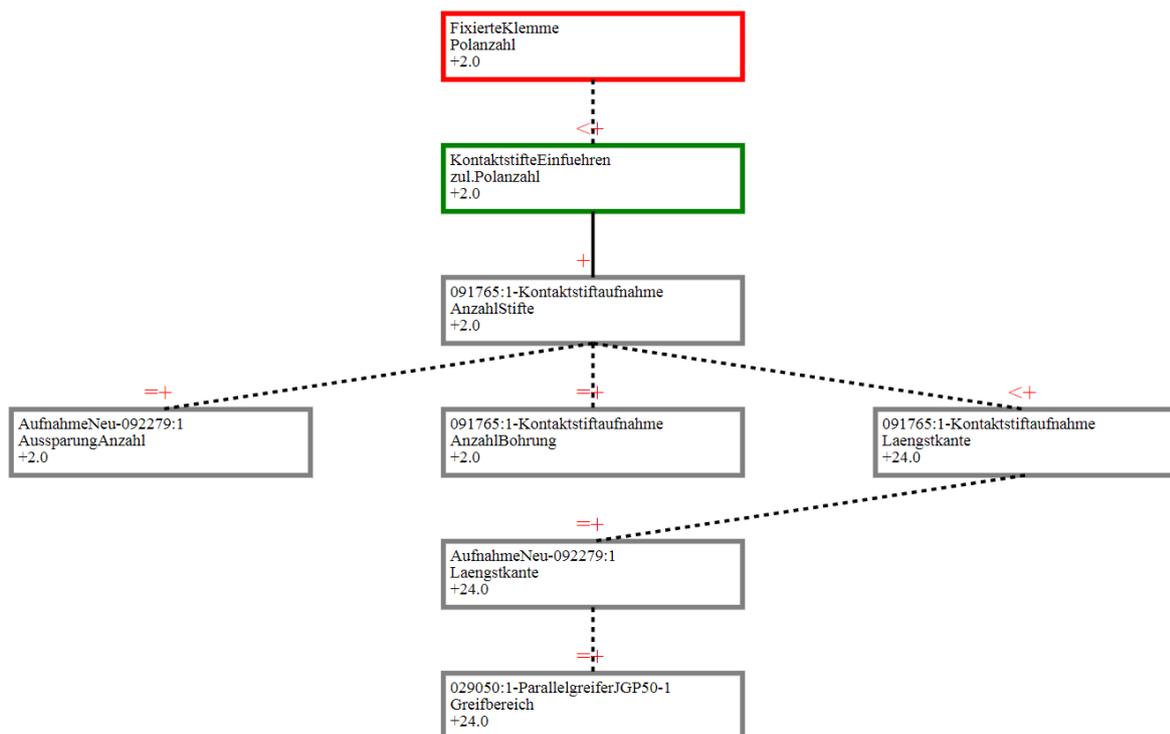


Abbildung 8: Änderungsbaum für das Merkmal "Polanzahl" der internen Prüfung

Für die abgebildete Anfrage (siehe Abbildung 6) wurden über 40 Änderungsoptionen generiert. Die Konstrukteure des Unternehmens haben mehrere der automatisch generierten Optionen überprüft und bestätigt, dass sie korrekt sind. Die Ingenieure merkten jedoch auch an, dass sie nicht mit Gewissheit sagen können, ob alle relevanten Abhängigkeiten im Informationsmodell enthalten sind.

Der Geschäftsführer sowie die Konstrukteure des Unternehmens haben die entwickelte Methodik insgesamt sehr positiv bewertet. Alle haben geäußert, dass das Vorgehen inklusive der Applikation bei verschiedenen Anwendungen im Unternehmen hilfreich wäre. Als Beispiel wurde genannt, dass man beispielsweise so schnell ermitteln könnte, welche Stationen genutzt werden könnten, wenn der Kunde eine neue Anfrage sendet, was meist aufgrund einer Produktänderung geschieht. Des Weiteren wurde angemerkt, dass man die Fähigkeitsmodelle auch dafür nutzen könnte, um nach Stationen zu suchen, die beispielsweise nur bestimmte Energiearten nutzen (z.B. pneumatisch). Mithilfe der Fähigkeitsmodelle könnten die Konstrukteure dann bereits einen guten Überblick erhalten, welche Stationen für ihre Adaptionkonstruktion genutzt werden können. Darüber hinaus wurde vorgeschlagen, den Modellen noch wirtschaftliche Informationen hinzuzufügen, um die Modelle auch bei einer Kostenanalyse nutzen zu können. Bezüglich der zweiten Analyse (Kompatibilitätsanalyse) wurde geäußert, dass sie auch nützlich sei, da die Konstrukteure meist ein Materialflusssystem als Ausgangspunkt haben (z.B. Rundschalttisch oder Umlaufkette) und um dieses System die Maschine konstruieren müssen. Mithilfe der zweiten Analyse könnte also ermittelt werden, welche Stationen vorhanden sind, die funktional mit dem Materialflusssystem kompatibel sind. Dies geschieht bislang auf Erfahrungswissen.

Seitens des Geschäftsführers gab es jedoch auch Bedenken bezüglich des Nutzen-Aufwand-Verhältnisses der Erstellung der Modelle. Das Verhältnis wäre seiner Einschätzung nach vermutlich erst positiv, wenn die Modelle mehrmals

wiederverwendet werden könnten. Aus Sicht der Konstrukteure wäre ein solches Assistenzsystem für ihre Arbeit sehr hilfreich, um eine erste Einschätzung über die „Komplexität“ einer möglichen Änderung an einer Station zu erhalten. Bezüglich des Erstellungsaufwands der Modelle teilten sie die Meinung des Geschäftsführers, insbesondere für die Abhängigkeitsmodellierung. Jedoch wurde von den Konstrukteuren auch angemerkt, dass die Modelle auch als Dokumentationsform für Abhängigkeiten, die bei Änderungsprojekten ermittelt werden, genutzt werden könnten. Hierdurch könnten die Informationen in späteren Änderungsprojekten gut wiederverwendet werden. Auf Basis der Rückmeldungen kann zusammengefasst werden, dass der entwickelte Ansatz durchaus in der Praxis Anwendung finden könnte und nutzenstiftend ist, wobei die Praktikabilität des Ansatzes jedoch von dem Erstellungsaufwand der Modelle abhängt.

3. Anwendungsfall Zigarettenmaschine

Die im DFG-Projekt FlexA entwickelte Methodik wurde auch an einer Zigarettenmaschine validiert. In der Ausgangssituation des Anwendungsbeispiels forderte ein Kunde des Unternehmens eine Änderung bezüglich des verwendeten Rohmaterials (Zigarettenpapier) an. Die Merkmale des neuen Rohmaterials unterschieden sich dabei signifikant von den Merkmalen des aktuell verwendeten Rohmaterials. Dementsprechend musste das Unternehmen analysieren, ob die bestehende Zigarettenmaschinen in ihrer aktuellen Auslegung mit dem neuen Material die Produkte produzieren kann. Parallel zu den Untersuchungen des Unternehmens, die sich mit „trial & error“ beschreiben lassen, wurde die in FlexA entwickelte Methodik angewandt. Das Ziel war hierbei ausschließlich, zu untersuchen, welche Teilprozesse das neue Material nicht verarbeiten können und wie diese dementsprechend geändert werden müssen. Dazu wurde zunächst der technische Prozess der Maschine in der Formalisierten Prozessbeschreibung (VDI/VDE 3682) modelliert. Der Prozess bestand insgesamt aus 19 Teilprozessen. Hierbei ist zu beachten, dass ausschließlich Produkte als Eingabe- und Ausgabeobjekte betrachtet wurden, da nur das Rohmaterial sich änderte. Um den Modellierungsaufwand auf ein sinnvolles Maß zu beschränken, wurde als nächstes eine Voranalyse mit den Ingenieuren des Unternehmens durchgeführt, bei der vier Prozesse ausgewählt wurden, die am wahrscheinlichsten von der Materialänderung betroffen waren. Die weiteren Analyseschritte konzentrierten sich ausschließlich auf die vier ausgewählten Teilprozesse „Splicen“, „Beleimen“, „Zusammenführen“ und „Einschuss“. Das Splicen ist ein Teilprozess relativ zu Beginn des Gesamtprozesses und wird durchgeführt, um Zigarettenpapier in das System einzuspeisen, wenn das aktuelle Zigarettenpapier fast aufgebraucht ist. Hierbei wird das einzuführende Papier zunächst auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigt und dann mit dem noch vorhandenen Papier verklebt und zeitgleich das überflüssige beschleunigte Papier abgetrennt. Beim Beleimen wird das

Zigarettenpapier erwärmt und beleimt. Im nächsten Teilprozess, dem „Zusammenführen“ wird das beleimte Zigarettenpapier mit dem Tabakstrang zusammengeführt und ein Zigarettenstrang wird geformt. Der Teilprozess „Einschuss“ kommt einige Schritte nach der Zusammenführung, wenn der Zigarettenstrang bereits geschnitten wurde. Beim Einschuss müssen die Zigaretten mit einem Doppelbeschleuniger auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigt werden, um diese dann in einer Zigarettentrommel einzulagern. Ein Ausschnitt aus dem AML-Modell der Zigarettenmaschine mit den vier ausgewählten Teilprozessen ist in Abbildung 9 zu sehen. Die Objekte im AML-Modell wurden auf Basis von Interviews mit den Ingenieuren mit Merkmalen versehen. Aufgrund der angefragten Änderung des Zigarettenpapiers wurden nur Merkmale betrachtet, die sich von ihren Werten her im Vergleich zum vorherigen Papier geändert haben.

The screenshot displays an AML model editor interface. On the left, a tree view shows the model structure:

- Functional_Model_Zigarettenproduktion (Role: AutomationMLFunctionalRole)
 - ResourceHierarchy (Role: FunctionalResource)
 - KF1 (Role: FunctionalResource)
 - KF1-Interfaces
 - SpliceEinheit (Role: FunctionalResource)
 - BeleimEinheit (Role: FunctionalResource)
 - KF2 (Role: FunctionalResource)
 - KF2-Interfaces
 - Formateinheit (Role: FunctionalResource)
 - Doppelbeschleuniger (Role: FunctionalResource)
 - ProcessHierarchy (Role: FunctionalProcess)
 - Zigarettenproduktion (Role: FunctionalProcess)
 - EingelagertesProdukt-Interfaces
 - Splicen (Role: FunctionalProcess)
 - Beleimen (Role: FunctionalProcess)
 - Zusammenfuehren (Role: FunctionalProcess)
 - Einschuss (Role: FunctionalProcess)
 - ProductHierarchy (Role: Product)
 - Papier (Role: Product)
 - PapierNeu (Role: Product)
 - PapierSpliced (Role: Product)
 - Leim (Role: Product)
 - BeleimtesPapier (Role: Product)
 - Tabakstrang (Role: Product)
 - Produktstab (Role: Product)
 - EingelagerterProduktstab (Role: Product)

On the right, the 'Attribute detail' panel for 'Zielgeschwindigkeit' is shown:

Attribute detail: Zielgeschwindigkeit	
Value	2
Default Value	
Data Type	xs:string
Unit	m/s
Constraint	Constraint collection
Relations	
Semantic	Semantic collection

Abbildung 9: Ausschnitt aus dem AML-Modell der Zigarettenmaschine

Ausgehend von den geänderten Merkmalen wurde bei jedem der vier Teilprozesse zudem mit den Ingenieuren analysiert, welche der geänderten Merkmale einen Einfluss auf den Teilprozess haben könnten. Hierfür wurde zunächst untersucht welche physikalischen Wirkprinzipien im Teilprozess genutzt werden, z.B. mechanisch, thermisch oder optisch. Anhand dessen konnten die geänderten Merkmale auf für den Teilprozess relevante Merkmale reduziert werden. Im nächsten Schritt wurde für jeden der vier Teilprozesse Abhängigkeiten in Form der in FlexA entwickelten Multiple-Domain-Matrizen (MDMs) erstellt. Hierbei ist anzumerken, dass auf Basis der vorherigen Eingrenzungen bezüglich der relevanten Merkmale die MDMs eine relativ überschaubare Größe hatten. Zudem wurden die Abhängigkeiten ausschließlich qualitativ modelliert. Die größte MDM besaß dabei eine Größe von 23x23 und gehörte zum Teilprozess „Splicen“. Der Teilprozess „Zusammenführen“ besaß hingegen die kleinste MDM mit einer Dimension von 13x13. In den Abbildungen 10 und 11 werden die MDMs der Teilprozesse „Beleimen“ und „Einschuss“ dargestellt.

Beleimen	R Heizstab Leistung	R Heizplatte Wärmeleitfähigkeit	R Regler Stellgröße	R Formatbandantrieb Drehzahl	P Beleimen Heiztemperatur	P Beleimen Heizdauer	Prod_I PapierSpliced Wärmeleitfähigkeit	Prod_I PapierSpliced Dicke	Prod_I PapierSpliced Entzueundungstemperatur	Prod_I Leim Mindestfilmbildetemperatur	Prod_I Leim Trockensubstanzanteil	Prod_O BeleimtesPapier Temperatur
	R Heizstab Leistung											
	R Heizplatte Wärmeleitfähigkeit											
	R Regler Stellgröße											
	R Formatbandantrieb Drehzahl											
	P Beleimen Heiztemperatur	+	+	+								
	P Beleimen Heizdauer				-							
	Prod_I PapierSpliced Wärmeleitfähigkeit						>,-	>,-				
	Prod_I PapierSpliced Dicke						=,+	=,+				
	Prod_I PapierSpliced Entzueundungstemperatur						>,+	>,+				
	Prod_I Leim Mindestfilmbildetemperatur						<,+	<,+				
	Prod_I Leim Trockensubstanzanteil						>,+	>,+				
	Prod_O BeleimtesPapier Temperatur						=,+	=,+				

Abbildung 10: MDM des Teilprozesses "Beleimen"

Einschuss	R Motor Drehmoment	R Motor Drehzahl	R Getriebe Uebersetzung	R Rollen Radien	R Rollen Reibwert	R Rollen Rollenabstand	P Einschuss max. Gewicht	P Einschuss zul. Breite	P Einschuss Beschl. Normalkraft	P Einschuss Geschwindigkeit	Prod_I Produktstab xDurchmesser	Prod_I Produktstab Geschwindigkeit	Prod_I Produktstab Flaechengewicht	Prod_I Produktstab Elastizitaet	Prod_I Produktstab Rollreibungswert	Prod_O EingelagerterProduktstab xDurchmesser
R Motor Drehmoment																
R Motor Drehzahl																
R Getriebe Uebersetzung																
R Rollen Radien																
R Rollen Reibwert																
R Rollen Rollenabstand																
P Einschuss max. Gewicht	+		+	+												
P Einschuss zul. Breite						+							+			
P Einschuss Beschl. Normalkraft					+	-				+					+	
P Einschuss Geschwindigkeit		+	+	+												
Prod_I Produktstab xDurchmesser								=;+								
Prod_I Produktstab Geschwindigkeit										<;+						
Prod_I Produktstab Flaechengewicht							<;+									
Prod_I Produktstab Elastizitaet																
Prod_I Produktstab Rollreibungswert																
Prod_O EingelagerterProduktstab xDurchmesser								=;+								

Abbildung 11: MDM des Teilprozesses "Einschuss"

Analog zum ersten Anwendungsfall (Abschnitt 2.) wurden in diesem Anwendungsfall die MDMs in das aus FlexA definierte XML-Schema überführt und mit dem AML-Modell verknüpft. Zusätzlich wurde auch in diesem Anwendungsfall eine Anfrage in der gleichen Form geänderter Anforderungen wie im ersten Anwendungsfall (siehe Abbildung 6) erstellt. Die Anfrage beinhaltet die Produktmerkmale Dicke, Zugfestigkeit, Flächengewicht Entzündungstemperatur sowie Rollreibungswert. Auf Basis des AML-Modells sowie der Anfrage wurde automatisch analysiert, ob die Zigarettenmaschine in ihrer aktuellen Konfiguration das neue Zigarettenpapier verarbeiten kann. Die Applikation ermittelte, dass die Zigarettenmaschine das neue

Papier in ihrer aktuellen Konfiguration nicht verarbeiten kann, und gab diesbezüglich über zehn verschiedene Änderungsoptionen aus. Abbildung 12 stellt den gesamten Änderungsbaum für den Teilprozess „Beleimen“ bezüglich der Änderung der Papierdicke dar. Es ist zu sehen, dass die Dicke des Papiers dazu führt, dass die Heiztemperatur oder die Heizdauer erhöht werden muss. Aufgrund der qualitativen Modellierung beschreibt der Wert „+1“ bzw. „-1“ hierbei lediglich, ob eine Erhöhung bzw. Verringerung des Merkmalwertes benötigt wird. Des Weiteren ist zu sehen, dass die Heiztemperatur des Prozesses durch die Erhöhung der Leistung des Heizstabs, die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Heizplatte oder durch die Erhöhung der Stellgröße des Reglers erreicht werden kann. Zudem wurde ermittelt, dass die Heizdauer durch die Verringerung der Drehzahl des Formatbandantriebs bewerkstelligt werden könnte.

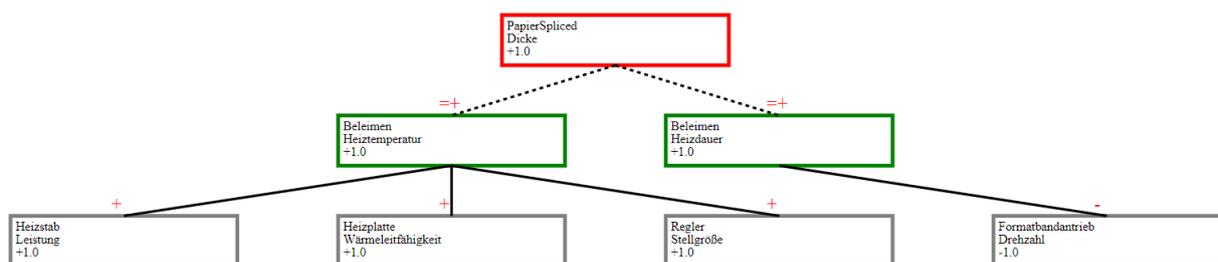


Abbildung 12: Gesamter Änderungsbaum des Teilprozesses "Beleimen" für Änderung der Papierdicke

Dementsprechend wurde der abgebildete gesamte Änderungsbaum von der Applikation in vier Änderungsoptionen unterteilt, wie beispielsweise in Abbildung 13 dargestellt. Es ist hierbei anzumerken, dass auch eine Kombination der drei Optionen durchgeführt werden könnten, um das zulässige Gewicht des Prozesses zu erhöhen.

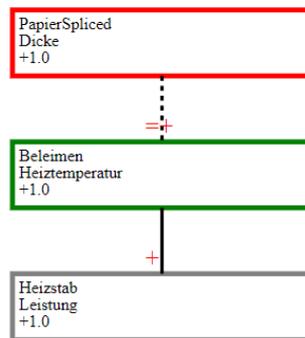


Abbildung 13: Option 1 für den Teilprozess "Beleimen" für Änderung der Papierdicke

Beim Teilprozess „Zusammenführen“ hat die Applikation den in Abbildung 14 dargestellten Änderungsbaum generiert. In der Abbildung ist zu erkennen, dass aufgrund der Erhöhung der Papierdicke der zulässige y-Durchmesser des Prozesses angepasst werden muss. Dieses Prozessmerkmal kann hierbei durch die Erhöhung des y-Durchmessers des Fingers erreicht werden oder durch die Erhöhung der Elastizität des Eingangsprodukts. Letzteres ist jedoch keine „reale“ Option für das Unternehmen, da das Produkt vom Kunden vorgegeben wird. Jedoch werden diese Optionen von der Applikation mitausgegeben, da bei Anwendungsfällen wo die Produktgestaltung und dessen Herstellung von einem Unternehmen durchgeführt wird, diese Art von Optionen durchaus valide sein können.

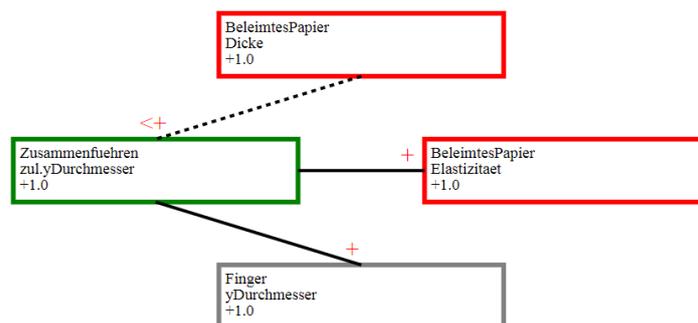


Abbildung 14: Änderungsbaum für Teilprozess "Zusammenführen" für Änderung der Papierdicke

Für den Teilprozess „Einschuss“ hat die Applikation drei verschiedene Änderungsoptionen bezüglich der Erhöhung des Flächengewichts ermittelt. Der dazugehörige gesamte Änderungsbaum ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Erhöhung des Flächengewichts aufgrund der Nutzung des neuen Papiers führt dazu, dass das zulässige Gewicht des Prozesses überschritten wird. Um eine Erhöhung des zulässigen Prozessgewichts zu erreichen, können hierbei das Drehmoment des Doppelbeschleunigermotors oder die Übersetzung des Getriebes oder die Radien der Rollen des Doppelbeschleunigers erhöht werden. Es ist noch anzumerken, dass die Auswirkungen von Änderungen auf vorherige oder nachfolgende Prozesse auch durch die Analyse von Produktparametern nachvollzogen werden können, da Änderungen des Eingabe- / Ausgabeobjekts eines Prozesses als Ausgabe- / Eingabeobjekt des vorherigen oder nachfolgenden Prozesses verwendet werden können. Dementsprechend können auch bestimmte prozessübergreifende Abhängigkeiten analysiert werden.

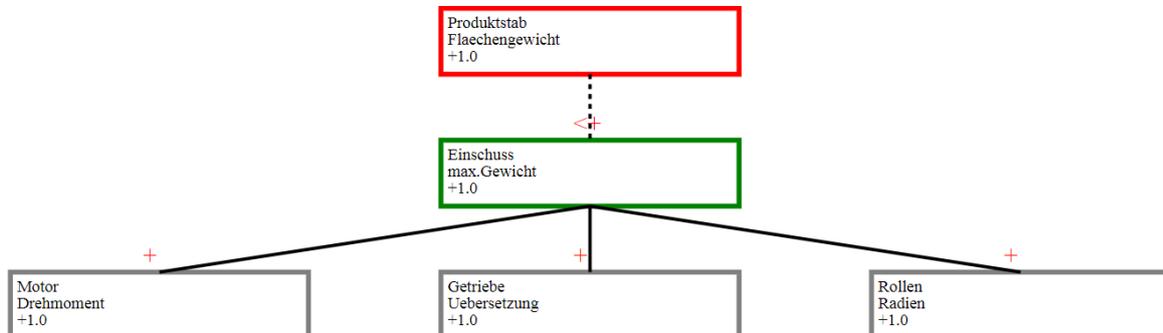


Abbildung 15: Änderungsbaum für Teilprozess "Einschuss" für Änderung der Papierdicke

Die generierten Änderungsmöglichkeiten wurden von den Ingenieuren des Unternehmens begutachtet. Aus Sicht der Ingenieure waren die automatisch generierten Änderungsmöglichkeit korrekt, jedoch wurde angemerkt, dass einige von ihnen aufwendig und daher nicht die besten Optionen wären. Darüber hinaus gaben

die Ingenieure auch hier an, dass der zeitliche Aufwand für die Erstellung der MDMs ihres Empfindens nach im Vergleich zum „normalen“ Vorgehen relativ hoch ist, wenn die MDMs nicht wiederverwendet werden können. Die Erstellungszeit einer MDM variierte je nach Komplexität des Prozesses zwischen vier und acht Stunden inklusive Eingrenzung der Merkmale, obwohl in diesem Anwendungsfall die MDMs relativ überschaubar waren. Der Aufwand für die Erstellung der Prozessbeschreibung war hierbei verhältnismäßig gering. Jedoch haben die Ingenieure ausgesagt, dass sie das systematische Vorgehen bei der Erstellung der Modelle sehr gut fanden, da man dadurch die Probleme in Teilprobleme zerlegen und fokussierter bearbeiten konnte. Die Ingenieure merkten auch an, dass der Ansatz mehr Änderungsoptionen hervorbrachte, als sie in Betracht gezogen hätten. Darüber hinaus war die Applikation auch in der Lage, die in der Realität implementierte Änderung hinsichtlich des erhöhten Flächengewichts beim Teilprozess „Einschuss“ aufzuführen, welche der zweiten Option entsprach und die Erhöhung der Übersetzung des Getriebes beinhaltete. Diese Option wurde von den Ingenieuren umgesetzt, da die Änderung der Übersetzung des Doppelbeschleunigergetriebes durch eine einfache Parametrierung der Software erfolgen konnte und dementsprechend mit dem geringsten Aufwand und den geringsten Kosten verbunden war.

Dieses Anwendungsbeispiel verdeutlichte, dass der entwickelte Ansatz aus FlexA auch auf Systeme außerhalb des Montage- und Handhabungsbereichs angewandt werden kann. Im Vergleich zum ersten Anwendungsfall lag hier der Fokus jedoch nicht auf die Kompatibilitätsprüfung von vorhandenen Baugruppen, sondern ausschließlich auf der Erfüllbarkeitsüberprüfung von Anforderungen. Außerdem konnte gezeigt werden, dass im Vergleich zum sonstigen Vorgehen des Unternehmens, welches primär auf Gesprächsrunden, Erfahrungswissen und Experimenten basiert, auf Basis der entwickelten Methodik ein systematischeres Vorgehen etabliert werden konnte. Hierdurch konnten gezielte Analysen bei einer gegebenen Änderungsanfrage

durchgeführt werden, wodurch die Ingenieure das Problem in kleinere Teilprobleme zerlegen konnten, was die Komplexität des Gesamtproblems reduzierte und auch bei der Untersuchung der Abhängigkeiten geholfen hat.

4. Literatur

- [HoFa19] X. L. Hoang, A. Fay: *A Capability Model for the Adaptation of Manufacturing Systems*. In: 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2019), September 10th-13th, 2019, Zaragoza, Spain.
- [HFMW18] Hoang, X. L.; Fay, A.; Marks, P.; Weyrich, M.: Industrial Application of a MDM-based Approach for Generation and Impact Analysis of Adaptation Options - a Case Study. In: 23rd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2018), September 4th-7th, 2018, Torino, Italy.