

Auszug aus dem Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 18170 N

Forschungsthema

Entwicklung von Fließkonzepten in der Montage variantenreicher Kleinserien unter Berücksichtigung technisch-wirtschaftlicher Aspekte (MicroBatchFlow)

Durchführende Forschungsstelle

Forschungsstelle

RIF e.V.
Institut für Forschung und Transfer
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20
44227 Dortmund

Leiter der Forschungsstelle

Dipl.-Inf. Michael Saal

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Verfasser des Schlussberichts

Dipl.-Wirt.-Ing. Benedikt Konrad

Das IGF-Vorhaben 18170 N der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V. - GVB, Wiesenweg 2, 93352 Rohr wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Problemstellung	1
1.2. Zielstellung	2
2. Grundlagen und Stand der Technik	2
2.1. Austaktung von Fließlinien	2
2.1.1. Klassifikation der Austaktungsprobleme	3
2.1.2. Austaktung von Variantenfließlinien	5
2.1.3. Dynamische Austaktung	7
2.2. Fazit des Stands der Technik	9
3. Konzeption der Methodik	10
4. Umsetzung der Methodik in einem Software-Werkzeug	12
4.1. Umsetzung der Methodik zur Bildung von Austaktungsfamilien	12
4.1.1. Teilprozess 1: Datenvorverarbeitung	14
4.1.2. Teilprozess 2: Familienbildung und -bewertung	15
4.2. Umsetzung der Methodik zur familienbasierten Austaktung	16
5. Validierung der Methodik	17
6. Fazit	18
6.1. Wirtschaftlich-technische und wirtschaftliche Beurteilung der erzielten Ergebnisse	18
6.2. Innovativen Beitrag sowie industrielle Anwendungsmöglichkeiten	19

1. Einleitung

1.1. Motivation und Problemstellung

In der zweiten Hälfte, insbesondere den letzten Dekaden des 20. Jahrhunderts, hat sich der vormalige Verkäufermarkt zu einem Käufermarkt gewandelt (vgl. Becker et al. 2008, S. 3; Reinhart und Pröpster 2012). Dominierte zu Beginn des Jahrhunderts die Massenproduktion identischer Produkte die industriellen Herstellungsprozesse, hat sich dieses hin zur Mass-Customization, einer kundenwunschorientierten Produktion individualisierter Varianten eines möglichst standardisierten Produktes, verschoben (u. a. Boysen et al. 2009b, S. 455; Hu et al. 2011; Hu 2013; Lanza et al. 2013; Pine 1999, S. 33). Diese starke Erweiterung der Produktspektren in Kombination mit dem stagnierenden Nachfragewachstum in den Märkten der Industrienationen führt zu sinkenden Produktionsvolumen je angebotener Variante und starken Schwankungen des Typ-Mengen-Mix (u. a. Lotter und Wiendahl 2012, S. 3; Nyhuis et al. 2010; Große-Heitmeyer und Wiendahl 2004, S. 3). Folglich werden flexible Produktionsprozesse benötigt, die in der Lage sind, die Kundenaufträge trotz hoher Variabilität und kleiner Serien effizient zu erfüllen (ebd.). Der Zwang zur Steigerung der Effizienz der Produktionsprozesse und damit der Wettbewerbsfähigkeit wird im Zuge der Globalisierung durch den zunehmenden Wettbewerbsdruck weiter verstärkt (Deuse et al. 2007).

Ein Ansatzpunkt zur Effizienzsteigerung unter den Gesichtspunkten schlanker Produktion ist die konsequente Erzeugnis- bzw. Objektorientierung anstelle einer verrichtungsorientierten Organisation der Prozesse (vgl. Bicheno und Holweg 2009, 122 ff.; Günther und Tempelmeier 2012, S. 59; Yaman 2008). Dabei werden alle für den Herstellungsprozess relevanten Arbeitssysteme und die in diesen enthaltenen Betriebsmittel entsprechend ihrer Abfolge im Arbeitsplan orientiert (Dangelmaier 2009, S. 282; Günther und Tempelmeier 2012, S. 13). Die Fließfertigung, bei der die einzelnen Arbeitssysteme miteinander verkettet sind, stellt die konsequenteste Form der Prozessorientierung dar (ebd.). Zur Maximierung des Durchsatzes einer Fließlinie erfolgt eine zeitliche Bindung des Werkstückflusses durch diese Linie, d. h. es wird eine Taktzeit vorgegeben (Hopp und Spearman 2008, 662 ff.). Die Vorgabe einer für eine gesamte Linie einheitlichen Taktzeit führt allerdings dazu, dass für jedes Arbeitssystem der Arbeitsinhalt so gewählt werden muss, dass die Taktzeit weder überschritten, bzw. um Leerlaufzeiten und damit Verschwendung zu vermeiden, auch nicht signifikant unterschritten wird. Ist die Austaktung für eine Ein-Produkt-Linie mit nur geringen Leerlaufverlusten zu bestimmen, reduziert jedes weitere Produkt bzw. jede weitere Produktvariante, die auf einer Linie hergestellt werden soll, die Homogenität der auszuführenden Arbeitsinhalte und damit die Linieneffizienz. Da jedoch die Installation von produktspezifischen Fertigungslinien aufgrund der eingangs dargelegten sinkenden Stückzahlen je Produkt unter betriebswirtschaftlichen Aspekten nicht zu rechtfertigen ist, sind Unternehmen gezwungen, gezielt unterschiedliche Produktvarianten oder sogar unterschiedliche Produkte auf einer Linie herzustellen. Dabei muss es folglich das Ziel sein, durch gezielte Produktgestaltung die Auswirkungen von Unterschieden verschiedener Varianten auf die Linie zu minimieren oder geeignete Konzepte für die Fließfertigung zu entwickeln, die robust gegenüber unterschiedlichen zu fertigenden Produkten bzw. Produktvarianten sind.

1.2. Zielstellung

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, eine Methodik zur Entwicklung von Fließkonzepten für die variantenreiche Kleinserie zu entwickeln, die es ermöglicht, unterschiedliche Produktvarianten auf einer Fließlinie herzustellen, ohne eine signifikante Reduktion der Effizienz der Linie in Kauf nehmen zu müssen. Der angestrebte Ansatz ist dabei, das vorliegende Produktspektrum sowie die vorliegenden Kundenaufträge hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit zu untersuchen, um abzuleiten, ob sich für diese homogene Austaktungsfamilien bilden lassen, sodass diese jeweiligen Familien auf einer Fließlinie produziert werden können. Diese Methodik wird im Weiteren als familienbasierte Austaktung bezeichnet.

Um dieses Gesamtziel zu erreichen soll die zu entwickelnde Methodik folgende drei Teil-Zielstellungen lösen:

- Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Bildung homogener Austaktungsfamilien
- Entwicklung einer Methodik zur Austaktung der Variantenfließlinie für die gebildeten Austaktungsfamilien
- Entwicklung einer Methodik zur Reihenfolgeoptimierung der gebildeten Austaktungsfamilien

Bei der Entwicklung der Lösungen für diese Teil-Zielstellungen soll berücksichtigt werden, dass die Methodik in den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses, insbesondere auch KMU, ohne nennenswerte Vorkenntnisse und ohne hohen Investitionsaufwand eingesetzt werden können, sofern die Unternehmen die datentechnischen Voraussetzungen für die Methodik erfüllen. Des Weiteren soll die Methodik weitestgehend automatisiert sein, um den personellen Aufwand bei deren Anwendung zu minimieren.

2. Grundlagen und Stand der Technik

2.1. Austaktung von Fließlinien

Das Problem der Austaktung¹ von Fließlinien beschreibt die Zuordnung der für die Herstellung eines Produktes nötigen Arbeitsvorgänge zu den Arbeitsstationen eines Fließbandes (u. a. Gutjahr und Nemhauser 1964; Decker 1993, S. 31; Boysen 2005, S. 23). Die Formalisierung der Problemstellung durch Helgeson et al. (1954) und Salveson (1955)² sowie der von Jackson (1956) vorgestellte Lösungsansatz stellen die ersten wissenschaftlichen Arbeiten zur Austaktung von Fließlinien dar. Anschließend wurde die Austaktung von Fließlinien in der wissenschaftlichen Literatur detailliert untersucht. Dabei wurde der Betrachtungsgegenstand der Fließbandabstimmung kontinuierlich weiterentwickelt, um praxisrelevante Problemstellungen abbilden zu können.

² Beide zitiert nach (Boysen et al. 2007, Ghosh und Gagnon 1989, Gen et al. 2008, S. 478, Hardeck 1974, Jackson 1956, Keil 2012, S. 70, Kilbridge und Wester 1961 u. a.)

2.1.1. Klassifikation der Austaktungsprobleme

Zur Strukturierung der unterschiedlichen betrachteten Austaktungsprobleme sollen diese im Folgenden basierend auf den Klassifizierungssystematiken von Baybars (1986), Boysen et al. (2007) sowie Gen et al. (2008) strukturiert und auf die betrachteten Eigenschaften der Fließlinie eingegangen werden.

Als grundlegende Annahmen definiert Baybars (1986) für alle Austaktungsprobleme, dass

- alle Eingangsparameter bekannt sein müssen,
- ein Arbeitsvorgang nicht auf mehrere Arbeitsstationen aufgeteilt werden darf,
- zwischen den Arbeitsvorgängen eindeutige Vorrangbeziehungen aufgrund von technologischen Restriktionen existieren und
- alle Arbeitsvorgänge zur Herstellung des Produktes ausgeführt werden müssen.

Im Weiteren unterscheiden die o. g. Klassifikationen zwischen dem Simple Assembly Line Balancing Problem (SALBP, einfache Austaktungsproblem), dem General Assembly Line Balancing Problem (GALBP, verallgemeinertes Austaktungsproblem) sowie dem Assembly Line Design Problem (ALDP, Liniengestaltungsproblem) als Sonderfall des GALBP. Das SALBP versucht durch weitere Annahmen das Austaktungsproblem weiter vom realen Problem zu abstrahieren und dadurch dessen Lösbarkeit zu vereinfachen. Über die obigen Annahmen des SALBP hinaus führt Baybars (1986) dazu ein, dass genau ein einziges Produkt auf der Fließlinie hergestellt wird, welche eine serielle Verknüpfung von Arbeitsstationen darstellt, ohne parallele Arbeitsstationen oder Nebenlinien. Darüber hinaus sind alle Stationen hinsichtlich Dimensionierung und Ausstattung identisch, sodass jeder Arbeitsvorgang an jeder Station ausgeführt werden kann und die Ausführungszeiten der Arbeitsvorgänge unabhängig von der Station sind, an welcher die Arbeitsvorgänge ausgeführt werden. Und zuletzt sind die Ausführungszeiten aller Arbeitsvorgänge unabhängig von der gewählten Reihenfolge und deterministisch.

Sofern mindestens eine der Annahmen des SALBP aufgelöst wird, definieren Baybars (1986), Boysen et al. (2007) sowie Gen et al. (2008) das resultierende Austaktungsproblem als ein GALBP. Wird in dem GALBP eine unterschiedliche Gestaltung der Arbeitsstationen bspw. hinsichtlich Dimensionierung, verfügbarer Betriebsmittel oder Anzahl der Mitarbeiter, wird die Problemstellung als ALDP bezeichnet (Battaïa und Dolgui 2013; Baybars 1986; Bukchin und Rubinovitz 2003; Rekiek et al. 2002b). Eine weitere zentrale Unterscheidung von GALBP resultiert aus der Aufhebung der Begrenzung auf ein einzelnes Produkt, sodass hier neben dem Austaktungsproblem für den Ein-Produkt-Fall auch die Austaktung von Variantenfließlinien (MiMoALBP, Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem) sowie von Mehrproduktfließlinien (MuMoALBP, Multi-Model Assembly Line Balancing Problem) unterschieden werden kann (van Zante-de Fokkert und de Kok 1997). Diese grundlegende Strukturierung der Austaktungsprobleme fasst Abbildung 1 zusammen.

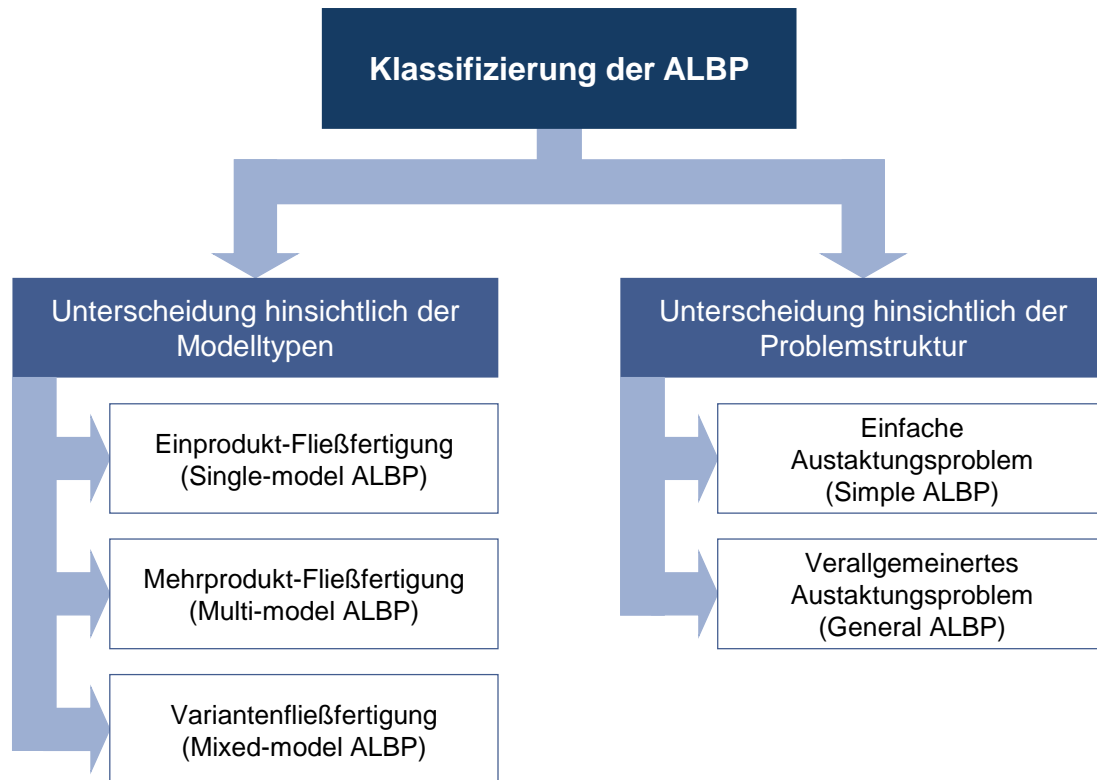


Abbildung 1: Klassifizierung von Austaktungsproblemen (in Anlehnung an Baybars 1986; Gen et al. 2008, S. 478)

Diese grundlegende Klassifizierung der Austaktungsprobleme lässt sich mit Blick auf Eigenschaften der Fließlinie sowie der Produkte weiter untergliedern.

Ein weiterer Aspekt, der unabhängig von der Fließlinie sowie den Produkten zur Differenzierung der unterschiedlichen Austaktungsprobleme herangezogen werden kann, ist die *Zielsetzung*, anhand derer die Austaktung der Linie vorgenommen wird. In der Literatur haben sich hier vier Grundtypen durchgesetzt, welche ursprünglich im Kontext des SALBP entwickelt wurden (u. a. Baybars 1986; Boysen et al. 2007; Cao und Ma 2008; Domschke et al. 1997, S. 190; Scholl 1999, 25ff.): Typ I beschreibt die Austaktung mit dem Ziel, für eine gegebene Taktzeit der Linie die Anzahl der Arbeitsstationen zu minimieren. Typ II verfolgt die entgegengesetzte Zielstellung, indem für eine gegebene Stationsanzahl die Taktzeit minimiert wird. Austaktungsprobleme vom Typ F ermitteln für eine vorgegebene Taktzeit sowie eine vorgegebene Anzahl an Arbeitsstationen eine gültige Linienausstattung unter Berücksichtigung der übrigen Restriktionen. Austaktungsprobleme vom Typ E maximieren die Effizienz der Fließlinie unter der Prämisse variabler Taktzeit sowie variabler Stationsanzahl (s. Tabelle 1). Obwohl diese Grundtypen ursprünglich für den Anwendungsfall des SALBP entwickelt wurden, konnten diese auf den allgemeineren Fall des GALBP übertragen werden.

Tabelle 1: Übersicht über die Grundtypen des ALBP

		Stationsanzahl	
		gegeben	variabel
Taktzeit	gegeben	Typ F	Typ I
	variabel	Typ II	Typ E

Über diese Grundtypen des Austaktungsproblems hinaus existieren in der Literatur weitere Zielkriterien. Das von Kilbridge und Wester (1961) vorgeschlagene Balance Delay Kriterium (dt.: Bandwirkungsgrad) sowie die daraus abgeleitete Line Efficiency (Driscoll und Thilakawardana 2001) setzen die Summe der Leerlaufzeiten ins Verhältnis zur Durchlaufzeit der Gesamtlinie. Die Minimierung der Leerlaufzeiten einer Linie entspricht dem Ziel der Produktivitätsmaximierung. Eine weitere Gruppe von Zielkriterien fokussiert nicht Leerlaufzeiten, sondern die gleichmäßige Verteilung der Arbeitsinhalte über alle Stationen der Fließlinie und wird als vertikale Glättung (engl.: Vertical Smoothing) bezeichnet. Beispiele hierfür sind der Smoothness Index (Moodie und Young 1965), die Mean Absolute Deviation (Rachamadugu und Talbot 1991) sowie das Vertical Balancing (Merengo et al. 1999). Wird eine gleichmäßige Verteilung der Arbeitsinhalte über die gesamte Linie erreicht, für die die Arbeitsinhalte aller Stationen geringer als die Taktzeit sind, so können auch diese Zielkriterien zu einer Produktivitätsverbesserung führen, indem die Taktzeit reduziert werden kann.

Weitere Ziele, unter denen eine Linien austaktung vorgenommen werden kann, ergeben sich aus einer direkten betriebswirtschaftlichen Betrachtungsweise des Austaktungsproblems. Werden bspw. für die eingesetzten Mitarbeiter, Arbeitsstationen, Betriebsmittel etc. Kostenätze bei der Modellierung hinterlegt, so können die Grundtypen auch durch die Zielstellung der Kostenminimierung abgebildet werden. Werden darüber hinaus auch Umsätze durch die hergestellten Produkte modelliert, lässt sich die Linien austaktung als eine Profitmaximierung abbilden. (bspw. Altemeier 2009; Amen 2000; Cakir et al. 2011; Giard und Jeunet 2010; Hazir et al. 2014)

2.1.2. Austaktung von Variantenfließlinien

Bei der vorangegangenen Vorstellung der Lösungsverfahren des Austaktungsproblems wurde implizit davon ausgegangen, dass dem Optimierungsproblem ein Vorranggraph mit entsprechenden Arbeitsinhalten für die jeweiligen zuzuordnenden Arbeitsvorgänge zugrunde liegt. Betrachtet man die Variantenfließfertigung, bei der unterschiedliche Varianten eines Produktes oder ggf. sogar unterschiedliche Produkte gemeinsam auf einer Fließlinie hergestellt werden, so ist offensichtlich nicht davon auszugehen, dass die Gesamtheit dieser unterschiedlichen Produkte den gleichen Vorranggraphen mit identischen Arbeitsinhalten aufweist. Vielmehr zeichnet sich nahezu jede Variante durch mindestens eine Abweichung aus, sei es durch einen unterschiedlichen Arbeitsinhalt für einen ansonsten vergleichbaren Arbeitsvorgang, durch zusätzliche oder entfallende Arbeitsvorgänge oder durch geänderte Vorrangrestriktionen zwischen einzelnen Arbeitsvorgängen. Folglich liegt für die Austaktung bei Variantenfließfertigung nicht nur ein einzelner Vorranggraph, sondern eine Vielzahl dieser vor, sodass geeignete Lösungsansätze benötigt werden, die mit diesen Ausgangsdaten eine Linien austaktung bestimmen können.

2.1.2.1. Lösungsansätze der Austaktung

Einen möglichen Ansatz dazu stellt die Einzelaustaktung dar. Dabei wird wie auch im Fall der Einprodukt-Fließfertigung das Austaktungsproblem individuell für jede Variante gelöst, sodass für P verschiedene Varianten P verschiedene Zuordnungen von Arbeitsvorgängen zu den Arbeitsstationen vorliegen. Dem Vorteil, dass so eine optimale Austaktung je Variante

bestimmt wird, stehen zwei zentrale Nachteile gegenüber: Erstens können Arbeitsvorgänge, die für unterschiedliche Varianten gleich sind, unterschiedlichen Arbeitsstationen zugewiesen werden. Daher müssen die für diese Vorgänge benötigten Betriebsmittel redundant beschafft und mehreren Stationen zugeteilt werden und auch die Materialbereitstellung der benötigten Komponenten muss an mehreren Stationen erfolgen, was zu deutlich höheren (finanziellen) Aufwänden führt. Zweitens konterkariert diese Austaktung den Vorteil der Artteilung, nämlich, dass die Mitarbeiter in den einzelnen Stationen auf die Ausführung bestimmter Vorgänge spezialisiert sind. Der permanente Wechsel auszuführender Arbeitsvorgänge führt zu dem Verlust von Lerneffekten und birgt darüber hinaus ein erhöhtes Fehlerrisiko. (u. a. Boysen 2005, S. 136; Decker 1993, 34f.; Domschke et al. 1997, S. 251)

Um diese Nachteile zu vermeiden, erfolgt in der Regel eine Austaktung anhand einer mittleren Variante, die das gesamte auf der Fließlinie herzustellende Produktspektrum widerspiegelt³. Die mittlere Variante muss dazu alle Arbeitsvorgänge umfassen, die zur Herstellung der unterschiedlichen Varianten und Produkte notwendig sind, und sämtliche Vorrangrestriktionen zwischen diesen abbilden. Dazu wird ein kombinierter Vorranggraph gebildet, indem die Vorranggraphen der unterschiedlichen Varianten zusammengeführt werden. Dazu werden zunächst sämtliche Knoten V_p (Arbeitsvorgänge) und sämtliche Kanten E_p (Vorrangrestriktionen) der variantenspezifischen Graphen in den kombinierten Vorranggraphen übernommen. In einem zweiten Schritt werden redundante Kanten entfernt. (Boysen 2005, S. 138; Thomopoulos 1967)

$$V = \bigcup_P V_p$$

$$E = \bigcup_P E_p \setminus \{\text{redundante Pfeile}\}$$

Voraussetzung dafür ist, dass Arbeitsvorgänge gleichen Inhalts bei den unterschiedlichen Varianten gleich benannt sind, damit diese als ein Vorgang in dem kombinierten Vorranggraphen aufgenommen werden. Führen die Vorranggraphen unterschiedlicher Varianten dazu, dass in dem kombinierten Vorranggraphen Zyklen auftreten⁴, so müssen diese Arbeitsvorgänge verdoppelt werden, um eindeutige Vorrangbeziehungen und damit einen zyklensfreien Graphen zu garantieren. (Boysen 2005, S. 139; Thomopoulos 1970) In einem letzten Schritt sind die variantenabhängig schwankenden Arbeitsinhalte der Arbeitsvorgänge kombinierten Vorranggraphen zu bestimmen. Dazu werden die in dem betrachteten Planungshorizont herzustellenden Mengen der Varianten b_p ausgewertet und die Arbeitsinhalte $t_{i,p}$ entsprechend mit diesen Häufigkeiten gewichtet und durch die Gesamtnachfrage dividiert (Boysen 2005, S. 138; Decker 1993, S. 33):

³ Der ebenfalls in der Literatur betrachtete Fall der Austaktung anhand der Maximalvariante wird im weitem nicht betrachtet, da dieses Vorgehen zu bedeutenden Leerlaufzeiten in der Variantenfließlinie führt und somit keine Praxisrelevanz besitzt.

⁴ Bspw., weil bei einer Variante i der Vorgang k vor Vorgang l , bei einer anderen Variante j jedoch Vorgang l vor Vorgang k durchgeführt werden muss.

$$\bar{t}_i = \frac{\sum_{p=1}^{|P|} b_p \cdot t_{i,p}}{\sum_{p=1}^{|P|} b_p} \quad \forall i \in V$$

Ist die Bestimmung des kombinierten Vorranggraphen abgeschlossen, so liegt eine Problemstellung für die Austaktung einer Variantenfließlinie vor, die identisch zu der des Einproduktfalls ist. Eine solche losgelöste Betrachtung blendet jedoch aus, dass durch die betrachtete mittlere Variante die tatsächlichen Auslastungen der Arbeitsstationen aufgrund der hergestellten Variante stark schwanken können. Folglich kann die bestimmte Austaktung zwar einerseits im Mittel optimal sein, sich andererseits jedoch aufgrund der tatsächlichen Produktionsreihenfolge als ineffizient herausstellen. Anders als im Fall der Einprodukt-Fließlinie spiegelt das Austaktungsdiagramm für eine Variantenfließlinie nur den langfristigen mittleren, d. h. eingeschwungenen Auslastungszustand der Arbeitsstationen für einen konstanten Typ-Mengen-Mix wieder. Verändert sich letzterer, ergibt sich daraus eine neue mittlere Variante, sodass die Linienaustaktung nicht mehr gültig ist bzw. zu Über- oder Unterlastungen einzelner Stationen führt. Der gleiche Effekt tritt auch bei der Betrachtung eines kurzen Zeithorizonts auf, innerhalb dessen die Produktionssequenz der Varianten nicht der mittleren Variante entspricht. Während im erstgenannten Fall eine neuerliche Austaktung der Linie zu einer Reduktion der Über- bzw. Unterlastsituationen führt, müssen im Fall kurzfristiger Überlastsituationen diese durch operative Maßnahmen ausgeglichen werden.

2.1.3. Dynamische Austaktung

Alle klassischen Lösungsansätze, ob für Einproduktfall oder Variantenfließlinie und unabhängig von den betrachteten Zielkriterien oder Restriktionen, behandeln die Problemstellung der Linienaustaktung als eine statische und deterministische Planung, die situativ durchgeführt wird. Auslöser zur Durchführung der Austaktung sind dabei u. a. die erstmalige Einplanung einer Variante, das Auftreten von Stückzahländerungen, die eine Anpassung der Taktzeit erfordern, oder Änderungen an der Fließlinie selbst (Bullinger 1986, 236f.). Eine steigende Variantenanzahl führt also einerseits zu der Notwendigkeit, die Austaktung häufig anzupassen, und andererseits zu einer komplexen Reihenfolgeplanung, um die variantenspezifisch unterschiedlichen Umfänge der Arbeitsvorgänge und -inhalte auszugleichen. Diesen Nachteilen zu begegnen ist das Ziel der folgend dargestellten Ansätze.

Das von Ostolaza et al. (1989), McClain et al. (1992) sowie Gel et al. (2002) betrachtete Dynamic Line Balancing (DLB) verfolgt das Ziel, die Produktivität einer Fließlinie zu maximieren, deren Arbeitsstationen durch Puffer entkoppelt sind. Wesentliches Charakteristikum des DLB ist, dass zwischen festen und geteilten Arbeitsvorgängen unterschieden wird (Ostolaza et al. 1989). Sind an einer Station j alle festen Vorgänge ausgeführt, unterstützen die Mitarbeiter dieser Station die Nachbarstation $j + 1$ bei der Durchführung der noch auszuführenden geteilten Vorgänge (ebd.). Während ursprünglich die Arbeitsreihenfolge durch die Puffer verändert werden kann (ebd.), was zu weiteren Produktivitätsverbesserungen führt, zeigen McClain et al. (1992), dass DLB auch für eine strikte FIFO-Steuerung⁵ und eine fast vollständige Aufhebung der Entkopplung durch Puffer, also Bedingungen, die mit einer

⁵ Die Steuerung nach dem First In First Out (FIFO) Prinzip besagt, dass die Bearbeitungsreihenfolge einmalig festgelegt wird und während der Bearbeitung nicht mehr geändert werden kann.

getakteten, starr verketteten Fließlinie vergleichbar sind, zu Produktivitätsverbesserungen führt. Wesentliche Voraussetzung für DLB ist eine hohe Flexibilität der Mitarbeiter hinsichtlich der auszuführenden Arbeitsvorgänge und ein hoher Übungsgrad, um Schwankungen bei der Ausführung dieser zu minimieren (Gel et al. 2002).

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Bartholdi und Eisenstein (1996) bzw. Bartholdi et al. (1999) mit dem Konzept der Bucket Brigade. Grundlage dieses Ansatzes ist, dass die Fließlinie nicht ausgetaktet wird, sondern sich autonom einschwingt. Dies wird dadurch erreicht, dass die Mitarbeiter der Linie solange ein Produkt bearbeiten und sich mit diesem entlang der Fließlinie bewegen, bis sie auf den nächsten freien Mitarbeiter treffen. Das Produkt wird an diesen übergeben und der nun freie Mitarbeiter bewegt sich solange in der Linie zurück, bis er auf den ersten Mitarbeiter trifft, der ein Produkt bearbeitet. Auch hier erfolgt eine Übergabe des Produktes, sodass der nun frei gewordene Mitarbeiter sich seinerseits in der Linie zurückbewegt und das nächste Produkt des vorgelagerten Mitarbeiters übernimmt. (ebd.) Somit existiert keine feste Zuordnung von Arbeitsinhalten und Mitarbeitern zu Arbeitsstationen, vielmehr bildet sich diese im operativen Betrieb durch das Einschwingen der Linie in einen stabilen Zustand. Die Anforderungen an den Übungsgrad der Mitarbeiter sind aufgrund der nicht vorhandenen Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Stationen bzw. Mitarbeitern jedoch als noch höher einzuschätzen als im Falle des DLB. Aufgrund des geringen resultierenden Planungsaufwandes stellt die Bucket Brigade darüber hinaus einen geeigneten Ansatz für den Übergang einer verrichtungsorientierten hin zu einer flussorientierten Fertigung dar. (Bartholdi und Eisenstein 2005)

Das Konzept der dynamischen Austaktung, das von Reinhart und Pröpster (2012) vorgestellt und von März et al. (2012), Pröpster et al. (2013) sowie März (2015) detailliert wird, zielt auf eine flexible Reaktion bei Nachfrageschwankungen, die durch die Kombination von Taktszenarien und variantenspezifischer Austaktung erreicht werden soll. Erstere dienen dazu, Stückzahlschwankungen zu antizipieren, letztere ermöglicht eine Reaktion auf einen sich ändernden Typ-Mengen-Mix. Für die variantenspezifische Austaktung werden die Arbeitsvorgänge in variantenneutrale und variantenspezifische unterteilt. Variantenspezifische Inhalte werden zu Variantenstationen zusammengefasst, sodass im Falle von Änderungen im Typ-Mengen-Mix ausschließlich diese Stationen betrachtet werden müssen. Grundsätzlich verwenden die Autoren jedoch keine Ansätze des Operations Research (vgl. oben) zur Lösung des Austaktungsproblems, sondern führen diese manuell unter Einbindung von Experten durch und unterstützen den Austaktungsprozess durch Simulationsstudien zur Bewertung des Austaktungsergebnisses. (ebd.)

Während also der Ansatz der dynamischen Austaktung darauf beruht, ex ante mögliche Lösungen des Austaktungsproblems zu antizipieren und bei Bedarf Anpassungen in den Variantenstationen vorzunehmen, verfolgt Altemeier (2009) den Ansatz einer kontinuierlichen Adaption der Austaktung, ausgehend von der Initialaustaktung, welche für einen definierten Typ-Mengen-Mix bestimmt wurde. Die von ihm vorgeschlagene Methodik evaluiert die Auslastungssituation für das geplante Produktionsprogramm (Altemeier 2009, 79f.). Zur Rekonfiguration verwendet Altemeier ein Entscheidungsunterstützungssystem, da die kostenoptimale Rekonfiguration der Fließlinie zu komplex für einen OR-basierten Ansatz ist

(Altemeier 2009, 77f.). Die Anpassung der Austaktung an ein verändertes Produktionsprogramm erfolgt durch die drei Schritte Reparieren, Komprimieren und Antizipieren. Während beim Reparieren reihenfolgebedingte Überlastsituationen durch die Zuweisung zusätzlicher Mitarbeiter behoben werden, wird beim Komprimieren die Austaktung so angepasst, dass die hinzugefügten Arbeiter bestmöglich ausgelastet sind bzw. ein Mitarbeiter eingespart werden kann. Im letzten Schritt sollen durch das Antizipieren Unterstützereinsätze reduziert werden, indem Übertaktzeiten minimiert werden. (Altemeier 2009, 81ff.)

Sowohl das DLB als auch die Bucket Brigade versuchen, die reihenfolgeabhängigen Schwankungen durch eine Flexibilisierung der Mitarbeiterzuordnung zu lösen und somit die Produktivität der Fließlinie ohne weitere Planungsschritte bzw. Anpassungen der Austaktung bzw. Reihenfolge zu optimieren. Dem reduzierten Planungsaufwand steht eine ebenfalls reduzierte Planungssicherheit gegenüber, da die belastungsbezogenen Auswirkungen von der Produktionsreihenfolge nicht antizipiert werden. Demgegenüber verfolgen das Konzept der dynamischen Austaktung nach Reinhart und Pröpster (2012) sowie die kostenoptimale Rekonfiguration einen planungsgetriebenen Ansatz zur Reduktion der Variabilitätsauswirkungen, jedoch wird die Durchführung der Planungsschritte in beiden Fällen durch Experten durchgeführt, anstelle ein. Darüber hinaus basiert die dynamische Austaktung auf prognostizierten Stückzahl- sowie Typ-Mengen-Mix-Szenarien, welche insbesondere bei stark diversifizierten Produktspektren nur mit geringer Sicherheit zu ermitteln sind. Die kostenoptimale Rekonfiguration hingegen verwendet keine übergeordneten Planungsprämissen, sondern reagiert ausschließlich auf Abweichungen des tatsächlichen vom ursprünglich geplanten Typ-Mengen-Mix. Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass die vorgestellten Ansätze zwar versuchen, den Auswirkungen einer zunehmenden Diversifizierung des Produktspektrums entgegenzuwirken, indem die Austaktung geplant oder dezentral angepasst wird. Jedoch sind diese als reaktive Ansätze anzusehen, welche nicht versuchen, die Austaktung durch eine strukturierte Analyse der variabilitätsverursachenden Einflussgrößen zu verbessern.

2.2. Fazit des Stands der Technik

Wie die Darstellung des Stands der Technik zeigt, existieren unterschiedliche Planungsmodelle zur Gestaltung von Fließmontagelinien, welche die zentralen Aufgabenstellungen im Rahmen der Gestaltung abdecken, insbesondere die Bestimmung der Austaktung, welche im Wesentlichen die Produktivität und Effizienz der Fließlinie definiert. Vor diesem Hintergrund ist es wenig überraschend, dass die Lösung des Austaktungsproblems in der Literatur seit ca. 60 Jahren detaillierte Betrachtung erfährt. Wie dargelegt erlauben die entwickelten Ansätze die Betrachtung und Lösung einer großen Bandbreite an Anwendungsfällen. Auch wenn das abbildbare Spektrum von einfachen Ein-Produkt-Linien bis hin zu Variantenfließlinien mit parallelen Stationen und detaillierten Restriktionen hinsichtlich Betriebsmitteln oder Flächen für die Materialbereitstellung reicht und die entwickelten Verfahren in der Lage sind, diese Problemstellungen mit vertretbarem Berechnungsaufwand zu lösen, stellen u. a. Falkenauer (2005) und Altemeier et al. (2010) fest, dass die Ansätze in der Praxis kaum einsetzbar sind. Die Gründe hierfür sind zum einen in der Komplexität praxisrelevanter Problemstellungen zu

finden. Bspw. erfordern diese die gleichzeitige Betrachtung nahezu aller in der Literatur untersuchter Restriktionen und darüber hinaus die Integration weiterer, bisher nicht betrachteter Restriktionen wie bspw. ergonomische Bewertungen von Arbeitsvorgängen. Zum anderen verhindern auch die Lösungsverfahren eine breitere Anwendung in der Praxis.

Die vorgestellten Arbeiten zur Lösung des Austaktungsproblems konzentrieren sich darauf, Algorithmen zu entwickeln, um die formalisierte Problemstellung möglichst effektiv und effizient zu lösen – also möglichst das globale Optimum zu identifizieren und dazu einen möglichst geringen Berechnungsaufwand zu benötigen. Ein Aspekt, der dabei vollständig ausgeblendet wird, stellt die grundsätzliche Auswirkung der steigenden Variantenzahl auf die bestmögliche Austaktung dar. Wie dargestellt, führt diese zu einer steigenden Anzahl unterschiedlicher Arbeitsvorgänge mit unterschiedlichen Arbeitsinhalten, Vorrangbeziehungen, Betriebsmittelanforderungen etc. Die Ansätze der Austaktung bei Variantenfließfertigung betrachten diese jedoch nicht gesondert. Vielmehr werden mittlere Varianten und kombinierte Vorranggraphen gebildet, deren Übertragbarkeit auf das tatsächliche Produktionsprogramm mit zunehmender Variantenzahl abnimmt, sodass reihenfolgebedingte Belastungsschwankungen sowie Unterstützereinsätze zunehmen und die Flexibilität bei der Reihenfolgebildung eingeschränkt wird, um solche Schwankungen durch eine geeignete Reihenfolge auszugleichen. Bereits Bullinger (1986, 240ff.) und Falkenauer (2005) stellen dieses als einen zentralen Nachteil heraus, der jedoch weder durch die Entwicklung neuer geeigneter Planungsmodelle der Variantenfließfertigung noch Lösungsverfahren zu deren Austaktung adressiert wurde.

3. Konzeption der Methodik

Im Weiteren wird die Methodik zur Lösung der herausgearbeiteten Problemstellung hergeleitet. Die Variantenfließfertigung erlaubt die Produktion aller betrachteten Produkte bzw. Varianten auf der Linie, ohne, dass die Linie darauf angepasst werden muss, indem anhand einer mittleren Variante als Referenzprodukt ausgetaktet wird. Dieses Referenzprodukt kann bspw. basierend auf historischen Daten bestimmt werden, d. h. in Abhängigkeit der Häufigkeit mit der Kunden in der Vergangenheit ein bestimmtes Produkt bzw. eine bestimmte Variante bestellt und durch bestimmte Optionen individualisiert haben. Gegenüber der Variantenfließfertigung werden bei der Mehrprodukt-Fließlinie identische Produkte losweise hergestellt, wobei die Linie zwischen den einzelnen Losen umgerüstet wird, da die Austaktung für jedes einzelne Produkt optimiert wird. Eine direkte Übertragung dieses Ansatzes auf einen Anwendungsfall im Umfeld von KMU mit hoher Produkt- bzw. Variantenzahl ist im Sinne der zuvor dargestellten betriebswirtschaftlichen Anforderungen nicht zielführend, da sehr hohe Rüstaufwände resultieren (u. a. Decker 1993, 34f.). Die Methodik der familienbezogenen Austaktung führt beide Ansätze zusammen, indem Produktgruppen gebildet werden, für die die Linien-austaktung nach dem Ansatz der Mehrprodukt-Fließfertigung optimiert wird. Innerhalb jeder Produktgruppe können die Produkte wie im Fall der Variantenfließlinie in beliebiger Reihenfolge hergestellt werden, beim Wechsel zwischen den einzelnen Gruppen fallen jedoch Rüstaufwände an.

Die aus diesem Ansatz resultierende Planungssystematik der familienbezogene Austaktung (s. Abbildung 2) umfasst drei Handlungsfelder, welche wie auch bei den Planungssystematiken nach Boysen (2005), Boysen et al. (2009b) oder Decker (1993) unterschiedliche Fristigkeiten in den Schritten im Planungsprozess abdecken.

Zentrale Aufgabe und erstes Handlungsfeld ist es, solche Produktgruppen zu identifizieren bzw. zu bilden, deren Gruppenmitglieder eine Austaktung mit geringen Effizienzverlusten erlauben, da diese Mitglieder sich hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Austaktung ähnlich sind, ohne dass eine zu große Anzahl an Gruppen mit entsprechend hohen Rüstaufwänden gebildet würde. Der Planungshorizont dieses Schrittes ist langfristig, da zu erwarten ist, dass sich die Ähnlichkeitsstruktur des Produktspektrums nur durch die Einführung vollständig neuer Produktmodelle grundlegend ändert. Die Einführung neuer Varianten bestehender Produktmodelle hingegen führen tendenziell nur zu leichten Verschiebungen der identifizierten Produktgruppen. Folglich wird der Planungsschritt der Gruppenbildung nur in langen Zeitintervallen bzw. bei Bedarf aufgrund der Einführung neuer Produkte wiederholt. Der Betrachtungsgegenstand dieses Planungsschrittes beschränkt sich auf die Produkt- und Prozessinformationen.

Das zweite Handlungsfeld adressiert die Entwicklung einer Teilmethodik zur Lösung des Austaktungsproblems für die zuvor gebildeten Produktgruppen. Hierbei handelt es sich um einen Planungsschritt mit mittelfristigem Zeithorizont. Nach der erstmaligen Bestimmung der Austaktung existieren zwei wesentliche Auslöser für diesen Planungsschritt. Zum einen erfordert die Einführung neuer Produkte oder Produktvarianten eine Adaption der Austaktung bspw. an erstmalig auftretende Arbeitsvorgänge oder veränderte Ausführungszeiten bereits bestehender Arbeitsvorgänge. Zum anderen können signifikante Veränderungen in den Absatzmengen einerseits und dem Typ-Mengen-Mix andererseits eine erneute Austaktung der Fließlinie erforderlich machen (s. auch März 2015). Aufgrund der disjunkten Betrachtung des Austaktungsproblems für die unterschiedlichen Produktgruppen erfolgt eine erneute Austaktung situativ ausschließlich für die von den Änderungen betroffenen Gruppen. Betrachtungsgegenstand sind hierbei somit die Fließlinie und die Arbeitsvorgänge mit den jeweiligen Arbeitsinhalten sowie deren weiteren mit Blick auf den Detaillierungsgrad erforderlichen Charakteristika.

Das dritte und letzte Handlungsfeld betrachtet die Überführung der zuvor gebildeten Produktgruppen mit den korrespondierenden Linien austaktungen in den operativen Betrieb der Fließlinie. Ziel der dazu entwickelten Teilmethodik ist die Bestimmung der optimalen Produktionsreihenfolge der unterschiedlichen Produktgruppen vor dem Hintergrund der Rüstaufwände und der Kundennachfrage nach Produkten der einzelnen Gruppen. Hierbei handelt es sich um den Planungsschritt mit dem kürzesten Zeithorizont. In Abhängigkeit der Auftragsvorschau müssen die eingehenden Kundenaufträge im Rahmen einer rollierenden Planung den Gruppen zugewiesen und in eine Produktionsreihenfolge innerhalb der Gruppen überführt werden. Die genannten Kundenaufträge sowie die Fließlinien austaktung stellen hier somit die wesentlichen Betrachtungsgegenstände dar.

Durch diese modulare Strukturierung der Planungssystematik in geschlossene, aufgabenspezifische Teilmethodiken wird der zentralen Forderung nach einer anwendungsfallneutralen Gestaltung der Gesamtmethodik begegnet. Entsprechend den Randbedingungen des jeweiligen Anwendungsfalls ist eine aufwandsarme Adaption der einzelnen Teilmethodiken gewährleistet. In den nächsten Abschnitten werden die Anforderungen an die hier eingeführten Teilmethodiken herausgearbeitet und die verwendeten Lösungsansätze konzipiert.

4. Umsetzung der Methodik in einem Software-Werkzeug

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Methodik zur familienbasierten Austaktung von Variantenfließlinien wurde in zwei separaten Software-Werkzeugen, die optional miteinander gekoppelt werden können, prototypisch umgesetzt. Diese werden in den folgenden Abschnitten näher dargestellt.

4.1. Umsetzung der Methodik zur Bildung von Austaktungsfamilien

Sämtliche erforderlichen Prozesse zur Bildung der Austaktungsfamilien wurden in der Software „RapidMiner“ (Version 7.3) realisiert. Hierbei handelt es sich um eine lizenzfreie Software zur Untersuchung von Data Mining Fragestellungen. Darüber hinaus sind bereits viele der grundlegenden Data Mining Algorithmen implementiert und können an die jeweilige Aufgabenstellung angepasst werden. Solche Umfänge, die nicht implementiert sind, können durch Erweiterungen bspw. in Java, Python oder R individuell integriert werden.

Die Umsetzung der Gesamtmethodik zur Familienbildung wurde modular in drei Teilprozessen umgesetzt: Der Datenvorverarbeitung, der eigentlichen Familienbildung und -bewertung sowie der Einordnung neuer Erzeugnisse in die bestehende Familienstruktur. Diese drei Teilprozesse werden nachfolgend dargestellt.

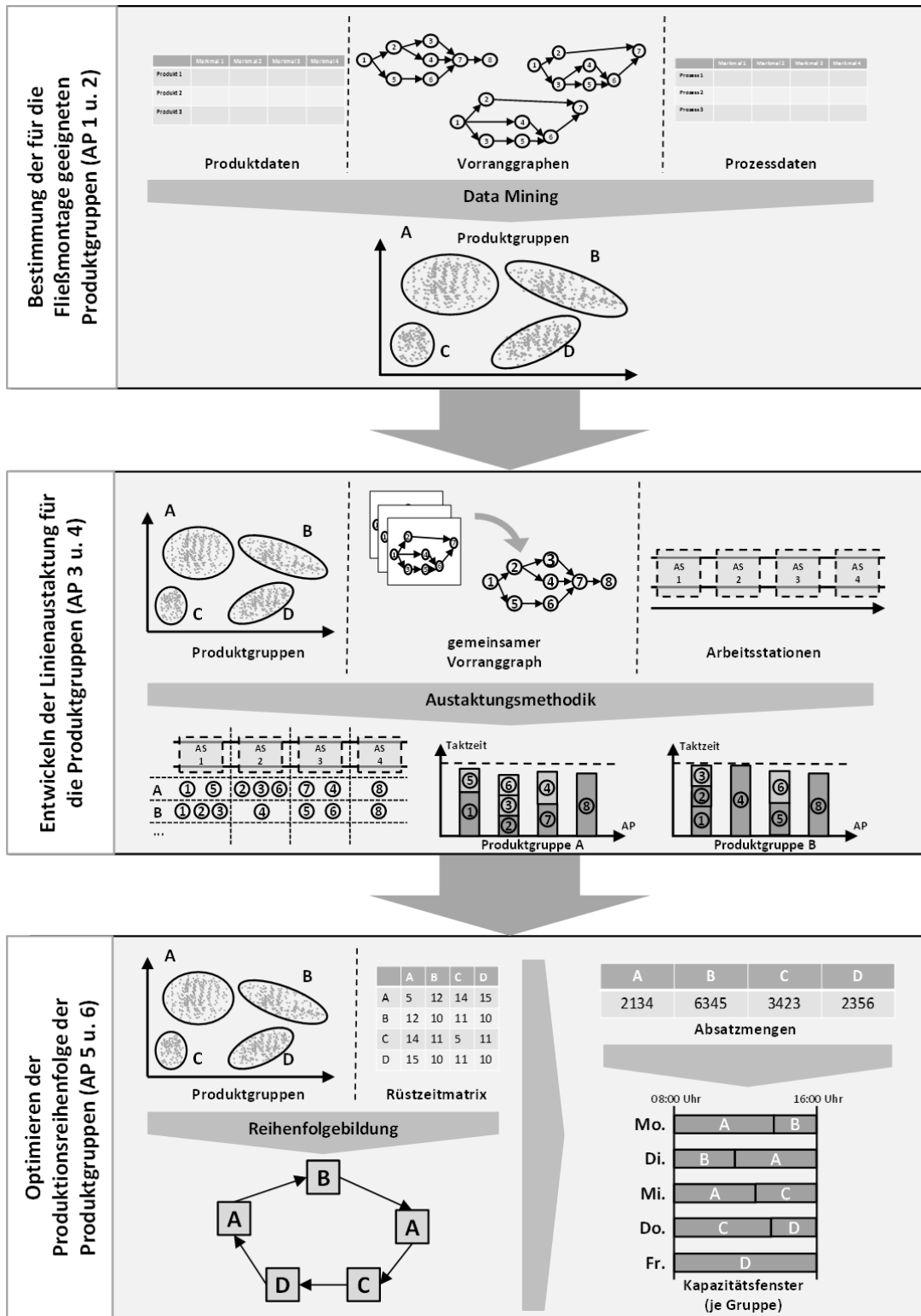


Abbildung 2: Planungssystematik der familienbasierten Ausstattung

4.1.1. Teilprozess 1: Datenvorverarbeitung

Ausgangspunkt für den Prozess zur Datenvorverarbeitung sind die zuvor zu importierenden Daten. Der Prozess setzt voraus, dass sämtliche Daten die in Abbildung 3 dargestellte Struktur haben. Die unterschiedlichen Beispieldatensätze, d.h. die Zeileneinträge in der Rohdatenmatrix, können jedoch in unterschiedlichen Datentabellen vorliegen.

Erzeugnisse	Produkttyp	Prozess 1	Prozess 2	Prozess 3	Prozess 4	...	Option_1	Option_2	...
Erzeugnis_1	Typ_1	9.4041459	4.42290941	0.30850303	0.33124897	...	0	1	...
Erzeugnis_2	Typ_2	3.14092499	0.38110126	0.43180414	0.25526078	...	0	1	...
Erzeugnis_3	Typ_3	0.11498893	11.833666	1.68212095	0.37638663	...	0	1	...
Erzeugnis_4	Typ_1	0.54931155	1.09169365	7.92293644	1.32977582	...	0	1	...
Erzeugnis_5	Typ_2	7.52364806	0.23669098	10.19555	2.9782396	...	0	1	...
Erzeugnis_6	Typ_3	6.16296975	6.48161227	0.1924019	4.54186331	...	1	0	...
Erzeugnis_7	Typ_1	0.7667961	7.92869335	0.28386843	10.8340823	...	0	1	...
Erzeugnis_8	Typ_2	1.14893275	0.06274724	4.89069106	4.57529481	...	0	0	...
Erzeugnis_9	Typ_3	1.43755111	4.75075622	7.35215853	9.3285646	...	1	1	...
Erzeugnis_10	Typ_1	3.23230503	9.55871765	0.66238715	0	...	0	0	...
Erzeugnis_11	Typ_2	2.01719801	9.08554302	9.10496444	0	...	0	0	...
Erzeugnis_12	Typ_3	7.9399046	2.10271215	0	0	...	0	0	...

Abbildung 3: Struktur importierter Daten zur Familienbildung

Der Prozess der Datenvorverarbeitung kann vollständig auf Basis der bereits in RapidMiner implementierten Funktionalitäten abgebildet werden. Zunächst wird die Datenbasis zur weiteren Verarbeitung geladen, indem sämtliche in einem anzugebenden Ordner bereitgestellten Datensätze gelesen und in einen Gesamtdatensatz zusammengeführt werden. Dieser stellt die Basis für alle weiteren Analyseschritte dar.

Der erste eigentliche Vorverarbeitungsschritt führt eine Fehlwertbereinigung durch, indem solche Beispieldatensätze, die Fehlwerte aufweisen, aus dem Gesamtdatensatz entfernt werden. Anschließend erfolgt die Konvertierung des Attributs „Produkttyp“ von nominalem in binäres Skalenniveau indem Dummy-Variablen entsprechend der Anzahl enthaltener unterschiedlicher Produkttypen gebildet werden. Der letzte Schritt der Datentransformation ist die Normierung der Arbeitsinhalte für die verschiedenen Prozesse. Hierzu wird die implementierte Range Transformation verwendet. Dieser vereinheitlichte Datensatz wird in der Folge an den Subprozess der Ausreißerererkennung und -beseitigung übergeben.

Die Ausreißeridentifikation wird anhand der Local Outlier Probability durchgeführt. Als hierbei zu verwendendes Distanzmaß wird die Euklidische Distanz verwendet. Das zur Ausreißerererkennung entwickelte Modell wird zusammen mit der Ausreißerwahrscheinlichkeit für jedes Beispiel für nachgelagerte Analysen in der Datenbank gesichert, während der Prozess im Anschluss an die Ausreißerererkennung automatisch solche Beispiele aus dem Gesamtdatensatz löscht, die eine Ausreißerwahrscheinlichkeit von über 90% aufweisen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das Modell zur Ausreißerererkennung anhand der gespeicherten Daten (s.o.) für neue Datensätze auf seine Akkuranz hin zu validieren ist. Sollte der Datensatz Attribute enthalten, die eine Verzerrung der tatsächlichen Ausreißerwahrscheinlichkeiten bewirken würden, können diese vor der Ausreißerererkennung entfernt und im Nachgang wieder hinzugefügt werden.

Als letzter Subprozess der Datenvorverarbeitung wird der um die Ausreißer reduzierte Datensatz an die Hauptkomponentenanalyse weitergeleitet. Diese analysiert den Datensatz hinsichtlich der Korrelation der einzelnen Attribute und bildet so viele Faktoren, dass eine Varianz von 95% im Datensatz erklärt wird. Auch hier besteht die Möglichkeit, solche Attribute im Vorhinein manuell aus dem Datensatz zu entfernen, von denen bekannt ist, dass diese eine sehr hohe Korrelation haben, um die Berechnungsdauer der Hauptkomponentenanalyse zu reduzieren. Wird dies gemacht, kann jedoch ohne zuvor gesonderte Analysen keine Aussage mehr darüber getroffen werden, wie hoch die Varianzaufklärung der durch die Hauptkomponentenanalyse gebildeten Faktoren in Bezug auf den ursprünglichen Datensatz ist. Im Anschluss an die erfolgreiche Dimensionsreduktion mittels der Hauptkomponentenanalyse wird der Datensatz in der Datenbank für die weitere Verwendung abgelegt.

4.1.2. Teilprozess 2: Familienbildung und -bewertung

Der Teilprozess der Familienbildung greift auf den vorverarbeiteten Datensatz zu und bestimmt für die enthaltenen Erzeugnisse die bestmögliche Einteilung in Austaktungsfamilien. Anders als in dem Prozess der Datenvorverarbeitung stellt RapidMiner nicht alle für die Familienbildung erforderlichen Funktionalitäten bereit, sodass diese zusätzlich implementiert wurden. Hierzu wurde die Schnittstelle zwischen RapidMiner und dem Statistikprogramm R verwendet. Letzteres ist dabei genau wie RapidMiner ohne Lizenzgebühren zu beziehen und kann zur individuellen Programmierung von Analyseskripten verwendet werden.

Die zur Bildung der Familien erforderlichen Berechnungsschritte untergliedern sich in zwei Subprozesse. Der erste Subprozess bestimmt den Erwartungswert für die ideale Partitionsgröße c^* . Hierzu wird ein R-Skript verwendet, das basierend auf den Bibliotheken „Stats“ sowie „GMD“ das hierarchische Clustering anhand der Algorithmen für Single-, Complete- und Average-Linkage sowie dem WARD-Algorithmus durchführt und mittels des Funktionsaufrufs „css“ die Summe der Fehlerquadrate für die unterschiedlichen Partitionsgrößen und mittels der Funktion „elbow“ den Schätzwert für c_h^* für jeden der zuvor genannten Clusteralgorithmen h bestimmt. Abschließend wird aus den unterschiedlichen Schätzwerten der im Weiteren zu verwendende Erwartungswert für c^* durch Mehrheitsvotum definiert. Ist das Mehrheitsvotum nicht eindeutig, da zwei oder mehr Partitionsgrößen mit gleicher Häufigkeit existieren, so wird die kleinste Partitionsgröße gewählt. Der Wert für c^* wird gespeichert und an den zweiten Subprozess, der die eigentliche Gruppenbildung durchführt, übergeben.

Dieser zweite Subprozess basiert bis auf die Funktion zur Bewertung der Clusteringgüte auf den bereits in RapidMiner vorimplementierten, konfigurierbaren Operatoren. Die iterative Bestimmung der Familienzuordnung für die unterschiedlichen Partitionsgrößen $[c_{min}, c_{max}]$, die von c^* abgeleitet werden, wird durch den Loop-Operator gesteuert. In jeder der so ausgelösten Iterationen wird mittels des k-Means Clustering-Operators die Familienzuordnung bestimmt und diese Information jedem Beispiel im Datensatz zugeordnet. Wie hergeleitet, wird die Euklidische Distanz als Distanzmaß verwendet. Zur Initialisierung der Clusterzuordnung wird der von Arthur und Vassilvitskii (2007) entwickelte Ansatz verwendet. Diese Initiallösung wird versucht, durch 1.000 Iteration zu bessern. Dieser Prozess wird 500 Mal wiederholt, um

die Ergebnisse gegen den Einfluss der zufälligen Initialisierung abzusichern. Die Bewertung der Clustergüte mittels des Wünschbarkeitsindex wurde erneut in Form eines R-Skripts umgesetzt und in RapidMiner integriert. Dieses liefert die Bewertungsergebnisse an den RapidMiner-Subprozess zurück, der die Güte der aktuellen Lösung mit der bisher bekannten besten Lösung vergleicht. Von der besten bekannten Lösung werden das jeweilige Modell der Clusterbildung, die Zuordnung der Erzeugnisse zu den jeweiligen Austaktungsfamilien sowie die Gütebewertung gespeichert. Nach dem Abschluss sämtlicher Iterationen wird die Familienzuordnung mit der besten Clustergüte in der Datenbank abgelegt. Der Prozess zur Bildung der Austaktungsfamilien endet mit diesem Schritt.

4.2. Umsetzung der Methodik zur familienbasierten Austaktung

Die Methodik zur Bestimmung der Austaktung der Fließlinie basierend auf den gebildeten Austaktungsfamilien wurde als Java-Applikation umgesetzt. Das entwickelte Graphical User Interface (GUI) stellt Abbildung 4 dar. Nach dem erfolgten Datenimport stellt die GUI die Informationen über die eingelesenen Produkttypen sowie den zugehörigen Arbeitsvorgängen dar. Dabei wird für jeden Arbeitsvorgang angegeben, ob dieser ausschließlich von einem Produkttyp oder von mehreren verwendet wird.

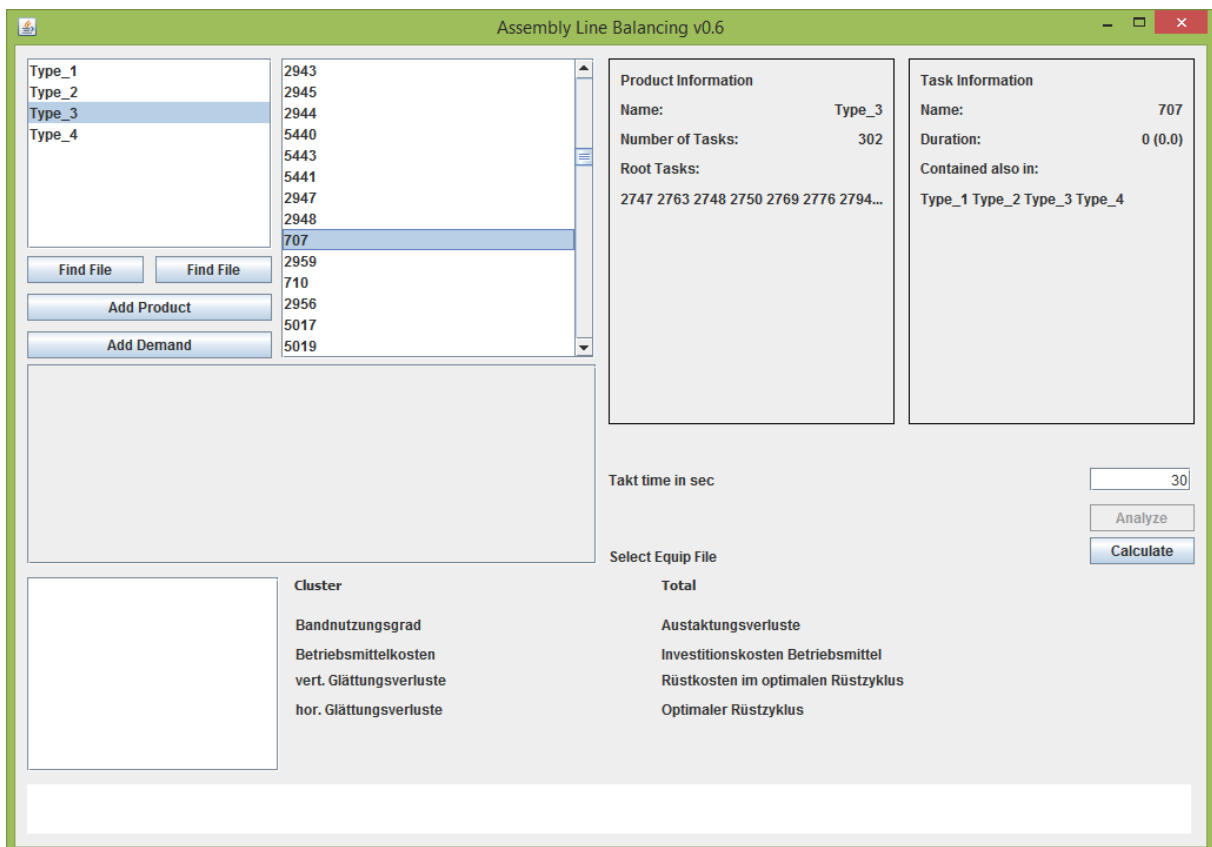


Abbildung 4: Graphical User Interface nach Datenimport

Nach dem Abschluss des vollständigen Datenimports kann durch den Benutzer die Taktzeit angegeben werden, für die die familienbasierte Austaktung der Fließlinie bestimmt werden soll. Nach Abschluss dieser Eingaben kann die Lösungsmethodik initiiert werden. Diese läuft ohne weitere Eingaben seitens des Benutzers automatisch ab und bestimmt das optimale

Ergebnis anhand der entwickelten Lösungsmethodiken für die Austaktung der Linie sowie Reihenfolge der einzelnen Austaktungsfamilien. Nach Abschluss sämtlicher Berechnungsschritte werden die Resultate in der Ergebniszusammenfassung ausgegeben. Die angezeigten Ergebnisse umfassen die Austaktungsdiagramme für jede einzelne Austaktungsfamilie, die eine graphische Analyse der Auslastung der einzelnen Arbeitsstationen erlauben. Des Weiteren wird eine Zusammenfassung über die einzelnen Zielkriterien der Optimierung, d.h. den realisierten Bandnutzungsgrad, Investitionskosten für Betriebsmittel sowie die Bewertung der horizontalen und vertikalen Glättung für jede Austaktungsfamilie ausgegeben. Das Gesamtergebnis der realisierten familienbasierten Austaktung wird anhand einer Kostenbewertung vorgenommen und ebenfalls dem Benutzer zusammen mit der optimalen Reihenfolge der Austaktungsgruppen angezeigt.

5. Validierung der Methodik

Die Validierung der Methodik wurde anhand eines realen Datensatzes von einem der im projektbegleitenden Ausschuss engagierten Unternehmen durchgeführt. Hier wurden zunächst die Daten der Produkte sowie Prozesse erfasst und nötigen Datenstrukturen aufgebaut. Erhoben wurden die Daten für insgesamt vier unterschiedliche Produkttypen. Diese können durch die Kunden anhand von ca. 400 unterschiedlichen Optionsausprägungen individualisiert werden. Die Produkte inklusive aller wählbaren Optionen werden durch insgesamt ca. 700 Arbeitsvorgänge beschrieben, die Standardvorgänge sowie optionsbasierte Arbeitsvorgänge enthalten. Des Weiteren unterscheiden sich die Arbeitsinhalte der einzelnen Arbeitsvorgänge teilweise in Abhängigkeit des Produkttyps.

Als Grundlage für die Anwendung der familienbasierten Austaktung wurde das Produktionsprogramm einer Woche erhoben, in der jedoch nicht alle Produkttypen produziert wurden. Vielmehr liegt eine starke Nachfrage nach einem Rennertypen vor. Zwei weitere Produkttypen wurden in sehr geringem Umfang nachgefragt, der letzte gar nicht. Die Anwendung der Methodik zur Bildung der Austaktungsfamilien lieferte eine optimale Strukturierung mit vier disjunkten Familien als Grundlage für die Austaktung. Die Nachfragemenge verteilt sich zu 41,09% auf Familie 1, 17,83% auf Familie 2, 24,81% auf Familie 3 und 16,28% auf Familie 4.

Aufgrund der Nachfragemenge und der zur Verfügung stehenden Nettobetriebszeit der Fließlinie wurde die familienbasierte Austaktung für eine Taktzeit von vier Zeiteinheiten durchgeführt. Die maximale Linienlänge wurde auf 17 Arbeitsstationen begrenzt. Als Referenz zur Bewertung der Eignung der familienbasierten Austaktung wird zunächst eine klassische Austaktung der Variantenfließlinie für die vorliegende Datenpopulation durchgeführt. Dazu wird der mittlere Typ für alle Erzeugnisse gebildet und als Grundlage für die Austaktung verwendet. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen werden hierzu die gleichen Algorithmen verwendet, die auch bei der familienbasierten Austaktung zur Bestimmung der familienindividuellen Austaktungslösungen eingesetzt werden. Die Zusammenfassung der anonymisierten Ergebnisse kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der anonymisierten Austaktungsergebnisse

	Referenzaustaktung	familienbasierte Austaktung	Veränderung
mittlerer Bandnutzungsgrad	93%	96%	3.0%
resultierende Effizienzverluste	8.33 €	4.99 €	-40.1%
Rüstaufwände (VO u. BM)	- €	0.98 €	
Investkosten f. Betriebsmittel	66.42 €	66.42 €	0.0%
hor. u. vert. Glättung	25.47	19.97	-21.6%
Gesamtkosten	74.75 €	72.39 €	-3.2%

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Methodik der familienbasierten Austaktung der mittlere Bandwirkungsgrad aller vier Austaktungsfamilien um 3% gesteigert werden kann, da die Austaktungslösungen für die Familien in einer unterschiedlichen optimalen Anzahl an Arbeitsstationen resultieren. Daraus abgeleitet und gewichtet mit den jeweiligen Nachfragemengen nach den unterschiedlichen Familien ergibt sich eine Reduktion der Effizienzverluste durch diesen höheren Bandwirkungsgrad von über 40%. Die Reduktion der Kennzahl für die horizontale und vertikale Glättung der Austaktungen von über 21% zeigt, dass die Methodik dazu beiträgt, die Belastungsschwankungen für die Linienarbeiter deutlich zu senken. Dies belegt auch, dass die gebildeten Austaktungsfamilien aus homogenen Produktvarianten bestehen. Hinsichtlich der Investitionskosten in Betriebsmittel konnten beide Ansätze die gleiche Lösungsgüte erzielen. Insgesamt führt die familienbasierte Austaktung unter Berücksichtigung der benötigten Rüstaufwände zu einer Reduktion der resultierenden Gesamtkosten von über 3%. Die Eignung der entwickelten Methodik zur Effizienzsteigerung konnte somit erfolgreich nachgewiesen werden.

6. Fazit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „MicroBatchFlow“ konnte gezeigt werden, dass eine familienbasierte Austaktung einer Variantenfließlinie deutliche Effizienzgewinne gegenüber der klassischen, auf dem mittleren Typ beruhenden Austaktung generiert. Somit kann festgestellt werden, dass sämtliche Ziele des Forschungsvorhabens vollumfänglich erreicht wurden. Des Weiteren wurde die Lösungsmethodik mit explizitem Fokus auf die Anwendbarkeit im KMU-Umfeld entwickelt, sodass sich die Ergebnisse durch eine hohe Praxisrelevanz und Anwendbarkeit auszeichnen.

6.1. Wirtschaftlich-technische und wirtschaftliche Beurteilung der erzielten Ergebnisse

Die zur Bildung von Austaktungsfamilien entwickelte und umgesetzte Methodik bieten dem anwendenden KMU die Möglichkeit, eine vor dem Hintergrund des Anwendungsfalls bestmögliche Familienstruktur nahezu vollautomatisch zu bilden. Durch die Möglichkeit zur Parametrierung der Zielgrößen kann dieser Prozess dennoch auf die Anforderungen bzw. Besonderheiten des jeweiligen Anwendungsfalls angepasst werden. Auch die Methodik zur Bestimmung der Austaktung für die gebildeten Austaktungsfamilien erfordert nur einen geringen Initiierungsaufwand durch den Anwender, der sich im Wesentlichen auf die Ermittlung der zu verwendenden Taktzeit beschränkt. Die Optimierungsheuristik wird mit voreingestellten Laufzeitparametern initiiert, sodass hier kein Expertenwissen im Bereich der

Optimierung seitens des Anwenders erforderlich ist. Sofern nötig lassen sich diese Parameter jedoch an den individuellen Anwendungsfall anpassen, etwa um die Laufzeit der Heuristiken zu optimieren. Somit kann die Anforderung, eine Methodik zu entwickeln, die an den Erfordernissen der Praxis, insbesondere von KMU ausgerichtet ist, als erfüllt angesehen werden.

Die in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Methodik der familienbasierten Austaktung für einen Datensatz der betrieblichen Praxis in der Lage ist, Familien zu bilden, die hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Austaktung homogen sind, und anhand der Austaktungsmethodik die Effizienz der Produktion verglichen mit dem Fall der Austaktung anhand des mittleren Typen deutlich steigern kann. Folglich kann herausgestellt werden, dass die erzielten Ergebnisse des Forschungsvorhabens einen relevanten Mehrwert für produzierende Unternehmen und insbesondere KMU bieten.

6.2. Innovativen Beitrag sowie industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Bestehende Ansätze zur Gestaltung von Fließlinien betrachten im Wesentlichen die Austaktung als zentralen Punkt der Planung. Die hier entwickelte Methodik der familienbasierten Austaktung integriert mit der Bildung der Austaktungsfamilien einen der Austaktung vorgeschalteten Schritt. Dieser identifiziert solche Produktfamilien, die hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Austaktung der Fließlinie homogen sind und somit tendenziell ohne signifikante Effizienzverluste produziert werden können. Die auf diesen Anwendungsfall angepasste Austaktungsmethodik berücksichtigt bei der Ergebnisbewertung nicht nur die aufgrund von Austaktungsverlusten resultierenden Verluste sondern auch solche, die durch die Rüstaufwände entstehen. Eine solche Methodik, die eine gesamtheitliche Betrachtung der zugrundeliegenden Problemstellung betrachtet existiert im Stand der Technik bisher nicht.

Durch die Berücksichtigung zentraler betrieblicher Größen wie u.a. zulässige Taktzeit, maximale Anzahl von Arbeitsstationen, Kapazitätsgrenzen für Betriebsmittel in den Arbeitsstationen, erforderliche Rüstvorgänge und die Möglichkeit, diese zeitlich individuell zu bewerten, steht mit dem Forschungsergebnis ein Ansatz zur Verfügung, der eine hinreichend genaue Abbildung der Eigenschaften einer Fließlinie ermöglicht, um eine betriebliche Verwendung zu ermöglichen. Durch die Ausrichtung des Optimierungsproblems auf die Minimierung der Gesamtkosten des Fließkonzepts wird eine unmittelbare betriebswirtschaftliche Bewertung der Potenziale ermöglicht. Durch die zweistufige Zielhierarchie wird darüber hinaus auch den operativen Anforderungen an die Stabilität der Austaktung Rechnung getragen, sodass auch die nachgelagerten Zielstellungen der Reihenfolgebildung der einzelnen Aufträge, welche nicht im Fokus des Forschungsvorhabens war, berücksichtigt werden. Nach Abschluss der familienbasierten Austaktung stehen dem anwendenden KMU mit der Zuordnung der Arbeitsvorgänge, den daraus ableitbaren Materialien und Betriebsmitteln wesentliche Planungsinformationen für die Umsetzung der Fließfertigung zur Verfügung. Darüber hinaus wird mit der optimalen Produktionsreihenfolge der einzelnen Austaktungsfamilien eine zentrale Planungsgröße für den operativen Betrieb der Fließlinie definiert. Somit sind wesentliche Einführungshindernisse aufgrund des komplexen

Planungsprozesses aufgelöst, sodass eine industrielle Anwendung gerade in KMU, die verglichen mit Großunternehmen in der Regel nur über geringere Kapazitäten zur Planung von Produktionsprozessen verfügen, gefördert wird.

Darüber hinaus unterstützt der anwendungsfallneutrale Aufbau der entwickelten Methodik die universelle Einsetzbarkeit der Ergebnisse des Forschungsvorhabens. Grundsätzliche Voraussetzung für deren Übertragung ist jedoch, dass eine hinreichend vollständige datentechnische Repräsentation der Produkttypen sowie der relevanten Herstellungsprozesse gegeben ist. Ist dies nicht der Fall, muss der Aufwand zur Erhebung dieser Daten als initiale Investition aufgefasst werden, um die vorgestellte Methodik anwenden zu können, ohne jedoch zuvor detailliert die realisierbaren Effizienzgewinne abschätzen zu können. Diese hängen in hohem Maße von der Ähnlichkeitsstruktur der vorliegenden Produkte bzw. der von den Kunden nachgefragten Erzeugnissen ab. Nur wenn sich diese Ähnlichkeitsstruktur in solchen Austaktungsfamilien überführen lässt, für die sich im Rahmen der familienbasierten Austaktung eine signifikante Verbesserung des Bandnutzungsgrades ergibt, lassen sich die beim Wechsel zwischen den Familien anfallenden Rüstaufwände ausgleichen.