

Technologische und organisatorische Systembewertung und -gestaltung spanender Fertigungslinien nach den Prinzipien der schlanken Produktion

DISSERTATION

zur Erlangung der Würde eines
DOKTORS DER WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN
(Dr. rer. pol.)
der Universität Paderborn

vorgelegt von
Dipl.-Wi.-Ing. Kerstin Herrmann

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier

Korreferent: Prof. Dr. Joachim Fischer

Tag der mündlichen Prüfung: 25.04.2013

FÜR ALEXANDER

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemdefinition	3
2.1	Begriffliche Abgrenzungen und Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes	3
2.1.1	Prinzipien der schlanken Produktion	3
2.1.2	Eigenschaften spanender Fertigungslinien in der Aggregateproduktion der Automobilindustrie	13
2.2	Aufgaben der technologischen und organisatorischen Systembewertung und –gestaltung	14
2.2.1	Aufgabe des Evaluationsmodells	15
2.2.2	Aufgabe des Optimierungsmodells	16
2.3	Anforderungen an die Methodik	17
2.3.1	Anforderungen an das Evaluationsmodell	18
2.3.2	Anforderungen an das Optimierungsmodell	19
2.3.3	Allgemeine Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik	20
3	Stand der Technik	21
3.1	Ansätze der Bewertung nach den Prinzipien der schlanken Produktion	21
3.1.1	Quantitative Darstellung von Verschwendung	22
3.1.2	Quantitative Darstellung der Flexibilität	25
3.1.3	Quantitative Darstellung der Variabilität	28
3.2	Ansätze der mathematischen Optimierung zur Minimierung der Betriebskosten anhand der technologischen und organisatorischen Systemparameterdimensionierung	29
4	Forschungsbedarf	33
5	Methodik zur technologischen und organisatorischen Systembewertung und -gestaltung spanender Fertigungslinien nach den Prinzipien der schlanken Produktion	36
5.1	Quantifizierung der Prinzipien der schlanken Produktion	36
5.1.1	Quantifizierung von Verschwendung anhand der Lean-Metriken Fluss und Takt	36
5.1.2	Quantifizierung der Flexibilität anhand der Lean-Metriken Volumen- und Variantenflexibilität	47
5.1.3	Quantifizierung der Variabilität anhand der Lean-Metriken variantenspezifische und stochastische Stabilität	54
5.2	Entwicklung des Evaluationsmodells	58
5.2.1	Ableitung der Lean-Kennzahlenpyramide	58
5.2.2	Aggregation der Lean-Metriken und Ermittlung des Lean-Grad	61
5.3	Entwicklung des Optimierungsmodells	63
5.3.1	Identifikation der relevanten Kostenparameter	63
5.3.2	Abbildung der Lean-Metriken auf die Kostenparameter	88
5.3.3	Weiterführende Modellannahmen	98
5.3.4	Definition der Eingangsgrößen und Entscheidungsvariablen	100
5.3.5	Formulierung der Zielfunktion	108

5.3.6 Formulierung der Nebenbedingungen	112
6 Validierung und Ergebnisse	115
6.1 Fallbeispielbezogene Anwendung	115
6.1.1 Produkt und zu gestaltendes Fertigungssystem	115
6.1.2 Ausgangssituation der fallbeispielbezogenen Anwendung	116
6.2 Ergebnisse des Evaluationsmodells	119
6.3 Ergebnisse des Optimierungsmodells	123
6.3.1 Nichtlineare Struktur des Optimierungsmodells und Lösungsgenerierung	123
6.3.2 Ergebnisse aus der Kostenoptimierung	125
6.3.3 Transformation der Ergebnisse auf das Evaluationsmodell	128
6.3.4 Sensitivitätsanalyse	130
7 Zusammenfassung und Ausblick	133
Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
Literaturverzeichnis	III
Anhang	VIII

1 Einleitung

Produzierende Unternehmen stehen vor der ständigen Herausforderung, ihre Marktstrategien zur Sicherung und zum Ausbau ihrer Wettbewerbsposition in ein geeignetes Wertschöpfungskonzept zu übertragen. Neben einer zunehmend hohen Variantenvielfalt, besteht eine weitere Herausforderung in der Verkürzung der Lebenszyklen von Produkten und Technologien. Weiterhin fordern die von Käufern dominierten Märkte qualitativ hochwertige Erzeugnisse zu niedrigen Preisen in kürzester Zeit. Diese Volatilität der Märkte sowie die damit verbundenen Anforderungen an produzierende Unternehmen, ihre Kosten zu senken, aber dennoch reaktionsfähig und „kundennah“ zu sein, bedingen neben einer ausgezeichneten Planung vor allem eine **operative Exzellenz**. Verschärft wird dieser Sachverhalt durch eine entsprechend große Zeitspanne, welche von der Planung über die Beschaffung bis zum Hochlauf der Produktionslinien benötigt wird. Änderungen hinsichtlich des Produktdesigns inkl. der hierfür verwendeten Materialien, sowie bzgl. der Varianten- und Stückzahlenanforderungen, führen, im Vergleich zur strategischen und taktischen Planungsphase, zu neuen Rahmenbedingungen zu Beginn des Serienbetriebs. Häufig entspricht damit die geplante und installierte, technologische und organisatorische Dimensionierung der Anlagen, im Sinne einer Linienkonfiguration, nicht mehr den nun aktuellen Kundenanforderungen. Daraus resultieren wiederum **Problemfelder der operativen Ebene**, wie bspw. unzureichende Stückzahlen, ungleichmäßige Stationsauslastungen über die Produktvarianten und Stationen der Fertigungslinie, Losgrößenfragestellungen, hohe Instandhaltungsaufwendungen etc. Die Notwendigkeit zu Optimierungen während des Serienbetriebs ist damit offensichtlich.

Als Reaktion auf obige Tendenzen, wurde die **schlanke Produktion**, als Möglichkeit zur Standardisierung und Optimierung von Arbeitsabläufen, in Anlehnung an das Toyota Produktionssystem entwickelt. Eine Studie zeigt, dass bereits 69% der Industrieunternehmen in Europa die Methoden der „Lean Production“ anwenden und weitere 18% eine Einführung in Kürze planen [Nad10, S.299]. In diesem Kontext besteht jedoch die Schwierigkeit darin, unter gegebenen Restriktionen einen möglichst optimalen **Lean-Grad**, in Form einer **verschwendungsarmen, flexiblen und stabilen** Produktion, zu erzielen. Weiterhin mangelt es an Modellen, welche die Erreichung obigen Zielzustands objektiv bewerten, sowie Maßnahmen für dessen Umsetzung ableiten und priorisieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher ein detailliertes Verständnis hinsichtlich der Prinzipien der schlanken Produktion erarbeitet. Hierfür sind insbesondere deren operative Effekte auf die **technologischen und organisatorischen Systemparameter** einer Fertigungslinie zu konkretisieren. Auf der **Ebene der Bewertung** ist folglich aufzuzeigen, inwiefern der aktuelle Systemzustand die Prinzipien der schlanken Produktion anhand der Ausprägungen der technologischen und organisatorischen Systemparameter erfüllt. Dadurch resultiert weiterhin Transparenz bzgl. welcher Kriterien prinzipieller Handlungsbedarf besteht. Weiterhin muss es möglich sein, auf der **Ebene der Gestaltung**, die systematische Optimierung der Systemparameter anhand von Kostenaussagen zu quantifizieren. Hierfür ist ein mathematisches OR-Modell zu entwickeln, welches zugunsten **minimaler Betriebskosten** die anzustrebenden Ergebnisgrößen der Systemkonfiguration liefert. Damit wird das Ergebnis der Evaluation im Rahmen des Optimierungsmodells in einen konkreten Handlungsbedarf transferiert. Der Fokus der Entwicklung und Anwendung liegt auf automatisierten Fertigungslinien in der spanenden Aggregatefertigung der Automobilindustrie.

Der weitere Aufbau der Arbeit gliedert sich daher wie folgt: In Kapitel zwei werden die Prinzipien der schlanken Produktion - Verschwendung, Flexibilität und Variabilität - hergeleitet und beschrieben sowie die Systemeigenschaften des Entwicklungskontexts konkretisiert. Anschließend werden die Aufgaben sowie die damit einhergehenden Anforderungen an eine Methodik zur technologischen und organisatorischen Systembewertung und -gestaltung spanender Fertigungslinien nach den Prinzipien der schlanken Produktion erläutert. Kapitel drei bietet einen Überblick der diesbzgl. vorhandenen Ansätze und Verfahren in der Literatur. In

Kapitel vier wird der Stand der Technik hinsichtlich der in Kapitel zwei erarbeiteten Anforderungen bewertet. Die für die Aufgabenstellung verwendbaren Ansätze werden dadurch identifiziert. Weiterhin resultiert ein entsprechender Forschungsbedarf aus der Differenz der integrierbaren Verfahren und den abzubildenden Anforderungen. In Kapitel fünf wird die eigentliche Methodik, bestehend aus der Operationalisierung der Prinzipien der schlanken Produktion sowie der darauf basierenden Ableitung der Evaluations- und Optimierungsmodelle, erarbeitet. Kapitel sechs dient der Validierung und Diskussion der durch die Anwendung generierten Ergebnisse. Abschließend werden in Kapitel sieben ein Resümee gezogen sowie weitere Forschungsmöglichkeiten aufgezeigt.

2 Problemdefinition

Der mit dem Kapitel verfolgte Zweck ist es, einerseits ein gemeinsames Verständnis zwischen dem Leser und Verfasser bzgl. des Betrachtungsfeldes zu generieren und andererseits durch eine entsprechende Eingrenzung dessen zielgerichtete Analyse im Verlauf der Arbeit zu gewährleisten. Aufgrund der Vielfalt an verwendeten Begrifflichkeiten im Kontext der Prinzipien der schlanken Produktion, wird zunächst eine präzise Definition der jeweils relevanten Größen vorgenommen. Die Aufgabenbeschreibung der zu entwickelnden Methodik sowie dessen zu erfüllende Anforderungen runden Kapitel zwei inhaltlich ab und bilden die notwendigen Voraussetzungen für die Verfassung des Stands der Technik.

2.1 Begriffliche Abgrenzungen und Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes

2.1.1 Prinzipien der schlanken Produktion

Durch die Studie International Motor Vehicle Program (IMVP) des Massachusetts Institute of Technology (MIT) wurde der Begriff lean Production, zu deutsch schlanke Produktion, geprägt. In ihrem Anfang der 90er Jahre publizierten Buch *The machine that Changed the World* beschrieben Womack et al. die auf der Produktionsorganisation basierenden Wettbewerbsvorteile japanischer Automobilhersteller, allen voran Toyota [WoJR90, S.83]. Maßgeblicher Erfolgsfaktor der schlanken Produktion ist die kontinuierliche Beseitigung von Verschwendung an Ressourcen und damit eine effiziente Ausrichtung auf alle Tätigkeiten, welche mit der Wertsteigerung am Produkt verbunden sind [Cott11, S.4397], [Ohno09, S.35].

Wesentliche weitere Eigenschaften der schlanken Produktion beschreiben die Autoren anhand des Vergleichs der handwerklichen Fertigung mit der Massenproduktion [WoJR92, S.18 f.]: Während die handwerkliche Fertigung Produkte kundenauftragsgetrieben, in hoher Variantenvielfalt, im Einzelstückfluss und mit dem Einsatz hochqualifizierter Mitarbeiter sowie einfacher, flexibler Werkzeuge zu vergleichsweise hohen Kosten herstellt, fokussiert die Massenproduktion eine hohe Auslastung der hochautomatisierten Anlagen zur Fertigung von Standardprodukten in großer Stückzahl [Frit07, S.17]. Dies ist wiederum durch Puffer¹ sicher zu stellen.

Verglichen mit diesen beiden klassischen Formen der Produktion, kombiniert der Ansatz der schlanken Produktion deren Vorteile, wobei die hohen Kosten der handwerklichen Fertigung und die Inflexibilität der Massenproduktion vermieden werden [WoJR92, S.19]. Verglichen mit der Massenproduktion bzw. „gepufferten“ Produktion, ist die lean Production „schlanker“, da sie weniger Ressourcen (Arbeitskräfte, Lagerbestände und Maschinen) bindet [Beck06, S.262].

Nun stellt sich die legitime Frage, wie dieser offensichtlich konträre Zielkonflikt zwischen Effizienz und Flexibilität im Rahmen der schlanken Produktion vereint werden kann? Wie bereits erläutert, besteht das Hauptziel der schlanken Produktion in der Eliminierung jeglicher Verschwendung und damit in der Beseitigung von Störungen im Produktionsprozess [Sysk06, S.14]. Diese Störungen lassen sich nach Liker in folgende Kategorien klassifizieren: **Muda** (Verschwendung), **Muri** (Überlastung) und **Mura** (Schwankungen) [Like06, S.171].

¹ Sämtliche Reserven eines Produktionssystems in Form von Lagern und Arbeitskräften

Zur Ermittlung von **Muda** wird der Produktionsprozess in Tätigkeiten unterteilt, welche:

1. keinen Beitrag zur Wertschöpfung eines Produktes leisten²,
2. nicht zur Wertschöpfung beitragen, aber unverzichtbar sind³ und
3. den Wert des Produktes aus Kundensicht erhöhen und damit wertschöpfend sind.

Die nicht wertschöpfenden Anteile werden daraufhin den bekannten sieben Verschwendungsarten⁴ zugeordnet [Oelt00, S.32].

Muri tritt auf, wenn sich Mitarbeiter oder Maschinen an ihrer Belastungsgrenze befinden und damit nicht im optimalen Auslastungsbereich arbeiten [Beck06, S.303]. Dies resultiert in Maschinenausfällen bzw. Sicherheits- oder Qualitätsproblemen. Da ein flexibles Fertigungssystem bei veränderten Kundenanforderungen (beispielsweise hinsichtlich reduzierter Stückzahlen) deutlich später an seine Leistungsgrenzen gelangt, als dies bei einem vergleichsweise starren System der Fall ist, fungiert Muri als Maß für die Flexibilität eines Produktionssystems.

Im Gegensatz zur gewünschten Eigenschaft des Systems, auf veränderte externe Einflüsse reagieren zu können, haben interne Schwankungen einen negativen Einfluss. **Mura** umfasst diese als Variabilität des Systems bezeichneten Prozessinstabilitäten. Zusätzlich resultiert aus einem Auftreten von Variabilität direkt Verschwendung, da dies in einem ungleichmäßigen Einsatz von Arbeitskräften, Maschinen und Zwischenerzeugnissen resultiert.

Das allgemeine Verständnis von Verschwendung thematisiert primär die Vermeidung von Muda⁵. Von zentraler Bedeutung sind aber auch Muri und Mura. Tatsächlich würde das Konzept der schlanken Produktion ohne diese Faktoren stark nachteilig beeinflusst werden [Like06, S.172 f.]. So resultiert die Implementierung der schlanken Produktion häufig in der isolierten Eliminierung von Muda, beispielsweise in Form von Bestandsreduktionen. Unvorhergesehene Spitzen in der Kundennachfrage führen jedoch zu ungleichmäßigen Systembelastungen und damit aufgrund zu geringer Bestände zu einer Nicht-Lieferfähigkeit. Folglich sind die Stabilität und Flexibilität eines Systems äquivalent kritisch zu betrachtende und erfüllende Prinzipien der schlanken Produktion⁶ [HeSB11, S.409]. Aufgrund dieser Aussagen ist es von hoher Bedeutung, das Bewertungs- und Optimierungsmodell im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand der drei Maximen⁷, welche das Fundament der schlanken Produktion bilden, zu entwickeln: **Vermeidung von Verschwendung, Erhöhung der Flexibilität und Reduktion der Variabilität**. Diese Prinzipien repräsentieren damit übergeordnete Kriterien, deren Erfüllung es hinsichtlich des Bewertungsmodells zu untersuchen gilt. Weiterhin erfolgt die Ausrichtung der Gestaltungsmethodik an einer optimierten Erfüllung obiger Prämissen.

² Z.B. Warten, Sortieren von Material

³ Wie beispielsweise Transportieren

⁴ Überproduktion, Wartezeit/Leerlauf, Transportzeiten, ungünstiger Herstellungsprozess und damit Überbearbeitung, hohe Materialbestände, überflüssige Bewegungen, Fehler in Form von Ausschuss und Nacharbeit

⁵ Vgl. auch [Like06, S.172], [Sysk06, S.14]

⁶ Die Problematik eines kaum einheitlichen Begriffsverständnisses bezüglich der *Prinzipien* der schlanken Produktion, soll an dieser Stelle durch eine entsprechende Definition beseitigt werden. So führt beispielsweise Gienke die Produktionsglättung als Prinzip an [GiKa07, S.233]. Womack und Jones spezifizieren hingegen das Konzept der schlanken Produktion anhand der Prinzipien Wertbeitrag, Wertstrom, Fluss, Pull und Perfektion [Cott11, S.4397 f.]. Im Kontext der vorliegenden Arbeit, resultieren die Prinzipien der schlanken Produktion aus dem Anreiz eines störungsfreien Produktionsprozesses. Sie repräsentieren damit Leitlinien bzw. übergeordnete Kriterien für die Gestaltung des Produktionssystems [Abel11a, S.585].

⁷ Oder auch Prinzipien

2.1.1.1 Vermeidung von Verschwendung

Im Kontext der Vermeidung von Verschwendung, sind alle Tätigkeiten, welche keinen Beitrag zur Wertschöpfung eines Produktes leisten, vollständig zu eliminieren. Die nicht wertschöpfenden, aber notwendigen Aktivitäten, sind hingegen durch eine entsprechende Gestaltung des Fertigungssystems zu minimieren. Die Wertstromanalyse dient einerseits der Identifikation und Kategorisierung dieser Verschwendungsarten [Erla07, S.106 f.]. Für die Gestaltung eines idealen Wertstroms⁸ bedient sich das Wertstromdesign einem Spektrum von Richtlinien, welche einen effizienten und kundenorientierten Wertstrom gewährleisten [RoSh04, S.39]. Dies impliziert, dass die Nicht-Einhaltung dieser Leit- bzw. Gestaltungsrichtlinien zu einer verschwendungsreichen Produktion⁹ führt. Daher ist es naheliegend, die Bewertungs- und Gestaltungsmethodik anhand der Erfüllung dieser prinzipiellen Richtlinien auszurichten.

In der Literatur variiert die Anzahl der Gestaltungsrichtlinien. Prinzipiell sind diese jedoch den nach Rother definierten Leitlinien *Fluss*, *Takt*, *Nivellierung*, *Pull* und *Schrittmacher* zurechenbar [RoSh04, S.40 ff.]. Erlach identifiziert weiterhin die Richtlinien *Engpass Steuerung* und *Reihenfolgebildung nach Restriktionen*, welche der Steuerung der Produktionslinie am Schrittmacher Prozess zugeordnet werden können [Erla07, S.220]. Klevers hingegen besinnt sich auf die Richtlinien Rothers, teilt diese aber in sechs Prinzipien¹⁰ auf, welche wiederum in drei Gestaltungsbereiche¹¹ geclustert werden [Klev07, S.70]. Syska fokussiert die Gestaltungsrichtlinie der Flussorientierung und erweitert diese auf die Handlungsfelder der Beschaffung, Distribution und Organisation sowie bzgl. des Informationsflusses. Aus Sicht des Autors sind weitere Gestaltungsrichtlinien auf diesen Aspekt zurück zu führen [Sysk06, S.45]. Spath weist obige Leitlinien hingegen dem übergeordneten Prinzip des „Just in Time“ zu. Mit Hilfe einer Anzahl von Methoden, „[...] die eine wirtschaftliche, exakt auf den Bedarf abgestimmte Beschaffung, Produktion und Lieferung ermöglichen [...]“ soll eine verschwendungsfreie Produktion ermöglicht werden [Spat03, S.58]. Sogenannte Sub-Prinzipien umfassen die *Pull-Produktion*, *Fließfertigung*, *Taktfertigung* sowie die *Produktionsnivellierung und -glättung*. Oeltjenbruns erläutert, in Analogie zu Spath, identische Instrumente zur Umsetzung von Just in Time [Oelt00, S.40 ff.]. Auch Liker, Ohno und Takeda beschreiben Prinzipien zur Optimierung eines Wertstroms hinsichtlich der Kriterien¹² Fluss, Takt, Nivellierung, Pull und Schrittmacher. Diese werden in den jeweiligen Werken nicht explizit als Gestaltungsrichtlinien betitelt, sollen jedoch aus Gründen der Vollständigkeit an dieser Stelle aufgeführt werden. Zusammenfassend kann die Gegenüberstellung der Gestaltungsrichtlinien folgender Abbildung entnommen werden:

⁸ Im Sinne der schlanken Produktion

⁹ Im Sinne der sieben Verschwendungsarten

¹⁰ Ungleiche Definitionsebene der Prinzipien der schlanken Produktion

¹¹ *Rhythmus und Fluss*, *Steuerung und Sequenz* sowie *Prozesse und Hilfsmittel*

¹² An dieser Stelle ist erneut die Problematik eines kaum einheitlichen Begriffsverständnisses im Kontext der schlanken Produktion präsent. Die in dieser Arbeit als Richtlinien definierten Begrifflichkeiten, sind in anderen Werken als Prinzipien, Instrumente oder Kriterien bezeichnet.

Tabelle 2.1: Klassifikation von Verschwendung anhand der Gestaltungsrichtlinien des Wertstromdesigns

Literaturquelle	Fluss	Takt	Nivellierung	Pull	Schrittmacher
[RoSh04, S.40 ff.]	Entwicklung einer kontinuierlichen Fließfertigung	Produktion nach Taktzeit	Produktionsmix und Produktionsvolumen ausgleichen; EPEI-Reduktion	Integration von Supermarkt-Pull-Systemen	Definition des Schrittmacher Prozesses
[Erla07, S.133 ff.]	Zusammenfassung der Produktionsprozesse in einer kontinuierlichen Fließfertigung	Ausrichtung der Produktion am Kundentakt	Produktionsmix Ausgleich	Realisierung des Pull-Prinzips	Steuerung der Produktionslinie an genau einem Prozessschritt; Engpass-Steuerung; Reihenfolgebildung nach Restriktionen
[Klev07, S.69 ff.]	Entwicklung eines kontinuierlichen Fluss	Ausrichtung der Taktzeit am Produktionsrhythmus des Kunden	Produktions-Mix (Sequenz) ermöglichen	Verwendung von Supermarkt-Pull Systemen zur Produktionssteuerung	Schaffung selbststeuernder Regelkreise, so dass nur wenige Prozesse gesteuert werden müssen
[Sysk06, S.44 ff.]	Flussorientierung	Taktzeit der Produktionslinie muss Kundentakt entsprechen		Pull als Resultat der Flussorientierung	Schrittmacher
[Spat03, S.58 ff.]	Fließfertigung	Taktfertigung in Abstimmung auf den Kundenbedarf	Produktionsnivellierung und -glättung	Zugsteuerung	
[Oelt00, S.40 ff.]	kontinuierliche Fließfertigung	synchronisierte Fertigungsgeschwindigkeit mit dem Kundentakt	Produktionsnivellierung	Pull: bedarfsorientiertes Ziehen von Material durch den nachgelagerten Bereich	
[Ohno09, S.66 ff.]	Einrichtung eines Fertigungsflusses		Produktionsnivellierung i.S. der Auslastungsglättung		
[Like06, S.50 ff.]	Realisierung eines kontinuierlichen Materialflusses		Nivellierung der Produktion hinsichtlich Volumen und Produktionsmix	bedarfsorientierte Belieferung der nachgelagerten Prozessschritte	
[Take04, S.50 ff.]	ununterbrochener, durchgängiger Einzelstück(satz)fluss	Markt gibt Taktzeit der Produktion vor	Nivellieren und Glätten der Produktion		Schrittmacher als Werkzeug, mit dem die Taktzeit sichtbar gemacht wird

Schlussfolgernd sind diese Gestaltungsrichtlinien von Relevanz für die Vermeidung von Verschwendung. Nachfolgend wird eine qualitative Erläuterung des jeweiligen Begriffsverständnisses gegeben.

2.1.1.1.1 Begriffsverständnis des Fluss

Die kontinuierliche Fließfertigung (als Synonym zum Begriff des Fluss) impliziert die Bearbeitung und sofortige Weitergabe von Werkstücken zu den jeweils nachfolgenden Prozessschritten. Damit werden die Teile ohne Zwischenlagerung und Doppelhandling in einem kontinuierlichen Fluss durch die einzelnen Arbeitsstationen der Produktionslinie geschleust [Oelt00, S.43]. Ausgehend von dem zugrunde gelegten Verständnis des Fluss, stellt diese Gestaltungsrichtlinie somit die Möglichkeit dar, die nicht wertschöpfenden Zeitanteile, wie beispielsweise Warte- und Störzeiten, bei der Fertigung zu identifizieren und zu eliminieren.

2.1.1.1.2 Begriffsverständnis des Takt

Eine weitere Gestaltungsrichtlinie im Kontext von Muda ist die Schaffung eines Produktionsrhythmus (Taktzeit), welcher sich am Kundenbedarf (Kundentakt) orientiert. Die Taktfertigung dient dazu, den Produktionsrhythmus mit dem Rhythmus des Kundenbedarfs zu synchronisieren. Damit kann die Produktionslinie exakt den Bedürfnissen des Marktes entsprechen [Sysk06, S.145]. Der Kundentakt gibt folglich die Frequenz an, in welcher der Kunde ein Produkt nachfragt.

2.1.1.1.3 Begriffsverständnis für die Nivellierung

Nach [Take04, S.41] bedeutet die Nivellierung einer Produktion, die Unterteilung der Monatsproduktion in Tagesteilmengen. In Analogie zum EPEI (Every Part Every Intervall), welcher die Zeitdauer definiert, die benötigt wird, um alle Varianten zu produzieren, handelt es sich bei der Nivellierung um ein Intervall von einem Tag. Werden im nächsten Schritt die Intervalle, innerhalb welcher alle Varianten gefertigt werden können, weiter reduziert, so resultiert dies in einer Glättung. Die Nivellierung stellt somit die Vorstufe der Glättung dar. Werden die Zyklen kontinuierlich weiter erhöht, resultiert dies in der weiteren Reduktion der Losgröße bis hin zur Fertigung im sogenannten One-Piece-Flow.

In diesem Zusammenhang gilt jedoch folgendes Maxim: „Je kürzer das Intervall, desto flexibler und bestandsärmer der Wertstrom, aber desto größer auch die Anzahl der erforderlichen

Rüstwechsel. [...]“ [VoSc04, S.130]. Da das Ziel für einen Wertstrom und damit auch für eine spanende Fertigungslinie darin besteht, mindestens jeden Tag ein Intervall zu produzieren, kann im nächsten Schritt die maximale Rüstzeit berechnet werden. Die Rüstzeit stellt in diesem Zusammenhang den sogenannten kritischen Erfolgsfaktor dar.

Nach Ohno, Liker und Oeltjenbruns ist die Produktionsnivellierung auch im Sinne einer Auslastungsglättung zu sehen. Durch eine gleichmäßige Verteilung der Produktionsmengen und –varianten auf kleinere Zeiträume, werden systembezogene Überlastungen und Schwankungen vermieden [Spat03, S.59]. Damit gelingt der Transfer zum Prinzip der Flexibilität. Eine nivellierte Produktion geht einher mit einer erhöhten Flexibilität bzgl. Produktionsprogrammänderungen [Oelt00, S.51]. Während auf mengenmäßige Schwankungen lediglich durch eine Variation der Produktionsressourcen reagiert werden kann, führen verkürzte Produktionsintervalle zur Fähigkeit, schnell auf unterschiedliche Variantennachfragen zu reagieren. Die Gestaltungsrichtlinie der Nivellierung korreliert damit mit dem Prinzip der Variantenflexibilität. Die äquivalente Aussagefähigkeit dieser beiden Leitlinien führt folglich zu der Fusion in einer Gestaltungsrichtlinie. Weitere Ausführungen finden sich daher im Cluster Flexibilität – konkret Variantenflexibilität – wieder.

2.1.1.1.4 Begriffsverständnis des Pull

Die Steuerung des Produktionsablaufs in einem Fließproduktionssystem¹³ kann nach dem Push- oder Pull-Prinzip erfolgen. Bei der sogenannten Push-Produktion werden die Produktionsvorgänge antizipativ aufgrund geplanter zukünftiger Bedarfsmengen ausgelöst [Kuhn98, S.26]. Zum abgeleiteten Fertigungsbeginn wird somit ein Produktionsauftrag über die erste Station des Systems „hineingedrückt“. Die folgenden Stationen beginnen mit ihrer Produktionstätigkeit, sobald sie von den vorhergehenden Stationen Material erhalten haben.

Im Gegensatz hierzu startet der Produktionsprozess bei einer Pull-Steuerung erst nach der Realisation eines konkreten Bedarfs. Eine Produktionsstufe¹⁴ stellt dabei immer nur so viele Einheiten eines Erzeugnisses her, wie von der unmittelbar nachfolgenden Stufe verbraucht wurde.

Die Wahl des Steuerungsprinzips bedingt folglich eine entsprechende Gestaltung des Fertigungssystems bereits in der Planungsphase. So sind beispielsweise bei Pull-Systemen Bestände/Zwischenpuffer zur Bevorratung von End-/Zwischenprodukten erforderlich, um lange Wartezeiten in Abhängigkeit der Wiederauffüllzeit zu vermeiden.

Wie diesen Ausführungen zu entnehmen ist, handelt es sich bei der Planung und Realisierung des Steuerungskonzeptes um eine produktionslinienübergreifende Thematik. Vor diesem Hintergrund muss für die Gestaltungsrichtlinie Pull keine Kennzahl für die vorliegende Arbeit entwickelt werden.

2.1.1.1.5 Begriffsverständnis des Schrittmachers

Der Schrittmacher entspricht der Stelle des Wertstroms, an welcher die Geschwindigkeit der Produktion gesteuert wird. An dieser Stelle wird der Impuls zur Produktion eines neuen Werkstücks eingesteuert. Es handelt sich folglich um die operative Realisierung des Takt. Entspricht die Frequenz dieses Impulses der Frequenz der tatsächlich eingegangenen Kundenaufträge, ist die vollständige Erfüllung obiger Gestaltungsrichtlinie (wie auch bei der Richtlinie Takt) gewährleistet.

Nachfolgende Stationen des Schrittmachers befinden sich bei dessen korrekter Implementierung in einem kontinuierlichen Fluss [YaLu10, S.2797]. D.h. an den jeweiligen Bearbeitungsstationen erfolgt nach Abschluss des jeweiligen Bearbeitungsvorgangs die sofortige Weitergabe des Werkstücks zum nachfolgenden Prozessschritt. Nun begünstigt die Struktur einer

¹³ Und damit linienübergreifend

¹⁴ Eine Produktionsstufe repräsentiert eine Produktionslinie mit definierten Zwischen-/Enderzeugnissen, so dass entlang des gesamten Wertstroms interne Kunden-/Lieferantenbeziehungen resultieren.

automatisierten verketteten Fertigungslinie bereits die schlanken Steuerungsprinzipien. Per Definition befindet sich der Schrittmacher an der ersten Bearbeitungsstation der gesamten Linie. Folglich muss die Problematik der Findung einer idealen Stelle für den Schrittmacher im Kontext dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Die Beachtung der Erfüllung des **Takt** sowie die Implementierung eines kontinuierlichen **Fluss** sind daher für die optimale Gestaltung spanender Fertigungslinien im Kontext von Muda im Sinne der Überschneidungsfreiheit und Vollständigkeit ausreichend.

2.1.1.2 Erhöhung der Flexibilität

Der Begriff der Flexibilität stammt aus dem Lateinischen¹⁵ und beschreibt allgemein die Fähigkeit, auf veränderte Rahmenbedingungen angemessen zu reagieren [Kuma87, S.957], [Rosco07, S.24]. Entsprechend dieser zunächst sehr offenen Bedeutung wird das Konzept der Flexibilität in unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen und auch innerhalb einer Fachrichtung auf vielfältige, sich zum Teil widersprechende Art interpretiert [SeSe90, S.289]. Während die Abgrenzung zu verwandten Begrifflichkeiten wie Wandlungsfähigkeit, Agilität und Adaptionfähigkeit vielfach in der Literatur beschrieben ist¹⁶, scheint hingegen keine Differenzierung hinsichtlich Flexibilität und Variabilität zu existieren¹⁷. Um obigem Defizit zu begegnen, wird zunächst eine Definition für Flexibilität für den produktionsspezifischen Kontext der Arbeit vorgenommen. In Analogie zu den im vorigen Abschnitt abgeleiteten Gestaltungsrichtlinien der Verschwendung gilt es weiterhin, die im Bereich der Flexibilität relevanten Leitlinien zu identifizieren. Damit impliziert die Nichterfüllung der Flexibilitätsrichtlinien eine inflexible und verschwendungsreiche Produktion.

Slack definiert Flexibilität als ein Maß erreichbarer Zustände unter der Berücksichtigung von Zeit und Kosten, die für den Wechsel von einem Zustand in den anderen nötig sind [Slac83, S.7], [Zaeh06, S.30]. Ein Zustand ist dabei durch eine definierte Kombination von Input- und Outputfaktoren sowie durch das Verhalten des Wertschöpfungsprozesses selbst bestimmt [DeTo98, S.1591]. Beispiele für Inputfaktoren sind die Art und Menge der verwendeten Rohstoffe, Outputfaktoren entsprechen hingegen der produzierten Menge einer bestimmten Variante. Die Flexibilität ist weiterhin maßgeblich dafür, zu welchen Kosten und in welcher Zeit das System von einem in den anderen Zustand wechseln kann [Moel08, S.14]. Sethi und Sethi spezifizieren Flexibilität als Fähigkeit zur Konfiguration von Produktionsressourcen, um effizient unterschiedliche Produkte in akzeptabler Qualität zu fertigen [SeSe90, S.295]. Neben der grundsätzlichen Fähigkeit zu Anpassungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit dem Eintritt von Veränderungen, ist die Reversibilität dieser Anpassung von hoher Bedeutung [Nach09, S.224]. So wird laut Westkämper ein System als flexibel bezeichnet „[...]“, wenn es im Rahmen eines prinzipiell vorgedachten Umfangs von Merkmalen sowie deren Ausprägungen an veränderte Gegebenheiten reversibel anpassbar ist.“ [Rosco07, S.25]. Während die bisherigen Ausführungen die *Anpassung* in technischer und organisatorischer Hinsicht fokussieren, kennzeichnet Rogalski die Flexibilität eines Produktionssystems als *Anpassungs- und Änderungsfähigkeit* [Roga09, S.33]. Letzt genannte umfasst die Veränderung der Struktur des Produktionssystems sowie die Art und Anzahl dessen Ressourcen. Folglich können insbesondere sprunghafte und schwer vorhersehbare Veränderungsanforderungen des Umfelds durch dieses erweiterte Aktionsvermögen abgefangen werden. Für den Kontext der Arbeit wird die zuletzt erläuterte Änderungsfähigkeit ausgeschlossen. Durchzuführende Anpassungen umfassen lediglich technische und organisatorische Handlungsspielräume, ohne die Struktur des Produktionssystems grundlegend zu verändern. Vor diesem Hintergrund wird die Flexibilität des Systems im weiteren Verlauf der Arbeit als Fähigkeit verstanden, sich an marktinduzierte

¹⁵ Flectere = biegen

¹⁶ Siehe beispielsweise [Wemh05, S.30 ff.], [Opit08, S.14], [NyRA08, S.25]

¹⁷ So werden Abweichungen oder Änderungen mit dem Ziel der Modifikation (von beispielsweise Produkteigenschaften) synonym zum Begriff der Variabilität verwendet [Dang09, S.352]. Diese entsprechen wiederum Anpassungen, welche mit obiger, allgemeiner Beschreibung der Flexibilität korrelieren.

Veränderungen reversibel anzupassen, unter Berücksichtigung der technischen und organisatorischen Handlungsspielräume.

Da Flexibilität meist einen gewissen finanziellen Mehraufwand bedeutet, darf nicht ein beliebig flexibles Konzept erstellt werden. Vielmehr müssen die relevanten Flexibilitätsmerkmale¹⁸ optimal auf die Anforderungen zugeschnitten sein [Toni07, S.4]. In der Literatur findet sich bzgl. der Flexibilitätsmerkmale eine Vielzahl von Klassifikationsschemata. Umfangreiche Diskussionen¹⁹ der Konzepte finden sich bspw. in [Chry96], [DeTo98], [Nara00], [SeSe90], [Slac83] und [Roga09, S.35 ff.].

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde eine empirische Untersuchung zu Identifikation der relevanten Flexibilitätskriterien durchgeführt [Lanz10a, S.531]. Die Wahrscheinlichkeit zur Reaktionsfähigkeit auf Stückzahl- und Variantenschwankungen während des Produktlebenszyklus wurde hierbei als hoch bewertet. Auch Rogalski betont die Relevanz dieser Richtlinien. „[...] Weil sich Kernfragen zur Flexibilität von Produktionssystemen innerhalb der Praxis vor allem auf Mengenschwankungen [...]“ und „[...] Veränderungen des Produkt-/Variantenmixes beziehen [...]“²⁰ ist der Bereich der zu quantifizierenden Flexibilitätsarten für die Bewertungs- und Gestaltungsmethodik auf die Stückzahl-²¹ und Variantenflexibilität einzugrenzen²².

2.1.1.2.1 Begriffsverständnis der Volumenflexibilität

Der generelle Verlauf der Nachfragekurve nach Produkten²³ fordert einen gewissen Flexibilitätsgrad bzgl. der zu fertigenden Stückzahl. So können bei einem stückzahlflexiblen System die vorhandenen Kapazitäten (Kapazitätsangebot) sehr viel enger dem Verlauf der Nachfragekurve (Kapazitätsbedarf) angepasst werden, als beispielsweise bei starren Transferstrassen [Abel10, S.291]. Daher beschreibt die Volumenflexibilität²⁴ die Fähigkeit einer kurzfristigen Kapazitätsanpassung zur Fertigung variierender Stückzahlen innerhalb der bestehenden technischen und organisatorischen Grenzen eines Produktionssystems. Eine dieser Definition folgenden Metrik ermöglicht jedoch keine Aussage bzgl. der Wirtschaftlichkeit der Anpassung.

2.1.1.2.2 Begriffsverständnis der Variantenflexibilität

Aufgrund der aktuellen Entwicklung sich verkürzender Produktlebenszyklen und der zunehmend heterogenen Kundenanforderungen, lässt sich ein nicht unerheblicher Flexibilitätsbedarf an Varianten ableiten [Toni07, S.4]. Für den Kontext der Arbeit, soll die von Roscher definierte Produktflexibilität²⁵ übernommen werden. Damit beschreibt diese die Fähigkeit, „[...] verschiedene Produkte oder Varianten fertigen zu können.“ [Rosco07, S.27].

¹⁸ Oder auch -richtlinien

¹⁹ Die Vielzahl von Beschreibungen und Klassifikationen der produktionspezifischen Flexibilität geht so weit, dass sich deren Sammlung, Darstellung und Vergleich fast zu einer eigenen Forschungsrichtung entwickelt hat [Moel08, S.14]. Auf eine ausführliche Gegenüberstellung existierender Arbeiten soll daher im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet werden. Zu fokussieren ist hingegen die Ableitung der relevanten Flexibilitätsrichtlinien.

²⁰ [Roga09, S.39 f.]

²¹ Synonym zum Begriff der Volumenflexibilität

²² Weitere Flexibilitätsstrategien, wie beispielsweise die Marktstimulation durch Sonderangebote mit dem Ziel der Reduktion des erforderlichen Flexibilitätsbedarfs, sind im Kontext der vorliegenden Arbeit nicht relevant. Zur Vollständigkeit wird jedoch auf [WaSz11, S.1733 ff.] verwiesen, wo entsprechende Strategien erläutert werden.

²³ Welche konkret in die Phasen Hochlauf, Reife und Niedergang gruppiert werden kann

²⁴ In Anlehnung an [Roga09, S.40] und [Rosco07, S.27]

²⁵ Synonym zum Begriff der Variantenflexibilität

2.1.1.3 Reduktion der Variabilität

Variabilität, als weiteres Prinzip der schlanken Produktion, bezeichnet die mit Schwankungen und Instabilitäten verbundene Abweichung von definierten Standards [DrMR05, S.36]. Variabilität beschreibt folglich jegliche Ausprägung eines für die Produktion bestimmenden Wertes, welcher sich außerhalb einer definierten Toleranzgrenze befindet. Im Gegensatz zu den Stückzahl- und Variantenschwankungen, welche auf das Marktverhalten zurück zu führen sind und ein optimales Maß an Flexibilität im Sinne der Reaktionsfähigkeit erfordern, handelt es sich bei den im Kontext der Variabilität definierten Schwankungen um unternehmensinterne, prozessbedingte Abweichungen, welche es zu beseitigen gilt [BeMo92, S.148]²⁶.

Prinzipiell kann zwischen *stochastischen* und *geplanten Variabilitäten*, welche sich wiederum in die stationäre und variantenspezifische Variabilität gliedern, unterschieden werden. Konkret handelt es sich um variable Zykluszeiten bei der Fertigung eines Werkstückes innerhalb einer aus mehreren Prozessschritten bestehenden Fertigungslinie. Sehr anschaulich kann dieser Sachverhalt anhand nachfolgender Abbildung dargestellt werden:

		Varianten		
		A	B	C
Stationen	1	28	25	31
	2	32	28	34
	3	31	26	27

Abbildung 2.1: Dimensionen der Variabilität – variable Zykluszeiten je Variante und Station in Sekunden

Dabei repräsentieren die jeweiligen Stationen innerhalb des verketteten Systems einzelne Komponenten, wie z.B. Bearbeitungszentren und Stationen einer Rundtischmaschine, anhand welcher wiederum die jeweiligen Prozessschritte²⁷ ausgeführt werden. Nachfolgende Grafik veranschaulicht exemplarisch die erst genannte Dimension der Variabilität - stochastische Schwankungen der Zykluszeit innerhalb *einer Station* für *eine Variante*²⁸.

²⁶ Damit erfolgt eine explizite Abgrenzung zu der von Erlach definierten Variabilität einer Produktion, welche ein Indikator für „[...] das mit ihm bewältigbare Produktionsspektrum ist [...]“ [Erla07, S.14]. Die prinzipielle Fähigkeit zur Fertigung von Varianten wurde bereits im Rahmen der Variantenflexibilität definiert, wodurch der Anforderung einer Abgrenzung der Begrifflichkeiten Flexibilität und Variabilität Folge geleistet wurde.

²⁷ Z.B. Drehen, Fräsen, Bohren etc.

²⁸ Die Basis der visualisierten Schwankungen bilden 60 Messungen, für jeweils alle Stationen der Linie über eine Baureihe/Variante. Somit wird von einer statistisch ausreichenden Messanzahl ausgegangen und folglich von einer repräsentativen Grundgesamtheit. Untersuchungen zeigen, dass sich der dargestellte Sachverhalt analog bei allen anderen Varianten wieder findet.

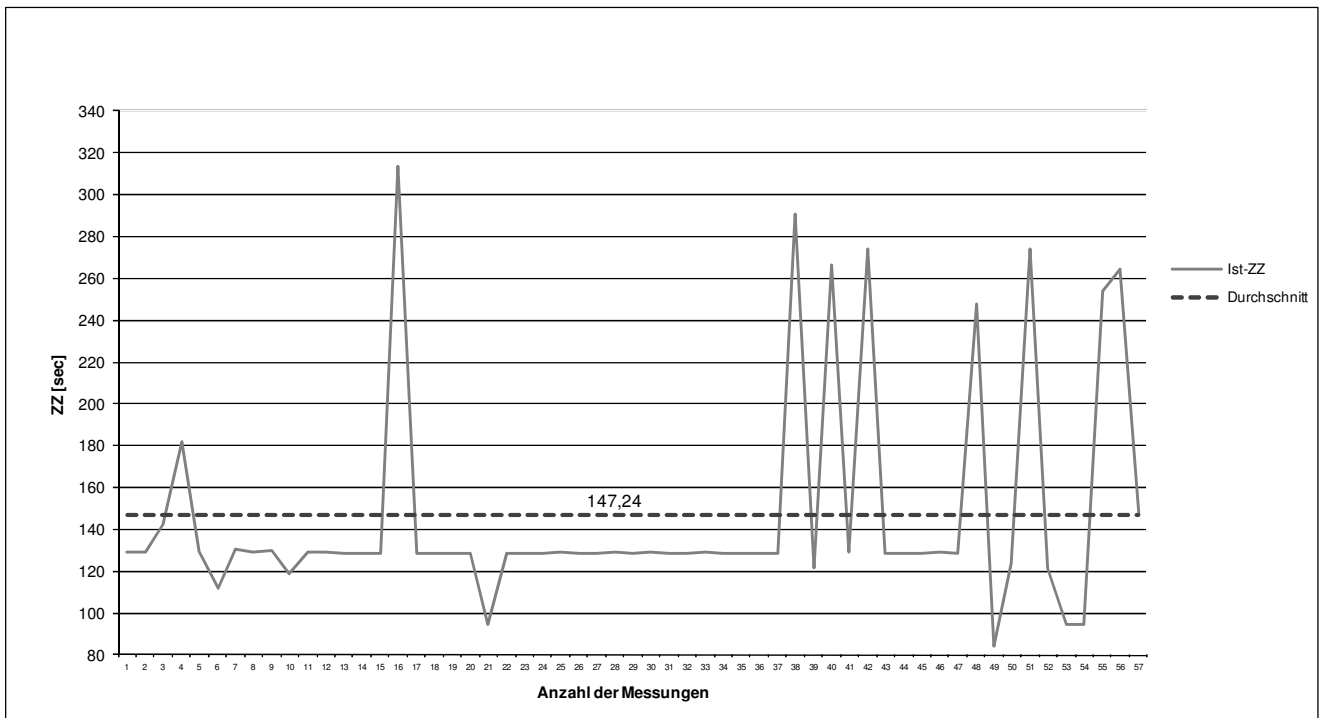


Abbildung 2.2: stochastische Variabilität - Verlauf der Ist-Zykluszeiten der Variante A an Station fünf mit signifikanten Ausreißern sowie Darstellung des arithmetischen Mittels der Zykluszeit

Lanza et al. erweitern obigen Sachverhalt durch die Identifikation folgender stochastischer Schwankungen bei der Modellierung von Produktionssystemen [Lanz10, S.480]:

- Variabilität in Form stochastisch schwankender Leistungsgrade aufgrund des Bedien- und Betriebsverhaltens der Maschine bei der Fertigung differenzierter Werkstücke
- Variabilität in Form stochastisch schwankender Qualitätsgrade²⁹
- Variabilität in Form schwankender Verfügbarkeitsgrade

Da auf stochastische Schwankungen nur bedingt Einfluss genommen werden kann³⁰, ist dieser Aspekt der Variabilität im weiteren Verlauf der Arbeit nicht zu berücksichtigen. Der Fokus liegt hingegen auf der stationären und variantenspezifischen Variabilität.

2.1.1.3.1 Begriffsverständnis der stationären Variabilität

Aufgrund der zeitlich nicht exakt gleichmäßig aufteilbaren Arbeitsumfänge zwischen den Prozessen, resultieren unterschiedliche Bearbeitungszeiten *zwischen den Stationen* bei der Fertigung *einer Variante*. So dauert das Bohren an Station sechs bspw. sieben Sekunden länger als der Fräsvorgang an Station eins bei Fertigung der Variante A. Im Sinne einer schlanken Produktion sind diese stationären Schwankungen jedoch zu eliminieren. Operativ handelt es sich hierbei um das Thema der Austaktung oder Engpass-Eliminierung.

2.1.1.3.2 Begriffsverständnis der variantenspezifischen Variabilität

Die zweite Gestaltungsrichtlinie im Kontext der Reduktion von Variabilität umfasst die horizontale Perspektive in Abbildung 2.2, die sogenannte variantenspezifische Variabilität. Aufgrund der geometrischen Abweichungen zwischen den Varianten, ergeben sich variierende Zykluszeiten an den jeweiligen Stationen. Das Ziel besteht folglich in einer möglichst gleichmäßigen und somit

²⁹ Qualitätsgrad = Anzahl Gutteile / Gesamtheit aller gefertigten Werkstücke

³⁰ Diese sind primär abhängig von externen Einflussfaktoren, wie beispielsweise Material und Temperatur des Werkstücks. Weiterhin wird obige, durchschnittliche Zykluszeit für eine Station und Variante vereinfacht als statische, deterministische Größe im weiteren Verlauf der Arbeit angenommen.

stabilen Arbeitszeitbelastung innerhalb *einer Station* bei der Fertigung der *differenzierten Varianten*. Die Veränderlichkeit dieser Variabilität liegt letztlich im Produktdesign und ist der Thematik „Design for Manufacturing“ zugeordnet.

2.1.1.4 Operationalisierte Prinzipien der schlanken Produktion

Dennoch sind die Problematik eines kaum einheitlichen Verständnisses des Begriffs der Gestaltungsrichtlinie sowie die variierende Anzahl dieser in der Literatur (siehe insbesondere Kapitel 2.1.1.1 und 2.1.1.2) kritisch zu hinterfragen. Die Struktur der vollständigen Ordnung³¹, hinsichtlich der Prinzipien der schlanken Produktion, wird anhand der obigen (qualitativen) Ableitungen nicht gewährleistet. **Vor diesem Hintergrund ist für den Kontext der Arbeit ein präzisiertes Verständnis³² für die Prinzipien der schlanken Produktion erforderlich.** Hierfür sind die jeweiligen Gestaltungsrichtlinien zu operationalisieren, d.h. anhand geeigneter Kennzahlen objektiv messbar zu machen. Die technologischen und organisatorischen Systemzustände bilden dafür das operative Fundament. Diese werden nachfolgend allgemeingültig³³ definiert:

Ein technologischer Systemzustand ist als Aggregation der Ausprägungen der technologischen Systemparameter zu sehen. Die **technologischen Systemparameter** werden durch die auf der Fertigungslinie und im Lager ausgeführten Prozessschritte determiniert. In Anlehnung an den Transformationsprozess³⁴ erfährt ein Werkstück die hierfür erforderlichen Prozessschritte *Bearbeiten, Rüsten, Transportieren, störungsbedingtes Warten, ablaufbedingtes Warten³⁵ und Warten im Lager*. Ein technologischer Systemparameter repräsentiert folglich die zeitbezogene Ausprägung eines Prozessschrittes, wie z.B. die Rüstzeit. Weiterhin sind die technologischen Systemeigenschaften³⁶ für die Ausprägungen der Technologieparameter³⁷ maßgebend.

Ein organisatorischer Systemzustand ist hingegen als Aggregation der organisatorischen Systemparameter zu sehen. Die **organisatorischen Systemparameter** werden aus der operativen Produktionsplanung abgeleitet. Hierzu gehören die *Anzahl der Schichten, die Pausenzeiten je Schicht, die Produktionsmenge, die Anzahl an Rüst-, Transport- und Instandhaltungsvorgängen, sowie Produktions- und Transportlosgrößen³⁸*. Ein organisatorischer Systemparameter repräsentiert damit die anzahl-, zeit- oder mengenbezogene Ausprägung einer organisatorischen Leistungsgröße.

Offensichtlich besteht eine prinzipielle Abhängigkeit zwischen den technologischen und organisatorischen Systemzuständen, weshalb diese gemeinsam zu betrachten sind. **Die technologischen und organisatorischen Systemparameter** werden folglich anhand der

³¹ Für eine binäre Relation R auf der Menge A ist R *vollständig*, wenn gilt: $((a, b) \notin R \Rightarrow (b, a) \in R)$ für alle $a, b \in A$ [Opit04, S.121]. Da jede vollständige Relation zugleich reflexiv und transitiv ist, gilt weiterhin: R heißt *reflexiv*, wenn $(a, a) \in R$ für alle $a \in A$. R heißt *transitiv*, wenn $((a, b) \in R \wedge (b, c) \in R \Rightarrow (a, c) \in R)$ für alle $a, b, c \in A$.

³² Auf Basis und dennoch als Erweiterung der erläuterten Gestaltungsrichtlinien aus der Literatur

³³ Im Sinne der Gültigkeit für alle Prinzipien der schlanken Produktion

³⁴ Ein Transformationsprozess im Kontext der Produktion beschreibt nach [Dang09, S.1] ein Geschehen, beim dem eine „[...] Menge an materiellen und immateriellen Elementen als Input eingesetzt wird, um einen andersartigen Output zu erhalten.“

³⁵ Aufgrund ungleicher Zykluszeiten bei den einzelnen Stationen, entstehen ablaufbedingte Wartezeiten für ein Werkstück beim Durchlaufen einer starr verketteten Fertigungslinie vor den Stationen.

³⁶ Z.B. Art und Anzahl der eingesetzten Werkzeuge, Vorschubgeschwindigkeiten der Spindel, Transportgeschwindigkeiten der Verkettungen etc.

³⁷ Technologieparameter und technologische Systemparameter werden als synonyme Begriffe verstanden.

³⁸ Sequenz- oder Reihenfolgefragestellungen spielen im Rahmen der Arbeit keine Rolle (vgl. auch Kapitel 5.3.3).

Kennzahldefinitionen in die jeweiligen Gestaltungsrichtlinien integriert, quantifizieren diese und **entsprechen** damit **den operationalisierten Prinzipien der schlanken Produktion**³⁹.

2.1.2 Eigenschaften spanender Fertigungslinien in der Aggregateproduktion der Automobilindustrie

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Serienbetrieb der großseriellen, spanenden Aggregatefertigung. Konkret bildet die Fertigungslinie die primäre Betrachtungsebene, weshalb eine Charakterisierung dieser sinnvoll erscheint.

Die Linie folgt dem Fließprinzip⁴⁰, wodurch die einzelnen Arbeitsplätze/Maschinen entsprechend der Reihenfolge des Arbeitsablaufes angeordnet sind. Die Struktur der Linie ist demnach ergebnisorientiert [GiKa07, S.60]. Das Fließprinzip kann prinzipiell in die Reihen- und Fließanordnung diversifiziert werden. Der Unterschied besteht in der zeitlichen Bindung zwischen den Arbeitsplätzen bzw. inwiefern eine solche vorherrscht oder nicht. Demnach besteht bei der Reihenanordnung keine zeitliche Kopplung zwischen den Bearbeitungsstationen. Die Werkstücke werden erst nach vollständiger Beendigung der Arbeitsgänge weiter gegeben [Gans08, S.5]. Daher kann es zu Wartezeiten in den arbeitsplatzbezogenen Vorratspuffern kommen. Die Fließanordnung ist hingegen taktgebunden, d.h. jede in der Linie durchzuführende Tätigkeit (Bearbeitung und Transport) ist räumlich und zeitlich aufeinander abgestimmt [Grun09, S.136 f.], [Vahr08, S.80 ff.]. Spezifiziert auf die Ausprägungsart der Fließbandfertigung, bei welcher die einzelnen Stationen durch ein streng getaktetes Fließband miteinander verbunden sind, werden die Werkstücke synchron transportiert [Kuhn98, S.6 f.]. Weiterhin können Fließproduktionssysteme in Einprodukt- und Mehrproduktlinien unterschieden werden [Gans08, S.6]. Während bei der sogenannten Mixed-Model-Linie die Umrüstvorgänge vernachlässigt und mehrere Produkte in beliebiger Reihenfolge gefertigt werden können, erfolgt auf der Multi-Model-Linie die Fertigung der Varianten in Losen. Offensichtlich beansprucht bei letzt genanntem Fall jeder Rüstvorgang viel Zeit. Eine starr verkettete Multi-Model-Linie bildet den Anwendungsfall der Arbeit.

Der technische Fortschritt, der sich exorbitant auf die Zuverlässigkeit und Präzision der Maschine gegenüber dem Menschen auswirkte sowie zu hohe Lohnkostenbelastungen, führten letztendlich zur fortschreitenden Automatisierung. Ebenfalls wurde der Monotonie der Arbeitsvorgänge für den Menschen durch sie entgegen gewirkt. Die Automation ist in der Fließfertigung am leichtesten zu integrieren [FaFS09, S.30 ff.]. Fandel et al. schlussfolgern in diesem Zusammenhang „[...] Die Möglichkeit, ein Fließfertigungssystem aufzubauen und die Möglichkeit der Automatisierung laufen also weitgehend parallel. [...]“ [FaFS09, S.32]. Eine Verknüpfung, bei der ein hoher Grad an Automatisierung nach dem Fließprinzip vorherrscht, ist die flexible Fertigungsstraße. Nach Grundig erfolgt bei dieser Fertigungsform „[...] eine mehrstufige Komplettbearbeitung von Werkstücken im Großserienbereich und festgelegter identischer Arbeitsvorgangsfolge sowie ähnlicher Teilegeometrie. Die sich technologisch ergänzenden NC-Bearbeitungstechniken sind [...] durch automatisierte Materialflusssysteme [...] fest verkettet [...]“ [Grun09, S.139]⁴¹. Aufgrund ihrer hohen Produktivität ist diese vor allem bei der Serienproduktion der spanenden Fertigung von besonderer Bedeutung [Abel08, S.322].

³⁹ Bzgl. der konkreten Ausgestaltung der Kennzahlen und damit Operationalisierung der Gestaltungsrichtlinien sei auf Kapitel 5.1 verwiesen. Im Kontext der Problemdefinition dient dieser Abschnitt lediglich der qualitativen Präzisierung der Prinzipien der schlanken Produktion anhand der technologischen und organisatorischen Systemparameter. Der Begriff „operationalisierte Prinzipien“ ist daher als „präzisierte Prinzipien“ zu verstehen.

⁴⁰ Vgl. auch [Toni07, S.2]

⁴¹ Aufgrund dieser Systembetrachtung spielt der Mensch, bezogen auf den Wertstrom und die Linie, eine untergeordnete Rolle als Materialversorger und kann daher vernachlässigt werden. Begründet wird dieser Sachverhalt weiterhin dadurch, dass der Mensch nicht als Bestandteil der Linie, sondern als logistisches Element des übergeordneten Systems zu verstehen ist.

Der hohe Invest bei der Installation eines neuen Fertigungssystems⁴² sowie zunehmend verkürzte Produktlebenszyklen⁴³, welche z.T. durch multiple Modellpflegen verschärft werden, implizieren eine längerfristige Verwendung der Anlagen. Folglich ist die Anpassungsfähigkeit der Linie an die jeweiligen Rahmenbedingungen von hoher Bedeutung. Um jedoch teure Anpassungsplanungen⁴⁴ zu vermeiden, ist zunächst eine Optimierung des Systems hinsichtlich seiner technologischen und organisatorischen Handlungsspielräume zu gewährleisten. Eine detaillierte Erläuterung der Aufgabenstellung findet sich in nachfolgendem Abschnitt.

2.2 Aufgaben der technologischen und organisatorischen Systembewertung und –gestaltung

Da für den Begriff der technologischen und organisatorischen Systembewertung und –gestaltung im Kontext der Prinzipien der schlanken Produktion keine allgemeingültige Definition existiert, sollen zunächst die Komponenten des Begriffs grundlegend beschrieben sowie auf den Anwendungsfall transferiert werden. Daraus leiten sich weiterhin die Aufgaben der Methodik ab.

Gemäß der Systemtheorie ist ein **System** als eine definierte Menge von Elementen zu verstehen, welche spezifische Eigenschaften aufweisen und miteinander in Beziehung stehen. Weiterhin ist es durch eine Systemgrenze von seiner Umwelt abgegrenzt, kann jedoch Materie, Information und Energie mit dieser austauschen. Jedes Element des Systems kann wiederum als eigenständiges System erachtet werden. Werden die Elemente bzw. Subsysteme sorgfältig aufeinander abgestimmt, verstärken sich diese, so dass für das Gesamtsystem mehr als die Summe seiner Elemente resultiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit, entspricht das System der in Kapitel 2.1.2 definierten spanenden Fertigungslinie. Die darin enthaltenen Bearbeitungsstationen sowie Verkettungseinrichtungen werden als Elemente verstanden. Unter der Annahme, dass zwei Produktionsstufen⁴⁵ durch ein Zwischenlager getrennt sind (siehe Abbildung 2.4), wird das jeweilige Wareneingangslager zusätzlich in die Systembetrachtung integriert⁴⁶.

⁴² Vgl. u.a. [Toni07, S.2]

⁴³ Vgl. u.a. [Abel10, S.291]

⁴⁴ Im Sinne der Beschaffung zusätzlicher Maschinen/Anlagen oder Änderung des Materialfluss inkl. Neugestaltung des Transportsystems innerhalb der Linie

⁴⁵ Wobei die spanende Fertigungslinie einer Produktionsstufe entspricht und der interne Lieferant bzw. Kunde der jeweils vor- bzw. nachgelagerten Stufe

⁴⁶ Der Bestandsverlauf im Wareneingangslager wird sowohl durch das Betriebsverhalten und die Steuerung des internen Lieferanten als auch der Fertigungslinie determiniert. Analoges gilt für das Wareneingangslager. Obige Definition bildet daher die Basis für eine eindeutige/standardisierte Systemabgrenzung.

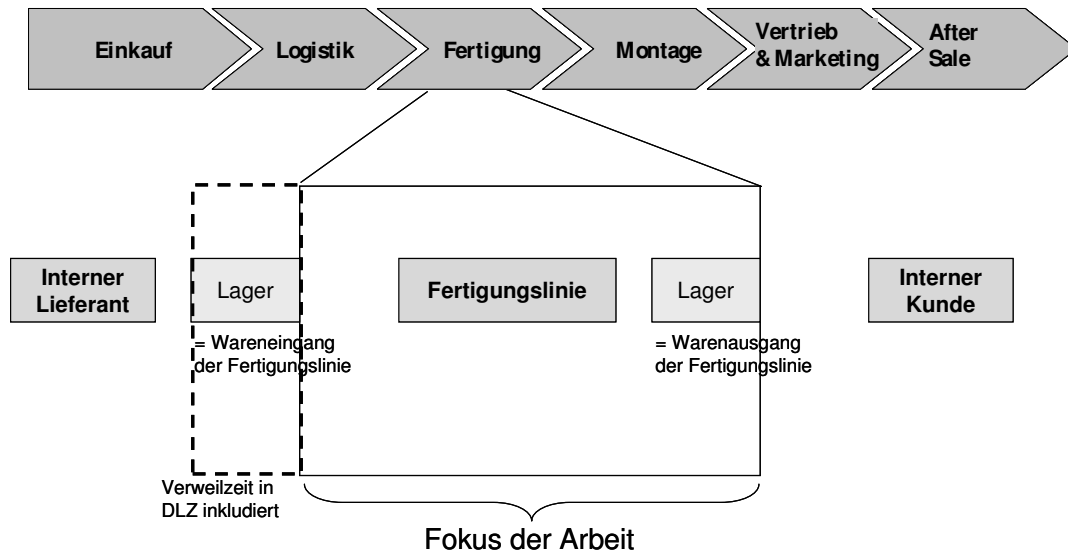


Abbildung 2.3: Das fokussierte System der vorliegenden Arbeit entspricht einem Subsystem der gesamten Wertschöpfungskette.

Im Wareneingangslager der Fertigungslinie befinden sich Rohlinge, im Warenausgang werden hingegen Halfertigerzeugnisse, vor dem Übergang in die nächste Produktionsstufe, gelagert. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass diese Lager nicht physisch voneinander getrennt sein müssen. Vielmehr bedingt die Lagerstruktur in der Großserienfertigung, dass in einem Lagerraum die verschiedenen Erzeugnisse umgeschlagen werden. Damit sind für diese Arbeit alle Prozesse relevant, welche mit dem Transport der Rohlinge zur Fertigungslinie beginnen und mit der Einlagerung und Verweildauer der Halfertigerzeugnisse im Warenausgangslager enden.

Als primäre Einfluss- und Entscheidungsfaktoren, für die Bewertung und Gestaltung des Systems im Serienbetrieb, werden die diskreten Systemzustände, sowohl in technologischer als auch organisatorischer Hinsicht⁴⁷, erachtet. Damit bilden die zeit-, anzahl- und mengenbezogenen Größen der Systemzustände die Basis für eine optimale Ausgestaltung der vorhandenen Ressourcen⁴⁸. Die Bewertung und Gestaltung der Fertigungslinie nach den Prinzipien der schlanken Produktion umfasst folglich die **Bewertung der Ausprägung** sowie die **Dimensionierung der technologischen und organisatorischen Systemparameter**. Die Aufgaben der Evaluations- und Optimierungsmodelle konkretisieren sich für diesen Sachverhalt wie folgt:

2.2.1 Aufgabe des Evaluationsmodells

Die grundlegende Aufgabe der Systembewertung im Rahmen der Optimierung spanender Fertigungslinien während des Serienbetriebs, ist die Schaffung von **Transparenz bzgl. der Erfüllung der an das System gestellten Anforderungen**. Im Kontext der Überprüfung bzgl. der Erfüllung der Prinzipien der schlanken Produktion einer spanenden Fertigungslinie, sind in Anlehnung an Kapitel 2.1.1 folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Inwiefern befindet sich das Werkstück bei der Bearbeitung in der Linie in einem kontinuierlichen Fluss?
- Entspricht der Linientakt dem Takt des internen Kunden?
- In welchem Maße ist Volumenflexibilität vorhanden, um auf entsprechende Stückzahlenschwankungen reagieren zu können?

⁴⁷ Vgl. Kapitel 2.1.1.4

⁴⁸ Im Sinne des existenten Systems

- Besteht die Fähigkeit zur Fertigung multipler Varianten?
- Inwiefern existieren stationäre und variantenspezifische Variabilitäten, d.h. Abweichungen bzgl. der Zykluszeiten zwischen den Stationen und Varianten?

Um eine objektive Bewertung zu gewährleisten, ist es erforderlich, die o.a. Anforderungen in eine quantitativ erfassbare Form, also anhand von Kennzahlen⁴⁹, zu bringen. Im betriebswirtschaftlichen Sinne dienen diese der konzentrierten Abbildung komplexer Sachverhalte. Die wichtigsten Eigenschaften sind die zielgerichtete Verdichtung von erfassten Daten sowie die Darstellung ihrer Beziehungen, wodurch deren Abhängigkeiten und Entwicklungen transparent werden [GiKa07, S.787].

Die jeweiligen Fragestellungen sind folglich anhand mathematisch definierter Metriken quantitativ zu beantworten. Die zentrale Aufgabe des Evaluationsmodells besteht damit in der Quantifizierung und folglich Operationalisierung der Prinzipien und Gestaltungsrichtlinien der schlanken Produktion anhand der technologischen und organisatorischen Systemparameter. Die Systemevaluation *nach* den Prinzipien der schlanken Produktion erfolgt damit *anhand* der Ausprägung der Systemparameter, da diese den operationalisierten lean Prinzipien entsprechen.

Abschließend sind die singulären Lean-Metriken zu einem übergeordneten Indikator zu aggregieren. „[...] a metric that would act as a single, simple, yet comprehensive measure that could adequately represent the dynamic complexities [...]“ [Ray06, S.241]. Diese Kennzahl soll als Erstindikator den Vergleich verschiedener Fertigungssysteme hinsichtlich deren „Grad an Schlankheit“ ermöglichen. Eine adäquate Gewichtung ist in diesem Zusammenhang ebenfalls zu gewährleisten. In Anlehnung an [KoKa04, S.200] kann folgender Nutzen bei der Fusion der Kennzahlen erreicht werden. „[...] We are aware of the subjectivity which this involves, and of the difficulty of weighting different elements in a comprehensive index, and consequently have a sense of humility about the imperfect nature of this exercise. Yet we would argue that without trying to measure and aggregate a wide range of relevant factors, we have little scope for improving [...]“ [KoKa04, S.200].

Viele Evaluierungsmodelle geben auf Basis der generierten Bewertungsergebnisse an dieser Stelle eine Entscheidungsempfehlung zur priorisierten Ableitung von Maßnahmen im Zuge der Implementierung der schlanken Produktion. „[...] An effective assessment tool, therefore, plays a vital role in evaluating each stage of manufacturing and further in determining the strategy and priorities of lean implementation [...]“ [Ray06, S.239]. Die zu entwickelnde Methodik setzt hier jedoch neu an. Durch den Einsatz eines Operations Research (OR) Modells, ist unter vorhandenen Restriktionen, eine Fertigungslinie nach den Prinzipien der schlanken Produktion optimal zu gestalten. Die Aufgaben der mathematischen Optimierung konkretisieren sich dabei wie folgt:

2.2.2 Aufgabe des Optimierungsmodells

Die allgemeingültige Aufgabe der Systemoptimierung ist hingegen die Erzielung der **verbesserten Erfüllung der an das System gestellten Anforderungen**. Dies ist zielgerichtet durch den Einsatz eines Optimierungsmodells zu gewährleisten. Dabei wird in Anlehnung an Suhl et al. „[...] eine optimale Lösung unter Berücksichtigung der Zielfunktion und aller Nebenbedingungen [...]“ generiert [SuMe09, S.8]. Eine weitere Aufgabe ist in diesem Zusammenhang die Dimensionierung⁵⁰ der Entscheidungsvariablen zugunsten einer optimalen Zielfunktion. Für den Kontext der Arbeit entsprechen diese den abgeleiteten technologischen und organisatorischen Systemparametern bzw. operationalisierten Prinzipien der schlanken

⁴⁹ Oder auch Metriken

⁵⁰ Gans verwendet den Begriff der Dimensionierung innerhalb der Strukturplanung zur Bestimmung der Größen für Betriebsmittel, Personal und Flächen [Gans08, S.15]. Daher wird diese „Definition“/dieses Begriffsverständnis auch in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Produktion. Eine **optimierte Dimensionierung der Systemparameter**⁵¹ impliziert weiterhin einen **kostenminimierten Betrieb der Fertigungslinie**. Es besteht folglich eine positive Korrelation zwischen den Kosten, welche im operativen Betrieb der Fertigungslinie verursacht werden, und den operationalisierten Prinzipien der schlanken Produktion.

Operative Betriebskosten entsprechen dem monetären Aufwand, der in die Fertigung von Werkstücken während eines definierten Zeitintervalls investiert wurde. Diese Kosten finden sich anteilig in den Herstellkosten je Werkstück wieder und sind daher als Teilkosten zu bezeichnen. Für das Optimierungsmodell sind die relevanten Teilkosten⁵², welche wiederum durch die auf der Fertigungslinie ausgeführten Prozessschritte determiniert werden⁵³, zu bestimmen. Konkret sind die korrespondierenden technologischen und organisatorischen Systemparameter⁵⁴ der Prozessschritte anhand von Personen-, Maschinen- und Materialsätzen monetär zu bewerten. Dies impliziert ein top-down Vorgehen und wird damit den Anforderungen einer systematischen Kostengliederung gerecht.

Weiterhin ist zu überprüfen, inwiefern die identifizierten Gestaltungsrichtlinien und damit die Prinzipien der schlanken Produktion auf diese Kostenarten abgebildet werden können. Gemäß der Definition der Lean-Metriken implizieren diese, für eine jeweils optimierte Erfüllung, die Minimierung und/oder Maximierung der technologischen und organisatorischen Systemparameter. Diese Systemparameter-Variationen müssen analog durch die Minimierung der Kostenarten abgebildet werden können. Nur dann impliziert die Minimierung der Betriebskosten, als zentrale Aufgabe des Optimierungsmodells, eine **optimierte** Erfüllung der Prinzipien der schlanken Produktion. Implizit wird damit der Gestaltung⁵⁵ der Fertigungslinie nach diesen Prinzipien Rechnung getragen⁵⁶.

Abschließend sind die minimierten, operativen Betriebskosten mit deren ursprünglicher Ausprägung zu vergleichen. Das damit berechnete Einsparpotential kann optional den zu tätigen Investitionen, für die operative Realisierung der Systemparameter-Dimensionierung⁵⁷, gegenüber gestellt werden.

Zusammenfassend basiert die zu entwickelnde Methodik auf folgenden Aufgabestellungen:

- quantitative Bewertung eines Fertigungssystems bzgl. der Erfüllung der Anforderungen, welche aus den Prinzipien der schlanken Produktion resultieren, anhand der Überprüfung der Ausprägung der technologischen und organisatorischen Systemparameter
- Minimierung der operativen Betriebskosten der Fertigungslinie durch eine geeignete Dimensionierung der technologischen und organisatorischen Systemparameter
- Implizite Gestaltung des Systems nach den Prinzipien der schlanken Produktion aufgrund der positiven Korrelation dieser zu den operativen Betriebskosten

2.3 Anforderungen an die Methodik

Auf Basis der in Kapitel 2.2. vorgenommenen Aufgabenbeschreibung, lassen sich die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik wie folgt präzisieren⁵⁸. Gemäß der Gliederung der vorliegenden Arbeit in das Evaluations- und das Optimierungsmodell, erfolgt auch eine entsprechende Unterteilung der Anforderungen.

⁵¹ In technologischer und organisatorischer Hinsicht

⁵² Und damit Kostenarten

⁵³ Die Begriffe Teilkosten, (operative) Betriebskosten und Systemkosten werden daher im weiteren Verlauf der Arbeit vereinfachend synonym verwendet.

⁵⁴ Welche als ein Ergebnis des Evaluationsmodells abzuleiten sind

⁵⁵ Synonym zur **optimierten** Erfüllung

⁵⁶ Relevante Literaturstellen werden jedoch auf Ansätze zur Minimierung der Betriebskosten durch ausschließlich technologische und organisatorische Systemparameter-Variationen eingegrenzt.

⁵⁷ So kann beispielsweise eine Reduktion der Rüstzeit durch eine Schnellspannvorrichtung erreicht werden.

⁵⁸ In Anlehnung an [Roga09, S.55 ff.]

2.3.1 Anforderungen an das Evaluationsmodell

1) Mehrdimensionalität

Aufgrund der in Abschnitt 2.1.1 definierten Prinzipien der schlanken Produktion, muss das Bewertungsmodell auf einer multidimensionalen Sichtweise basieren. Nur dadurch wird die Integration von Verschwendung, Flexibilität und Variabilität gewährleistet und eine umfassende Bewertung sowie Transparenz ermöglicht.

2) Quantitatives Bewertungsvorgehen

Die Darstellung von Verschwendung, Flexibilität und Variabilität bedarf eines quantifizierbaren Bewertungsvorgehens, welches die Ermittlung singulärer Lean-Metriken für die jeweiligen Gestaltungsrichtlinien ohne subjektive Einflüsse zulässt. Abgeleitet hiervon, ergibt sich ein hohes Maß an Objektivität, das zusätzlich zur Entscheidungsfindung bzgl. der durchzuführenden Optimierungen beiträgt.

3) Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Diese Anforderung umfasst zwei Dimensionen. Einerseits muss durch eine *relative* Ausprägung der Lean-Metriken die Fähigkeit gegeben sein, die unterschiedlich dimensionierte Fertigungslinie, vor und nach deren Optimierung, gegenüber zu stellen. Des Weiteren soll die grundsätzliche Vergleichbarkeit verschiedener Fertigungslinien ermöglicht werden.

4) Schrittweise Detaillierung der Prinzipien der schlanken Produktion

Die Systematik des Evaluationsmodells muss im Zuge der Nachvollziehbarkeit über einen kaskadierten Aufbau verfügen. Konkret handelt es sich um eine Detaillierung der „Primär-Prinzipien“ Verschwendung, Flexibilität und Variabilität anhand der Lean-Metriken, bis zur Abbildung der singulären technologischen und organisatorischen Systemkennzahlen⁵⁹. Dadurch kann ein systematischer und strukturierter Aufbau der Operationalisierung erkannt werden.

5) Handhabung

Im Rahmen der Informationserhebung besteht die latente Gefahr der Bildung von „Kennzahlenfriedhöfen“. „[...] Der Begriff beschreibt ein überfrachtetes, unübersichtliches und mit den begrenzten Managementkapazitäten nicht mehr handhabbares Berichtswesen. [...]“ [Lay08, S.68]. Insbesondere vor dem Hintergrund der zuvor erläuterten Mehrdimensionalität, birgt die umfassende Berücksichtigung der Prinzipien der schlanken Produktion die Gefahr einer unüberschaubaren Kennzahlenmenge. Folglich ist das Bewertungsmodell im Zuge der Einsetzbarkeit und Handhabung auf die relevanten Kennzahlen der technologischen und organisatorischen Systemparameter einzugrenzen.

6) Einheitliche Erfassung der Messgrößen

Gemäß dem Grundsatz „dezentrale Netzwerke benötigen Standards und eine zentrale Steuerung“, muss auch für die Bewertung von Fertigungslinien nach den Prinzipien der schlanken Produktion eine standardisierte zentrale Erfassung der jeweiligen Bewertungskennzahlen erfolgen. Diese impliziert, neben Anforderung drei, die Vergleichbarkeit der Evaluationsergebnisse.

⁵⁹ Bzw. -parameter

2.3.2 Anforderungen an das Optimierungsmodell

1) Objektive Entscheidungsunterstützung für die Optimierung des Serienbetriebs

Die primäre Entscheidung bzgl. der Optimierung der spanenden Fertigungslinie, betrifft die Wahl des technologischen und organisatorischen Systemzustands. Da ein Systemzustand als Aggregation der Systemparameter erachtet wird, sind für letzt genannte eine ideale Dimensionierung zu wählen. Diese ist dann optimal, wenn die durch das System verursachten Betriebskosten minimiert werden. Die Summe der relevanten Kostenarten ist daher als zu minimierende Zielfunktion in das OR-Modell zu integrieren und impliziert eine objektive Entscheidungsunterstützung bzgl. der Dimensionierung der Entscheidungsvariablen.

2) Integration aller relevanten Kostenfaktoren

Um alle relevanten Komponenten der Betriebskosten zu berücksichtigen, ist eine Orientierung an den Ereignissen des Fertigungsprozesses erforderlich. In Abhängigkeit der vom bearbeiteten Werkstück eingenommenen Zustände⁶⁰, wie beispielsweise Warten aufgrund einer Störung an der nachfolgenden Station, resultieren Kosten⁶¹. Kumuliert ergeben diese für ein definiertes Betrachtungsintervall die operativen Betriebskosten und gewährleisten folglich deren vollständige Erfassung.

3) Erzeugung eines globalen Optimums

Die Zielfunktion ist prinzipiell als Summe obiger Kostenfaktoren zu definieren. Die minimierten Betriebskosten dürfen nicht einem lokalen Optimum entsprechen, sondern repräsentieren innerhalb des Lösungsraums das globale Optimum. Die positive Korrelation zu den Prinzipien der schlanken Produktion impliziert jedoch nicht deren optimale Lösung. Die Entscheidungsvariablen werden zugunsten der Kostenfunktion dimensioniert und führen lediglich zu einer *optimierten*, nicht jedoch optimalen, Erfüllung dieser Prinzipien.

4) Abbildung der Interdependenzen der Entscheidungsvariablen

Da sich die Entscheidungsvariablen mehrfach in den jeweiligen Kostenfaktoren-Funktionen wieder finden, sind den synergetischen, neutralen und konträren Verhaltensweisen dieser im Modell Rechnung zu tragen. Weiterhin ist dieser Sachverhalt transparent abzubilden.

5) Darstellung übergreifender Wirkungszusammenhänge durch weitere Nebenbedingungen

In Abhängigkeit der Ausprägung einzelner Entscheidungsvariablen, werden durch übergreifende Wirkungszusammenhänge, weitere Variablen determiniert. So resultiert beispielsweise bei Konstanz des Produktionsvolumens und einer erhöhten Anzahl an Rüstvorgängen aufgrund reduzierter Rüstzeiten, eine verringerte Losgröße. Dies ist durch die Formulierung entsprechender Nebenbedingungen im Modell abzusichern.

6) Eingrenzung des Lösungsraumes

Um den Anforderungen eines nicht ausschließlich theoretischen, sondern auch realisierbaren Lösungsraumes, gerecht zu werden, muss dieser eingegrenzt werden. Hierfür sind realistische Ober- und Untergrenzen für die Entscheidungsvariablen abzuleiten. Werden hingegen für einzelne Kenngrößen eine Vielzahl potentieller

⁶⁰ Daher dienen die technologischen und organisatorischen Systemzustände und -parameter, welche durch die Operationalisierung der Prinzipien der schlanken Produktion abgeleitet werden, als Eingangsbasis.

⁶¹ In diesem Falle Instandhaltungskosten aufgrund einer ungeplanten Störung, welche z.B. durch den Maschinenbediener behoben wird.

Lösungsoptionen hinterlegt, besteht die Gefahr, dass das formulierte Zielsystem nicht realisierbar ist.

2.3.3 Allgemeine Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik

Damit die Akzeptanz für die Modelle geschaffen werden kann, bedarf es der Praxistauglichkeit als eine der Schlüsselfaktoren. Allgemeine Anforderungen vor diesem Hintergrund sind:

1) Datenverfügbarkeit

Um einen möglichst geringen Aufwand beim Einsatz der Methodik zu erzeugen und somit zur Nutzerakzeptanz beizutragen, muss sichergestellt sein, dass alle für die Anwendung der Methodik erforderlichen Daten verfügbar und mit vertretbarem Aufwand beschaffbar sind.

2) Reproduzierbarkeit und Transparenz der Ergebnisse

Die Bestimmung reproduzierbarer und transparenter Ergebnisse ist durch die Methodik abzudecken. Dies erfordert eine sukzessive Vorgehensweise, die eine verständliche und logische Verkettung von Einzelschritten beinhaltet. Die Iteration gewährleistet somit die korrekte Anwendung der Gesamtmethodik, d.h. der Bewertung, Optimierung bzw. Gestaltung und der erneuten Evaluation.

3) Übertragbarkeit

Der Fokus der Entwicklung und Anwendung liegt auf spanenden Fertigungslinien in der Serienproduktion. Um die Methodik auf weitere Anwendungsfälle⁶² zu übertragen, bedarf es der Allgemeingültigkeit der grundsätzlichen Vorgehensweise [Moel08, S.70].

4) Erweiterbarkeit

Des Weiteren soll zukünftig eine Expansion der Methodik auf mehrere Systeme der Wertschöpfungskette ermöglicht werden. Hierfür sind eindeutige Schnittstellendefinitionen, Systemabgrenzungen sowie die Integration interner Kunden-Lieferanten-Beziehungen erforderlich.

5) Umsetzung in eine rechnergestützte Anwendung

Im Interesse der Beherrschung der Komplexität, der benötigten Algorithmen und des geringen Aufwands bei der Anwendung der Methodik, ist die Umsetzung in eine rechnergestützte Anwendung zwingend erforderlich. Durch ein exaktes Verfahren ist die Problemstellung weiterhin in einer akzeptablen Rechenzeit zu lösen.

⁶² Z.B. im Rohbau

3 Stand der Technik

In den voran gegangenen Abschnitten wurde gezeigt, welche unterschiedlichen Fachgebiete bei der Lösung der Aufgabenstellung eine Rolle spielen. Ausgehend von der Aufgabe der Quantifizierung der Prinzipien der schlanken Produktion, werden im Folgenden entsprechende Bewertungsansätze der Literatur analysiert. Arbeiten zur Minimierung der operativen Betriebskosten durch die Variation der operationalisierten Prinzipien der schlanken Produktion runden Kapitel drei ab.

3.1 Ansätze der Bewertung nach den Prinzipien der schlanken Produktion

Abele et al. beschreiben in [Abel11, S.706 ff.] einen Ansatz zur Bewertung einzelner Fertigungsschritte hinsichtlich der Aspekte Flexibilität und Flussorientierung. Neben quantitativen Größen wie Kosten und Stückzahlvorgaben, sind bei der Werkzeugmaschinenauswahl auch Anforderungen, welche aus der schlanken Gestaltung von Materialflüssen resultieren, zu berücksichtigen [Abel11, S.706]. Hierfür umfasst die Bewertungssystematik die Kriterien Flussorientierung, Variantenflexibilität und Mengenflexibilität. Die Ausprägung der qualitativ formulierten Kenngrößen wird jedoch anhand einer Punkte-Skala beschrieben. Folglich liegen der Methodik keine relativen Metriken zugrunde, anhand welcher eine objektive Bewertung der Gestaltungsrichtlinien Fluss, Varianten- und Mengenflexibilität ermöglicht wird.

Die Autoren in [KoKa04, S.199 ff.] entwickeln eine Methodik zur Ableitung eines sogenannten „Lean Production Index“. Dieser basiert auf drei Sub-Indizes, dem Flexibilitäts-, dem Qualitäts- sowie dem kontinuierlichen Verbesserungs-Index. Zur Berechnung des Flexibilitäts-Index werden sowohl operative Systemparameter, wie beispielsweise Rüstzeiten und Bestandsmengen, als auch Methoden der schlanken Produktion integriert. Für alle Elemente erfolgt zunächst eine Klassifikation bzgl. deren möglicher Ausprägungen. Die qualitativen oder quantitativen Klassenbeschreibungen werden abschließend gewichtet und aggregieren sich zu der übergeordneten Flexibilitätskennzahl. Analoges gilt für die beiden anderen Sub-Indizes. Der Lean Performance Index wird durch das arithmetische Mittel der Sekundärfaktoren ermittelt. Erneute Klassifikationen dienen der Reduktion möglicher Ausprägungen. Der Ansatz beinhaltet damit erneut quantifizierte Merkmalsausprägungen und keine relativen Lean-Metriken. Aufgrund der definierten Klassifikationen sind jedoch subjektive Bewertungs- und Gewichtungseinflüsse eliminiert.

Eine weitere Alternative stellen sogenannte prozessorientierte Kennzahlen in [Schu11, S.38 f.] dar. Zur Quantifizierung der Produktionsabläufe im Unternehmen, auf dem Weg zu einer schlanken Produktion, sind nach Auffassung des Autors die Kennzahlen OEE⁶³-Index, Prozesswirkungsgrad und Lean Performance Index relevant. Der OEE-Index entspricht dem Produkt aus Verfügbarkeit, Leistung und Qualität und ist folglich ein Maß für die Maschinenproduktivität und Prozesssicherheit [Schu11, S.38]. Es wird an dieser Stelle jedoch nicht beschrieben, wie sich die Sub-Kennzahlen zusammen setzen. Der Prozesswirkungsgrad ist als Relation der wertschöpfenden Bearbeitungszeiten und der Durchlaufzeit definiert. Damit entspricht dieser dem Verständnis des Flussfaktors im Rahmen der vorliegenden Arbeit (vgl. auch Kapitel 3.1.1). Der von den Autoren entwickelte Lean Performance Index ist durch die Multiplikation des Prozesswirkungsgrad mit dem OEE-Index quantifiziert. Damit beinhaltet dieser Ansatz z.T. relative Metriken sowie eine aggregierte Spitzenkennzahl, welche als Erstindikator eine objektive Bewertung nach Teilaspekten der Prinzipien der schlanken Produktion ermöglicht.

Offensichtlich konnte, trotz umfangreicher Recherchen, kein Bewertungsansatz gefunden werden, welcher die Prinzipien der schlanken Produktion umfassend (Berücksichtigung von

⁶³ Overall Equipment Effectiveness

Verschwendung, Flexibilität und Variabilität) quantifiziert. Daher sind im Folgenden weitere Ansätze der jeweiligen Disziplin zugeordnet.

3.1.1 Quantitative Darstellung von Verschwendung

Ansätze zur quantitativen Darstellung von Verschwendung können in die Kategorien Fabrikgestaltung, performance measurement und Fluss- bzw. Takt-Quantifizierung eingeteilt werden⁶⁴. Weiterhin umfassen obige Ansätze sowohl mathematisch definierte Kennzahlen als auch quantifizierte Skalenausprägungen der Gestaltungsrichtlinien. Für eine grundlegende Analyse sind daher beide Formen nachfolgend zu berücksichtigen.

Ansätze der Fabrikgestaltung:

Schulze et al. entwickeln in ihrer Arbeit sogenannte „Leanbefähiger“, welche die Eigenschaften der schlanken Produktion repräsentieren [ScKN09, S.684]. Auf Basis der Vermeidung der sieben Arten der Verschwendung werden qualitative Anforderungen identifiziert, welche es bei der Gestaltung einer Fabrik zu erfüllen gilt. Im Planungsprozess wird die Ist-Lean-Integration der betrachteten Fabrikobjekte bewertet, d.h. die Beschreibung der Skalenausprägungen bzgl. der Erfüllung der zuvor definierten Charakteristika [Klem09, S.657]. Analoges gilt für die in [ViCh11, S.431 ff.] generierte Methodik. Die Leanbefähiger werden jedoch anhand von Kriterien und Attributen detailliert. Vor dem Hintergrund der identifizierten Gestaltungsrichtlinien, korrelieren diese nicht mit obigen Leanbefähigern. Der Kontext der Fabrikplanung impliziert bei obigen Ansätzen strategische Anforderungen, welche nicht bzgl. der Verschwendung detailliert werden können.

Ansätze des performance measurement:

Der Ansatz von Evans und Alexander basiert hingegen auf der operativen Quantifizierung der Eliminierung von Verschwendung. Leistungsgrößen, wie beispielsweise Umlaufbestände, Anzahl von Ausschuss- oder Nacharbeitsteilen, beschreiben einerseits anhand ihrer aktuellen Ausprägung einen Systemzustand. Andererseits repräsentieren quantifizierte Soll-Werte dieser Attribute einen schlanken Idealzustand, dessen Erreichung anzustreben ist. „[...] However, it may not be possible to attain the desired values for all of the performance measures, since typically tradeoffs must be made between various pairs of performance measures. [...]“ [EvAl07, S.1615]. Vor diesem Hintergrund wird der hierarchische Zusammenhang⁶⁵ zw. den singulären Attributen multikriteriell modelliert. „[...] attributes for a decision problem typically form a hierarchy, with the major (or strategic) objectives towards the top of the hierarchy, and the tactical/operational objectives towards the bottom of the hierarchy. [...]“ [EvAl07, S.1618 f.]. Somit berücksichtigt dieser Bewertungsansatz neben der Quantifizierung von Verschwendung anhand von operativen Leistungsgrößen, auch die Anforderung eines kaskadierten Aufbaus.

Einen sehr umfassenden Ansatz für Leistungsgrößen der Verschwendung findet sich in [GuRa09, S.274 ff.]. Anhand von 90 Messgrößen kann der Schlankheitsgrad⁶⁶ einer Organisation ermittelt werden. Kritisch ist jedoch die Betrachtungsebene der singulären Größen zu sehen. Neben beispielsweise Taktzeiten, Zykluszeiten, Rüstzeiten etc.⁶⁷, werden u.a. Ausschuss- und Nacharbeitskosten sowie die Anzahl der Lieferanten als Messgrößen integriert. Unbeantwortet bleibt auch die Berechnung der Aggregation zum Schlankheitsgrad. Ein weiteres Defizit liegt in der fehlenden Quantifizierung der Messgrößen. Eine lediglich qualitative Erfüllung der Implementierungsanforderung, ist für den Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht ausreichend.

Auch Karlsson und Ahlström greifen die Idee der Operationalisierung von Verschwendung auf. Hierfür werden sogenannte Determinanten abgeleitet und quantitativ beschrieben. Konkret

⁶⁴ Die dargestellte Reihenfolge der Kategorien hat keine Aussagekraft bzgl. der Relevanz der jeweiligen Ansätze für die zu entwickelnde Methodik im Rahmen der vorliegenden Arbeit.

⁶⁵ In Form von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten

⁶⁶ Degree of leanness (DOL)

⁶⁷ Welche wiederum den technologischen und organisatorischen Systemparametern entsprechen

handelt es sich um die Determinanten Umlaufbestand, Losgröße, Rüstzeit, Maschinenstörzeit, Ausschuss- und Nacharbeitsteile [KaAh96, S.27]. Auch wenn von den Autoren eine explizite Abgrenzung zu den System-Leistungsgrößen⁶⁸ gefordert wird bzw. die Determinanten diese erst in ihrer Ausprägung bestimmen, können die Determinanten analog zu den Attributen in [EvAl07]⁶⁹ verstanden werden. Duque et al. bezeichnen die operativen Leistungsgrößen hingegen als Metriken und ergänzen die bereits in [KaAh96] erläuterten um die Anzahl der Transportvorgänge sowie die Flächenausnutzung [DuCa07, S.75 f.]. Weiterhin ist deren Berechnung mathematisch definiert. Unabhängig von der verwendeten Bezeichnung in den jeweiligen Ansätzen, handelt es sich bei den Attributen, Determinanten und Metriken um technologische und organisatorische Systemparameter (vgl. Kapitel 2.2). Diese repräsentieren die unterste Kennzahlenebene im Evaluationsmodell und finden sich folglich aggregiert in den Prinzipien der schlanken Produktion wieder. Allen Ansätzen ist daher gemein, dass eine quantitative Darstellung von Verschwendung unmittelbar anhand der operativen Systemparameter erfolgt⁷⁰. Neben der Eliminierung von Verschwendung betrachten die Autoren weitere Prinzipien der schlanken Produktion [KaAh96, S.26], [DuCa07, S.76]. Keines dieser umfasst jedoch die im Rahmen der Arbeit relevanten Prinzipien der Erhöhung von Flexibilität und Reduktion der Variabilität.

Eine statistische Erweiterung obigen Ansatzes findet sich in [SoFo02, S.104 ff.]. Jedoch liegen dieser Methodik keine mathematisierten Systemparameter zugrunde, sondern quantitative Skalenausprägungen. Die singulären Werte werden zu einem „degree of leanness“ mittels der Berechnung des arithmetischen Mittels aggregiert. Weiterhin lassen sich durch den Einsatz statistischer Methoden Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen identifizieren. Hinsichtlich der quantitativen Darstellung von Verschwendung ist diese Methodik offensichtlich nicht geeignet. Aufgrund der Ableitung eines „Lean-Grad“ wurde dieser Ansatz aus Vollständigkeitsgründen jedoch erläutert.

Ray et al. integrieren in ihren Ansatz sowohl die Idee der Operationalisierung von Verschwendung als auch die Methodik der Faktorenanalyse zur Ableitung eines sogenannten Lean Index. Da letzter genannter nicht unmittelbar quantitativ für ein Unternehmen erfasst werden kann, ist dieser durch eine Transformation von Sub-Metriken zu berechnen [Ray06, S.243]. Diese entsprechen wiederum den operativen Input- und Outputgrößen des Produktionsprozesses. Konkret handelt es sich bei den Inputvariablen um Rohmaterial, Arbeitskräfte und Energie. Der Output entspricht hingegen den Fertigprodukten sowie evtl. erzeugten Nebenprodukten. Mittels der Faktorenanalyse werden für die mathematisierten Input-/Outputvariablen die jeweiligen Korrelationskoeffizienten ermittelt. Dadurch resultiert eine objektive Gewichtung, inwiefern die singulären Metriken das Gesamtergebnis, den Lean Index, beeinflussen. Die Anforderungen hinsichtlich relativer Metriken sowie einer kaskadierten Struktur sind im Rahmen der Methodik umfassend erfüllt. Dennoch entspricht die unterste Aggregationsebene nicht den geforderten Systemparametern. Daher ist fraglich, inwiefern die definierten Input- und Outputgrößen auf den Kontext der Verschwendung schließen lassen.

Ansätze zur Quantifizierung der Gestaltungsrichtlinie Fluss:

Wan et al. präsentieren ein lineares Modell für die Berechnung eines „leanness measure“, welcher die Gestaltungsrichtlinie Fluss quantifiziert. Anhand des Werkstückflusses durch eine Produktionslinie oder Fabrik, können die erforderlichen Input- und Outputgrößen im Sinne der Wertschöpfung oder Verschwendung bewertet werden. „[...] Input variables are quantitative representation of the resources and efforts required to process a work pieces.“ [WaCh08,

⁶⁸ In diesem Kontext: Produktivität, Qualität, Kosten und Zeit.

⁶⁹ Auch hier kann ein erneutes Durcheinander an Begrifflichkeiten (siehe Determinanten, Attribute, Metriken, Leistungsgrößen etc.) identifiziert werden. Eine sorgfältige Analyse der Ansätze inkl. Abgrenzung/Zuordnung der verwendeten Begriffe ist vor diesem Hintergrund zwingend erforderlich.

⁷⁰ Vor diesem Hintergrund werden im weiteren Verlauf der Arbeit operative Leistungsgrößen und Systemparameter (sowohl technologischer als auch organisatorischer Art) als synonym erachtet.

S.6572]. Im Zuge der Vergleichbarkeit, werden diese anhand der Faktoren Kosten und Zeit bewertet. Der Output wird hingegen durch eine Multiplikation des Verkaufspreises des Fertigprodukts mit der Zufriedenheitsrate des Kunden quantifiziert. Auf Basis historischer Daten werden weiterhin die Absolutwerte der Input- und Outputgrößen⁷¹ eines ideal „leanen“ Prozesses ermittelt. Diese sind ausschließlich wertschöpfend. Abschließend erfolgt die Berechnung des leanness measure durch ein adaptiertes „data envelopment analysis Modell“. Dabei wird einerseits die Relation der Input-/Outputgrößen integriert, als auch die relative Ausprägung der jeweiligen Größen durch den Vergleich dieser mit dem Idealprozess. Resultierend entspricht der „leanness score“ einer Ausprägung zwischen null und 100% und ermöglicht eine objektive Vergleichbarkeit.

Laqua quantifiziert die Gestaltungsrichtlinie Fluss anhand der relativen Metrik Flussfaktor [Laqu10, S.812]. Konkret wird dieser anhand folgender Formel für einen Produktionsbereich berechnet:

$$\text{Flussfaktor} = \frac{\text{Summe aller Hauptzeiten}}{\text{Gesamtdurchlaufzeit}} \quad (3-1)$$

Die Summe der Hauptzeiten entspricht den ausschließlich wertschöpfenden Bearbeitungszeiten an allen Prozessschritten. Die unmittelbar mit den Bearbeitungsvorgängen verbundenen Nebenzeiten werden folglich nicht im Zähler berücksichtigt. Die Gesamtdurchlaufzeit bezeichnet hingegen die Zeit, welche ein Produkt benötigt, um den gesamten Produktionsbereich zu durchlaufen.

Da ein nicht kontinuierlicher Fluss Liege-, Leerlauf- und Wartezeiten impliziert, stellt die Durchlaufzeit einen maßgeblichen Indikator dar, um Verschwendung zu quantifizieren [Klev07, S.72]. Weiterhin erfüllt sie die Anforderungen einer systematischen Kaskadierung bis auf die operative Systemebene. Als absolute Kennzahl ist sie jedoch nur eingeschränkt aussagefähig. Der Flussfaktor ermöglicht hingegen eine relative und dadurch objektiv vergleichbare Aussage, welcher Anteil der Durchlaufzeit für die Bearbeitung des Produktes benötigt wird und welcher Anteil durch Verschwendung entsteht.

Eine geringe Abweichung obiger Definition findet sich in [ScWi04, S.252]. Der Flussgrad für einen Auftrag, auch als innerzyklische Parallelität bezeichnet, entspricht dem Verhältnis der Summe seiner Betriebsmittelbelegungszeiten zu seiner Durchlaufzeit⁷².

$$IZP_i = \frac{\sum T_{FPi}}{DLZ_i} \quad (3-2)$$

Mit

IZP innerzyklische Parallelität

T_{FP} Fertigungsplatzbelegungszeit

DLZ Durchlaufzeit - Fertigungsauftrag

Nach Auffassung der Autoren ist diese Kenngröße weiterhin geeignet, um „[...] Aufträge mit heterogenen Bearbeitungszeiten bezüglich ihres Durchlaufverhaltens zu vergleichen.“ [ScWi04, S.252]. Die Fertigungsplatzbelegungszeit inkludiert jedoch auch Nebenzeiten der Bearbeitung⁷³. Folglich sind der Flussfaktor (Formel 3-1) und die innerzyklische Parallelität (Formel 3-2) nicht identisch. Fogarty berücksichtigt im Rahmen seines Ansatzes die Standardabweichung der Durchlaufzeit [Foga92, S.172]. In Abhängigkeit des stochastischen Auftretens von Störungen

⁷¹ Hinsichtlich Kosten, Zeit und Wert des Fertigproduktes

⁷² In der englischsprachigen Literatur wird diese Definition des Flussgrads als „Value Added Efficiency“ (VAE) bezeichnet [Foga92, S.170].

⁷³ Beispielsweise durch Werkzeugwechsel oder Verfahrswege der Spindel

sowie Ausschuss und Nacharbeit, resultieren stark variierende Ausprägungen hinsichtlich der Durchlaufzeit. Die Integration dieser Aspekte ermöglicht daher eine adäquate Ausgangsbasis für eine realitätsnahe Quantifizierung der Gestaltungsrichtlinie Fluss.

Eine weitere Alternative zur Berechnung des Flussfaktors wird in [Krop09, S.170] präsentiert. Hier entspricht dieser dem Verhältnis der tatsächlich benötigten Durchlaufzeit (DLZ) zur minimalen physikalischen Durchlaufzeit (PDLZ).

$$\text{Flussfaktor} = \frac{DLZ}{PDLZ} \quad (3-3)$$

Die Durchlaufzeit ist in ihrer Ausprägung optimal bzw. physikalisch, wenn kein Werkstück an einer Station auf seine Bearbeitung oder auf den Weitertransport zur nächsten Station warten muss⁷⁴ [Krop09, S.166]. Damit entspricht die physikalische Durchlaufzeit der Summe aller Bearbeitungs- und Transportzeiten. Die tatsächliche Durchlaufzeit wird hingegen im eingeschwungenen Systemzustand erfasst. Bei der idealen Fertigung gleicht die tatsächlich benötigte DLZ der PDLZ. Damit ist ein Flussfaktor von eins erzielbar. Obige Definitionen (Formeln 3-1 und 3-2) ermöglichen dies hingegen nicht, da selbst bei der idealen Fertigung prozessbedingte Nebenzeiten und Transportzeiten als Bestandteile der Durchlaufzeit anfallen. Eine Metrik-Ausprägung in Höhe von 100% bzw. eins ist damit ausschließlich theoretisch erzielbar.

Ansätze zur Quantifizierung der Gestaltungsrichtlinie Takt:

Bornhäuser et al. quantifizieren in ihrem Ansatz die Gestaltungsrichtlinie Takt im Kontext der Fertigungssteuerung einer kundenauftragsbezogenen Werkstattfertigung [BoLW05, S.398]. Auf Basis des „Taktgedanken“ aus der Fließfertigung, wird die Durchlaufzeit eines Bauteils für jede Fertigungsinsel definiert. Diese wird sowohl durch die Durchführungszeit der Arbeitsumfänge in der jeweiligen Insel als auch durch die Liegezeiten⁷⁵ determiniert. Weiterhin sind der Bearbeitungsstart und das Bearbeitungsende fixiert. Die Taktdauer entspricht folglich der fixen Durchlaufzeit eines Bauteils durch eine Fertigungsinsel. Nach Auffassung der Autoren sind die einzelnen Takte innerhalb einer Fertigung zu harmonisieren [BoLW05, S.399]. Weiterhin wird die maximale Taktdauer durch die Kundenanforderungen begrenzt. Eine relative Metrik zur Überprüfung der Erfüllung der (internen) Kundenanforderungen bzw. des Kundentaktes wird jedoch nicht abgeleitet.

Trotz umfangreicher Recherchen, konnte kein weiterer Ansatz gefunden werden, welcher eine Quantifizierung obiger Gestaltungsrichtlinie beinhaltet. Weitere Ausführungen diesbzgl. finden sich daher in Kapitel vier.

3.1.2 Quantitative Darstellung der Flexibilität

Nachfolgende Ansätze fokussieren sowohl die Beschreibung der Volumen- als auch der Variantenflexibilität. Vor diesem Hintergrund ist eine Kategorisierung der Ansätze in Analogie zum Kapitel der Verschwendung (3.1.1) nicht erforderlich.

Abele et al. entwickeln eine Methodik zur Bewertung der Flexibilität im Kontext der spanenden Großserienfertigung. Das Kennzahlensystem basiert auf einer Spitzenkennzahl, der „Overall Equipment Flexibility“ (OEF) [Abel08, S.324]. Diese setzt sich wiederum aus vier Sub-Kennzahlen zusammen: Die *Prozessflexibilität* beschreibt die Fähigkeit, die Produktion ohne größeren Rüstaufwand auf ein anderes Produkt umzustellen und ist damit synonym zur Variantenflexibilität. Maßgebliche Faktoren hierfür, welche entsprechend in die Metrik integriert werden, sind Losgrößen in Abhängigkeit der Rüstzeit, Taktzeiten sowie die Ähnlichkeit der

⁷⁴ Sowohl ablauf- als auch störungsbedingt

⁷⁵ Vor und nach dem Bearbeiten

Varianten⁷⁶. Die Fähigkeit, Störungen im System zu kompensieren ist durch die Kennzahl „*Failure Compensation Flexibility*“ (FCFL) charakterisiert. Quantitativ betrachtet, handelt es sich um die Gesamtverfügbarkeit des Produktionskonzeptes unter Berücksichtigung von freien Kapazitäten, Pufferbeständen und der Reparaturzeit [Abel08, S.325]. Die *Mengenflexibilität* beschreibt den Grad, mit dem Nachfrageänderungen mittelfristig abgedeckt werden können⁷⁷. Relevante Aspekte sind diesbzgl. Kapazitätsreserven durch eine Erhöhung der Auslastung, Schichtreserven oder Lagerbestände. Den Fall einer langfristigen Mengenänderung berücksichtigt hingegen die *Erweiterungsflexibilität*. Auf Basis der berechneten Einzelkennzahlen, erfolgt die Verdichtung zur Spitzenkennzahl, der OEF. Für die Gewichtung der Einzelkennzahlen bestehen zwei grundlegende Optionen. Qualitativ erfolgt die Verknüpfung durch eine einfache Abschätzung oder durch einen paarweisen Vergleich. Quantitativ werden monetäre Größen als Bezugspunkte zur Gewichtung genutzt. Konkret handelt es sich um Kosten, welche aus dem Einsatz obiger Maßnahmen⁷⁸ resultieren. Abele et al. berücksichtigen umfassend die relevanten Flexibilitätsaspekte der spanenden Fertigung. Auch die, für die zu entwickelnde Methodik, erforderlichen Gestaltungsrichtlinien werden in diesem Ansatz quantifiziert. Eine detaillierte, mathematische Beschreibung der jeweiligen Metriken ist jedoch nicht inkludiert. Dennoch können die jeweiligen Faktoren der Kennzahlen⁷⁹ als Impulse für die Ableitung der relativen Lean-Metriken verwendet werden.

Auch Schuh et al. beschreiben ein Kennzahlensystem, „[...] mit dem sich die Stückzahl-, Varianten- und Produktänderungsflexibilität bewerten lässt.“ und weiten dieses auf die Betrachtungsebene des Produktionssystems aus [ScGW04, S.299]. Bzgl. der Kennzahlen wird lediglich die Variantenflexibilität exemplarisch beschrieben. Die hierfür relevante Beschreibungsgröße ist nach Auffassung der Autoren der Gesamtstückzahlausstoß des Produktionssystems [ScGW04, S.302]. Dieser wird wiederum durch verschiedene Einsteuereungs- und Variantenverhältnisszenarien beeinflusst. Je nach Sequenzfolge der Varianten steigt der Rüstzeitanteil⁸⁰ und es entstehen Kapazitätsverluste. Das Variantenverhältnis determiniert hingegen, in Abhängigkeit der jeweiligen Bearbeitungs- und Rüstzeiten, die Anzahl und Menge der durch das Produktionssystem erzeugten Varianten. Folglich sind die kritischen Erfolgsfaktoren für eine hohe Variantenflexibilität, geringe Rüstzeiten sowie eine geringe Abweichung zwischen den Rüst- und Bearbeitungszeiten der einzelnen Varianten. Die resultierende Kennzahl integriert diese Aspekte gemäß folgender Berechnungen:

- Ermittlung der durchschnittlichen Zykluszeiten über alle Varianten mit anteiligen Rüstzeiten bei verschiedenen Sequenzen (und Losgrößen)
- Berechnung der mittleren quadratischen Abweichung zur Standardzykluszeit
- Verhältnis der Abweichung zur Standardzykluszeit quantifiziert die Empfindlichkeit des Produktionssystems hinsichtlich der Programmabweichung und folglich die Variantenflexibilität

Kritisch anzumerken ist jedoch die Berücksichtigung des Aspekts der Volumenflexibilität innerhalb obiger Kennzahl. Marktinduzierte Nachfrageänderungen bzgl. des Variantenverhältnisses implizieren ebenfalls eine Variation des Gesamtstückzahlausstoßes. Diesbzgl. ist eine entsprechende Trennung erforderlich.

Bernardo et al. berücksichtigen in ihrem Ansatz die Aspekte der Routen- und Kapazitätsflexibilität [BeMo92, S.148]. Die Routenflexibilität wird dabei als die Fähigkeit des

⁷⁶ Welche wiederum anhand der jeweils erforderlichen Anzahl an Werkzeugen, Spindeln und Magazinplätzen quantifiziert werden.

⁷⁷ Und entspricht damit der Volumenflexibilität

⁷⁸ beispielsweise durch Überstunden

⁷⁹ Auch wenn diese lediglich qualitativ beschrieben werden

⁸⁰ Unter der Annahme, dass sich die Rüstzeiten der einzelnen Varianten unterscheiden

Systems verstanden, auf interne Störungen⁸¹ zu reagieren. Operativ ist dies durch verschiedene Materialflussrouten für die Werkstücke zu realisieren, wodurch entsprechende Ausfälle der Systemkomponenten kompensiert werden können. Da diese Gestaltungsrichtlinie für den Kontext der Arbeit nicht relevant ist, wird auf eine detaillierte Erläuterung der korrelierenden Kennzahl verzichtet. Die Kapazitätsflexibilität wird hingegen als die Fähigkeit definiert, auf externe Störungen, konkret auf unerwartete Nachfrageänderungen, zu reagieren. Prinzipiell ist die Kapazität durch das installierte System limitiert. Je höher jedoch die Maximalkapazität für ein Produkt i im Verhältnis zur durchschnittlichen Nachfrage nach i ist, desto höher ist die Kapazitätsflexibilität. Die Maximalkapazität für ein Produkt i setzt sich wiederum aus der tatsächlich erzeugten Produktionsmenge von i sowie dem noch verfügbaren Potential für i zusammen. Damit resultiert folgende, relative Metrik für die Kapazitätsflexibilität:

$$\text{Kapazitätsflexibilität}_i = \frac{\text{Anzahl der potentiell erzeugbaren Einheiten von } i}{\text{durchschnittlicher Bedarf für } i} \quad (3-4)$$

Der grundlegende Gedanke der noch verfügbaren Kapazität im Verhältnis des Bedarfs, wird als Impuls für die zu entwickelnde Lean-Metrik der Volumenflexibilität aufgegriffen.

Rogalski quantifiziert hingegen die Mengen- und Mixflexibilität⁸² unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Der Grundgedanke bei der Bewertung der Mengenflexibilität ist der sogenannte Flexibilitätsraum, welcher ins Verhältnis zur wirtschaftlichen Maximalkapazität gesetzt wird [Roga09, S.103]. Der Flexibilitätsraum entspricht wiederum der Differenz zwischen der wirtschaftlichen Maximalkapazität und dem Break-even-Punkt⁸³. Somit kennzeichnet dieser Raum den Stückzahlkorridor des wirtschaftlichen Produktionsbereichs. Die Mixflexibilität wird durch das Verhältnis von systemoptimalem Produktionsgewinn zur produktspezifischen Gewinnabweichung ermittelt. Gemäß dieser Definition, umfasst das Verständnis der Mixflexibilität die Fähigkeit eines Systems, Produkte/Varianten zu substituieren oder auf diese zu verzichten, ohne den Gewinn zu beeinflussen. Die resultierenden Metriken sind folglich hinsichtlich ihrer Ausprägung relativ. Stark nachteilig ist im Kontext der Mengenflexibilität die Vernachlässigung des internen Kundenbedarfs. So können beispielsweise ein großer Flexibilitätsraum und damit eine hohe Mengenflexibilität vorliegen, welche evtl. nicht gefordert sind. Die Integration der Nachfrage in die Metrik wird deshalb als elementar erachtet. Weiterhin korreliert das bei Rogalski zugrunde gelegte Verständnis der Mixflexibilität nicht mit der Gestaltungsrichtlinie der Variantenflexibilität in dieser Arbeit⁸⁴.

Roscher identifiziert im Kontext von Montage-Flexibilitätsstrategien zwei prinzipielle Gestaltungsalternativen – die Produkt- und die Volumenflexibilität [Rosco07, S.35 ff.]. Für eine volumenflexible Montagelinie werden die Betriebsnutzungszeit und Taktzeit als Stellhebel zum Abfangen von Nachfrageschwankungen qualitativ beschrieben. Konkret werden für die Variation der Betriebsnutzungszeit die Schichtlänge, die Anzahl der Schichten sowie die Pausenproduktion als operative Parameter angeführt. Die Veränderung der Taktzeit wird hingegen auf eine Neuaustaktung der Linie durch Verschiebung von Arbeitsvorgängen zwischen den Stationen inkl. des Anlagenumbaus reduziert [Rosco07, S.37]. Weitere operative Parameter, wie beispielsweise die Rüst- und Störzeitreduktion⁸⁵, werden in diesem Zusammenhang nicht genannt. Der Stellhebel zur Realisierung produktflexibler Montagelinien entspricht nach Roscher der Integration bzw. Desintegration von Arbeitsvorgängen. Hierfür werden erneut die Neuaustaktung der Linie sowie der Umbau der Anlagen angeführt. In Analogie zu den Ansätzen des performance measurement im Kontext der Verschwendung, beschreibt der Autor technologische und organisatorische Systemparameter zur operativen Umsetzung der

⁸¹ Z.B. Maschinenausfälle

⁸² Synonym zu den Begriffen der Volumen- und Variantenflexibilität

⁸³ Dieser kennzeichnet die Produktionsmenge, bei welcher die Umsatzerlöse den Gesamtkosten entsprechen, wodurch der resultierende Gewinn null ist.

⁸⁴ Siehe auch Kapitel 2.1.1.2

⁸⁵ Welche sich anteilig in der Taktzeit der Linie wieder finden

erforderlichen Flexibilitätsrichtlinien. Diese werden jedoch nicht quantifiziert oder in eine kaskadierte Struktur zur Ableitung von übergeordneten Flexibilitätsmetriken überführt. Vielmehr liegt der Fokus auf der monetären Bewertung der Flexibilität, d.h. der Ableitung von Anpassungs- und Folgekosten durch die Variation obiger Stellhebel.

Auch Wemhöner berechnet für die Flexibilitätsoptimierung im Automobilrohbau sogenannte Leistungskenngrößen [Wemh05, S.141]. Das entgangene Produktionsvolumen wird einerseits als geeigneter Indikator für eine mangelnde Produktmix- und Volumenflexibilität identifiziert. Andererseits als prinzipiell geeignete Kennzahl, „[...] um den Nutzen produktionswirtschaftlicher Flexibilität zu beschreiben.“ [Wemh05, S.142]. Das entgangene Produktionsvolumen entspricht der Differenz zwischen der erzeugten Stückzahl und der Nachfrage während desselben Zeitraums. Für eine relative Metrik wird aus dem entgangenen Produktionsvolumen als absolute Kennzahl, die Lieferbereitschaft ermittelt. Diese ist gemäß nachfolgender Formel für ein Zeitintervall I definiert:

$$\text{Lieferbereitschaft}_I = \frac{\text{Anzahl produzierter Produkte}_I}{\text{nachgefragte Anzahl an Produkten}_I} \quad (3-5)$$

Kritisch anzumerken ist in diesem Zusammenhang die Ableitung einer Metrik für zwei unterschiedliche Flexibilitätsarten. Die Fähigkeit zur Fertigung von Varianten wird durch obige Formel nicht quantifiziert. Für das zugrunde gelegte Verständnis der Volumenflexibilität im Rahmen der vorliegenden Arbeit, bietet diese Kennzahl jedoch einen geeigneten Impuls.

3.1.3 Quantitative Darstellung der Variabilität

Lanza et al. entwickeln ein Modell zur Berechnung der Lebenszykluskosten eines Produktionssystems [Lanz10, S.478 ff.]. Zur adäquaten Abbildung dieser, werden entsprechende Produktionssystemunsicherheiten in das Bewertungsmodell integriert. So schwankt der Leistungsgrad, d.h. die Bearbeitungszeit, aufgrund des Bedien- oder Betriebsverhaltens der Maschine von Werkstück zu Werkstück stochastisch. Daher wird dieser als normalverteilte Zufallsvariable betrachtet⁸⁶. Die Variabilitäten, als Synonym zu den Schwankungen der Bearbeitungszeiten, werden anhand des Variationskoeffizienten der Bearbeitungszeiten gemäß nachfolgender Formel quantifiziert:

$$c_{ab,i}^2 = \frac{\text{Var}(t_{b,i})}{E(t_{b,i})^2} \quad (3-6)$$

Mit:

$c_{ab,i}^2$ quadrierter Variationskoeffizient der Bearbeitungszeit an Prozess i

Var Varianz

E Erwartungswert

$t_{b,i}$ tatsächliche Bearbeitungszeit im Prozess i (Zufallszahl)

Diese Variabilitäten resultieren primär aus den unterschiedlichen Bearbeitungszeiten der einzelnen Varianten in den Prozessen [Lanz10, S.481]. Obige Metrik repräsentiert folglich eine Option zur quantitativen Darstellung der variantenspezifischen Variabilität. Kritisch anzumerken ist jedoch, dass die Bearbeitungszeit an einer Station für eine Variante nicht als deterministische Eingangsgröße, sondern als Zufallszahl verwendet wird. Damit werden auch die Perspektive der

⁸⁶ Die Ausprägungen der Bearbeitungszeiten folgen prinzipiell einer Normalverteilung. Der Verlauf dieser ist hingegen stochastisch.

stochastischen Variabilität in die Berechnung integriert sowie eine eindeutige Trennung der unterschiedlichen Variabilitätsformen⁸⁷ vernachlässigt.

Lorentzen et al. präsentieren in ihrem Ansatz eine umfassende Variabilitätstypologie für den Kontext starr verketteter Fließprozesse [Lore11, S.214 ff.]. Weiterhin wird der Betrachtungsrahmen auf die Großserie eingegrenzt, welche die Produktion der Varianten in großen Losen impliziert. Dadurch werden variantenbedingte Zeitspreizungen an einer Station zwischen zwei aufeinander folgenden Zyklen und damit die Beschreibung der variantenspezifischen Variabilität ausgeschlossen. Prinzipiell wird die Variabilität als Streuung der Ist-Werte um einen Soll-Wert verstanden [Lore11, S.214]. Die sogenannte planbare Zykluszeitvariabilität entspricht Ausschlägen in der Zykluszeit durch geplante Tätigkeiten. Relevant, im Rahmen der vorliegenden Arbeit, sind diesbzgl. Abtaktungsvariabilitäten, welche durch die Abweichung von Zykluszeiten zwischen den Prozessen entstehen. Die Begriffe Abtaktungsvariabilität und stationäre Variabilität sind folglich synonym. Nicht-planbare Zykluszeitvariabilitäten treten hingegen stochastisch auf. In Abhängigkeit der Ausprägungen der Schwankungen sowie der zugrunde liegenden Ursache, streuen die Ist-Zykluszeiten um den geplanten Mittelwert ohne diesen zu verschieben oder folgen einem neuen Trend [Lore11, S.217]. Zusammenfassend liegt diesem Ansatz eine qualitative Erläuterung der unterschiedlichen Variabilitätsrichtlinien zugrunde. Weiterhin werden Impulse der Quantifizierung gegeben, indem die Zykluszeiten als technologische Systemparameter und konkrete Beschreibungsgrößen abgeleitet werden.

Rajaram et al. formulieren für die kontinuierliche Fließfertigung ein Modell, welches Variabilität hingegen anhand von Schwankungen des Outputs quantifiziert [RaRo04, S.312 ff.]. Empirische Untersuchungen zeigen, dass dieser in seiner Ausprägung täglich zwischen zehn und 50% vom Planwert variiert. Weiterhin ist dieser Sachverhalt primär auf Variabilitäten in den singulären Prozessschritten zurück zu führen. „[...] Rather, we found that small levels of variability at each stage due to operational procedures seemed to result in amplified output variability. [...] and variability at individual stages are reflected in output rates rather than service times. [...]“ [RaRo04, S.313]. Folglich wird die Varianz des Outputs an jeder Station für die quantitative Darstellung der Variabilität berechnet. Hierfür wird eine umfangreiche (mathematische) Modellierung des mehrstufigen Systems inkl. der Störungen, welche die Variabilität induzieren, abgeleitet. Die entwickelte Methodik stellt eine Alternative zu [Lanz10] und [Lore11] dar, welche die Variabilität anhand der zeitbezogenen Perspektive quantifizieren. Dennoch wird der Systemoutput als Resultat der Ausprägungen der technologischen und organisatorischen Systemparameter im Kontext der vorliegenden Arbeit verstanden. Daher erfüllt dieser Ansatz nicht die in Kapitel 2.3.1 gestellten Anforderungen, zur Ableitung einer relativen Lean-Metrik.

3.2 Ansätze der mathematischen Optimierung zur Minimierung der Betriebskosten anhand der technologischen und organisatorischen Systemparameterdimensionierung

Lanza et al. präsentieren in [Lanz11, S.418 ff.] einen Ansatz zur Minimierung der erwarteten Gesamtkosten⁸⁸ eines Produktionssystems auf Basis der stochastisch dynamischen Optimierung. Die Gesamtkosten umfassen Personal-, Maschinen- und Materialkosten und werden aus der Monetarisierung aller Prozessschritte des betrachteten Produktionssystems ermittelt. Konkret werden diese mit variablen bzw. umgelegten Fixkosten (z.B. Stundenlöhne, Maschinenstundensätze) bewertet. Weiterhin werden Bestands- und Ausfallkosten in die Betrachtung integriert. In Abhängigkeit unterschiedlicher Nachfrageszenarien werden für diskrete Zeitpunkte „[...] mögliche Aktionen in Form von kapazitiven Anpassungen festgelegt.“ [Lanz11, S.420]. Die hierfür betrachteten Entscheidungsvariablen umfassen den Austausch einzelner

⁸⁷ Wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit gefordert (siehe Kapitel 2.1.1.3)

⁸⁸ Über den Planungshorizont

Maschinen, die Anpassung von Mitarbeiterzahlen und Schichten sowie die Verlagerung singulärer Prozessschritte zu Zulieferern. Das korrespondierende Kostenmodell definiert folglich die Wertfunktion für die Ausübung der beschriebenen Aktionen. Um weiterhin stochastische Einflüsse abbilden zu können, bei einer parallelen Optimierung des dynamischen Systems, werden abschließend sequentielle Handlungsempfehlungen auf Basis Markovscher Entscheidungsprozesse abgeleitet. Die entwickelte Methodik wird den Anforderungen einer geeigneten Kostengliederung (siehe Kapitel 2.2.2) gerecht. Die identifizierten Entscheidungsvariablen entsprechen jedoch nur hinsichtlich des Schichtmodells den geforderten organisatorischen Systemparametern. Die dargestellte Dimensionierungsebene der Entscheidungsvariablen befindet sich auf einem höheren Abstraktionsniveau und eignet sich folglich nicht im Rahmen der zu entwickelnden Modelle.

Abele et al. entwickeln für den Kontext der Werkzeugmaschinengestaltung ein Modell zur Bewertung der Betriebskosten dieser [Abel11b, S.46 ff.]. Hierfür wird ein Prozessmodell, welches aus funktionaler Sicht die durchzuführenden Prozessschritte⁸⁹ und korrespondierenden Systemelemente beschreibt, abgeleitet. Für jeden Prozessbaustein werden wiederum charakterisierende Parameter, wie beispielsweise Stellfläche, Verfügbarkeit, etc., definiert. Auf Basis eines Simulationsmodells werden die Ausprägungen dieser Parameter konfiguriert. Als Ergebnisse resultieren Materialflusskenngößen⁹⁰ sowie Betriebskosten. Die definierten Parameter können analog zu den technologischen und organisatorischen Systemgrößen der zu entwickelnden Methodik verstanden werden. Kritisch ist jedoch das Verfahren der Dimensionierung dieser durch ein Simulationsmodell zu sehen. Ein globales Optimum, hinsichtlich minimaler Betriebskosten, wird dadurch nicht gewährleistet. Offen bleibt auch die Transformation, im Sinne der monetären Bewertung, obiger Systemparameter für die Ableitung der Betriebskosten.

Tonigold kombiniert hingegen für die Anpassungsplanung spanender Fließfertigungslinien, Ansätze der Programm-, Ressourcen- und Prozessplanung zur Erzielung einer kostenminimalen Systemkonfiguration [Toni07, S.2 ff.]. Hierfür berücksichtigt der Autor periodenfixe und stückzahlvariable Kosten⁹¹ in Abhängigkeit des technischen und organisatorischen Systemzustands sowie Aufwendungen⁹², welche aus einer entsprechenden Systemänderung resultieren. Zusätzlich werden Transport-, Lager- und Fremdbezugskosten in die Betrachtung integriert. Während auf der Ebene der Programm- und Ressourcenplanung zu entscheiden ist, auf welchen Ressourcen welche Mengen⁹³ hergestellt werden sollen, erfolgt auf der Ebene der Ressourcen- und Prozessplanung die *Feinplanung* des Fertigungssystems. Konkret ist zu entscheiden, „[...] wie viele und welche Maschinen benötigt werden und welche Prozessschritte darauf ausgeführt werden.“ [Toni07, S.32]. Folglich sind die organisatorischen Handlungsspielräume durch die Anzahl und ggf. das Qualifizierungsprofil der Mitarbeiter, Arbeitszeiten und die Anzahl an Schichten definiert. Weitere Stückzahl-Kapazitäten können durch Lagerhaltung und Fremdbezug bereit gestellt werden. Aus technischer Sicht sind die Einhaltung der vorgegebenen Taktzeit an jeder Station und des Vorranggraphen sowie der Flächenbedarf und die Verkettung der singulären Stationen relevant. Damit betrachtet dieser Ansatz keine Problemfelder der operativen Ebene. Entscheidungen bzgl. der Losgrößenbildung, der Auslastungsglättung über alle Produktvarianten und Stationen sowie Maschinenausfälle werden hingegen explizit ausgeschlossen [Toni07, S.2]. Diese Entscheidungen werden jedoch im Zuge der technologischen und organisatorischen Systemparameter-Definitionen (siehe u.a. Kapitel 2.1.1.4) im Rahmen dieser Arbeit gefordert. Vor diesem Hintergrund werden weitere Ansätze der Konfigurationsplanung und kostenorientierten Leistungsabstimmung⁹⁴ als nicht

⁸⁹ Z.B. Spannen, Beladen, Bearbeiten

⁹⁰ Wie beispielsweise durchschnittlicher Bestand im System und Durchlaufzeit

⁹¹ Sogenannte Betriebs-, Verbrauchs- und Gemeinkosten

⁹² Im Sinne von Investitionen

⁹³ Hinsichtlich Stückzahlen und Varianten

⁹⁴ Welche wiederum die Basis für Tonigolds Arbeit bilden

relevant erachtet und im weiteren Verlauf dieses Kapitels nicht näher erläutert. Dennoch bietet obige Arbeit geeignete Impulse hinsichtlich einer Teilmenge der betrachteten technischen und organisatorischen Systemzustände. So werden Arbeitszeiten, Schichtmodelle und Taktzeiteinhaltungen als operationalisierte lean-Prinzipien aufgegriffen und in die Methodik integriert.

Helmdach präsentiert einen Ansatz zur Bestimmung der Herstellkosten für den Kontext der variantenreichen Serienproduktion unter der Fokussierung von Gleichteilestrategien [Helm11]. Da die Herstellkosten in Produktion und Logistik durch den operativen Betrieb verursacht werden und anteilig den Werkstücken zugerechnet sind, werden diese im Folgenden als (operative) Betriebskosten interpretiert⁹⁵. Folgende Komponenten der Herstellkosten werden durch den Autor identifiziert und mathematisch formalisiert: Material- und Fertigungskosten, Transportkosten, Lagerkosten, Einkaufskosten, Kosten für fremdzuvergebende Operationen, Rüstkosten, Losanlaufkosten, sogenannte Modell-Mix-Kosten⁹⁶, Instandhaltungskosten sowie Kosten für Ausschuss und Nacharbeit [Helm11, S.5 ff.]. Folglich bietet diese Kostengliederung die geforderte Orientierung an den Ereignissen des Fertigungsprozesses⁹⁷ und eine grundlegende Basis für die monetäre Transformation der technologischen und organisatorischen Systemparameter. Die Entscheidungsvariablen bei der Gestaltung von Arbeitssystemen mit Fließlinienfertigung (als Teilmenge des hierarchischen Planungsmodells) umfassen jedoch die Anzahl an erforderlichen Arbeitskräften und Maschinen sowie die Bestimmung des optimalen Produktmix auf den singulären Linien [Helm11, S.26]. Zusätzlich wird die Prämisse einer möglichst gleichmäßigen Stationsauslastung⁹⁸ hinterlegt, mit dem Ziel der Minimierung der Anzahl an Arbeitsstationen und der damit einhergehenden Personalkosten⁹⁹. Analog zu Tonigold werden erneut die Ansätze der Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung aufgegriffen und somit nicht weiter im Rahmen der zu entwickelnden Methodik verfolgt.

Die Minimierung einer Teilmenge der operativen Betriebskosten wird hingegen in [Abel10, S.572 ff.] fokussiert. Die Autoren entwickeln einen Ansatz zur Optimierung der Werkzeugwechselstrategie mit dem Ziel der Reduktion von (geplanten und ungeplanten) Anlagenstillständen. Durch die Bündelung und Parallelisierung von Werkzeugwechseln resultieren eventuell erhöhte Personal- und Werkzeugkosten. Letzt genannte sind auf Verluste bzgl. des Abnutzungsvorrats der Werkzeuge zurück zu führen und entsprechen folglich den Kosten der nicht genutzten Werkzeuge. Diese Kosten sind den Opportunitätskosten, durch die entgangene Produktionszeit bei einem Stillstand der Produktionslinie, gegenüber zu stellen. Durch die Minimierung der Gesamtkosten anhand eines gemischt-ganzzahligen-linearen OR-Modells, resultiert ein ideal dimensionierter Maschinenstillstand, welcher wiederum einem technologischen Systemparameter im Rahmen der vorliegenden Arbeit entspricht.

Verfahren zur Ermittlung einer wirtschaftlich orientierten Losgröße, basieren hingegen auf dem Grundansatz der Bewertung von Lagerhaltungs- und Auftragswechselkosten¹⁰⁰ und repräsentieren folglich eine weitere Teilmenge minimierter Betriebskosten. Durch eine steigende Losgröße reduziert sich die Anzahl der erforderlichen Rüstvorgänge, wodurch wiederum die Auftragswechselkosten sinken. Andererseits steigen, durch erhöhte Losgrößen, die Verweilzeit in der nachfolgenden Lagerstufe sowie die damit verursachten Lagerhaltungskosten. Prinzipiell lassen sich diese Verfahren, in Abhängigkeit der Annahme statischer oder dynamischer Bedarfsverläufe sowie deterministischer oder stochastischer Lagerabgänge, in

⁹⁵ Somit wird auch der zugrunde gelegte Ansatz als relevant für Kapitel 3.2 erachtet.

⁹⁶ Darunter werden wiederum Kosten für Taktausgleichsverluste sowie Personalkosten für den Einsatz von Springern verstanden [Helm11, S.13].

⁹⁷ Siehe auch Kapitel 2.2.2

⁹⁸ = Austaktung

⁹⁹ Dieses Problem wird im Rahmen der Linienaustaktung als „simple line balancing problem“ verstanden [Tonigold, S.9].

¹⁰⁰ Diese werden synonym zum Begriff der Rüstkosten aufgrund eines Produktwechsels verstanden.

statische, dynamische oder stochastische Ansätze klassifizieren¹⁰¹. Das häufig zitierte und angewandte statische Grundmodell der Losgrößenplanung ist unter dem Namen Andler'sche Losgrößenformel bekannt [WoDo02, S.426]. Münzberg et al. erweitern diesen Ansatz durch die Integration logistikinduzierter Kosten, welche mit einer zunehmenden Losgröße steigen [MuSN11, S.22]. Hierfür werden logistische Kenngrößen, wie beispielsweise Durchlaufzeit, Termintreue und Flexibilität, in Kostenfunktionen transformiert und über der Losgröße additiv aufgetragen. Die dadurch generierte, ideale Losgröße zeigt eine signifikante Abweichung im Vergleich zum Grundmodell durch eine entsprechend reduzierte Ausprägung dieser [MuSN11, S.25]. Kritisch anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass die logistikinduzierten Kostenbestandteile nicht geschlossen, mathematisch dargestellt werden. „[...] Die Vielfältigkeit und Komplexität der Wirkzusammenhänge lässt eine derartige Lösung [...]“ nach Auffassung der Autoren bis dato nicht zu [MuSN11, S.26]. Weiterhin ist die Vollständigkeit der logistikinduzierten Kosten zu hinterfragen. Durch eine Reduktion der Losgröße werden ggf. die Anzahl der Transportvorgänge erhöht, da nur teilweise gefüllte Behälter transportiert werden. Die dadurch konträr verlaufenden Transportkosten, als Teilmenge der „Gesamt-Logistikkosten“, werden im Rahmen des Ansatzes nicht berücksichtigt. Auch Herrmann erweitert das klassische Losgrößenmodell, jedoch um die Faktoren Bestellmengen-, Transport-, Einlager- und Lagerplatzkosten [Herr10, S.820 f.]. Weiterhin werden verspätete Lieferungen anhand von Fehlmengenkosten quantifiziert. Zusammenfassend bieten obige Ansätze¹⁰² geeignete Impulse hinsichtlich der umfassenden Berücksichtigung sogenannter Logistik-Prozesskosten. Aufgrund des betrachteten Systems in der vorliegenden Arbeit, sind diese analog zu den Prozesskosten der Fertigung zu betrachten und münden additiv in den geforderten Betriebskosten. Dennoch ist die Dimensionierung der Fertigungslosgröße im Kontext *aller* identifizierten technologischen und organisatorischen Systemparameter (siehe Kapitel 2.1.1.4) vorzunehmen, um eine Gestaltung der Linie nach den Prinzipien der schlanken Produktion zu gewährleisten.

¹⁰¹ Aufgrund der Vielfalt diesbzgl. existierender Ansätze in der Literatur, wird auf eine ausführliche Darstellung der Unterscheidung dieser im Rahmen der Arbeit verzichtet.

¹⁰² Sowie zahlreiche weitere Untersuchungen zum Problem der optimalen Losgröße, siehe bspw. [Schl58], [Pete61], [Muel62]

4 Forschungsbedarf

Wie in Kapitel drei gezeigt, wird keine der beschriebenen Methoden den Anforderungen aus Kapitel 2.3 gerecht, um einerseits Fertigungssysteme hinsichtlich der Erfüllung der Prinzipien der schlanken Produktion zu bewerten und andererseits, diese nach lean-Prinzipien zu gestalten. Daraus lässt sich ein entsprechender Forschungsbedarf ableiten, welcher nachfolgend konkretisiert wird. Auf Basis eines qualitativen Kriterienkatalogs, werden Ansätze aus Kapitel drei identifiziert, welche im Rahmen der Arbeit integriert werden können bzw. welche Verfahren geeignete Impulse für eine Transferleistung bieten. Daraus resultiert abschließend die noch zu leistende Arbeit.

Kritische Würdigung der Bewertungsansätze nach den Prinzipien der schlanken Produktion:

Besonders gravierend ist das Fehlen einer Methodik, welche umfassend die Prinzipien der schlanken Produktion anhand der Ableitung relativer Lean-Metriken operationalisiert. Impulse, jedoch lediglich bzgl. des Flussfaktors, finden sich in [Schu11, S.37 ff.]. Dieses Defizit ist durch eine **vollständige Definition der technologischen und organisatorischen Systemparameter** zu beheben. Neben der systematischen Kaskadierung ist jedoch sicher zu stellen, dass geringe Ausprägungen in den singulären Lean-Metriken, adäquat in der Spitzenkennzahl berücksichtigt werden. Während bei [KoKa04, S.202] die Aggregation der Sub-Metriken zum sogenannten Lean Performance Index durch die Berechnung des arithmetischen Mittels erfolgt, wird die Spitzenkennzahl in [Schu11, S.38] durch eine Multiplikation der Sub-Größen erfasst. Für den Kontext der Arbeit ist hierfür eine geeignete Normierung festzulegen.

Tabelle 4.1: Teil eins - Kriterienkatalog zur qualitativen Gegenüberstellung der Ansätze aus der Literatur

Legende:		+ quantitative/operationalisierte Darstellung	[Abe11, S.706 ff.]	[KoKa04, S.199 ff.]	[Schu11, S.37 ff.]
		- qualitativ formulierte Kenngrößen			
		keine Berücksichtigung			
Verschwendung	Fluss	-	-	-	+
	Takt				
Flexibilität	Volumenflexibilität	-	-		
	Variantenflexibilität				
Variabilität	stationäre Variabilität				-
	variantenspezifische Variabilität				
Lean-Grad	Aggregation der Sub-Metriken	nein	ja	ja	
zusammenfassende Beurteilung	Eignung des Ansatzes für die zugrunde liegende Problemstellung	nein	nein	ja	

Kritische Würdigung der Ansätze zur Quantifizierung von Verschwendung:

Die Ableitung des Flussfaktors in [Laqu10, S.812] erfüllt hingegen die an eine Lean-Metrik gestellten Anforderungen und kann daher in die zu entwickelnde Methodik integriert werden. Aufgrund der quantitativen Darstellung von Verschwendung, werden die mit dem Bearbeitungsvorgang verbundenen Nebenzeiten als nicht wertschöpfend erachtet und lediglich im Rahmen der Durchlaufzeit erfasst. Somit wird diese Formel (3-1), im Gegensatz zu den anderen vorgestellten, präferiert. Die im Rahmen der performance measurement Ansätze identifizierten Leistungsgrößen, dienen abschließend einer Plausibilitätsprüfung der final identifizierten technologischen und organisatorischen Systemparameter. Hierfür eignen sich insbesondere die Ansätze von [GuRa09, S.274 ff.] und [DuCa07, S.69 ff.].

Handlungsbedarf besteht offensichtlich bzgl. der **Gestaltungsrichtlinie Takt**. Es konnte kein Verfahren identifiziert werden, welcher die Erfüllung des Kundentaktes durch eine Fertigungslinie anhand einer relativen Metrik quantifiziert. Hingegen wird der Takt (einer Linie) als operative

Leistungsgröße verstanden¹⁰³. Dies ist auf der Ebene der technologischen und organisatorischen Systemparameter nur bedingt korrekt, da auch der Linientakt als Aggregation der Zykluszeiten sowie anteiliger Rüst- und Störzeiten zu berechnen ist. Dieses Defizit ist folglich durch die **Ableitung einer geeigneten Lean-Metrik** zu beseitigen.

Tabelle 4.2: Teil zwei – Kriterienkatalog zur qualitativen Gegenüberstellung der Ansätze aus der Literatur

Legende:		[ScKN09, S.684 ff.]	[ViCh11, S.431 ff.]	[EVA107, S.1615 ff.]	[GuRa09, S.274 ff.]	[KaAh96, S.24 ff.]	[DuCa07, S.69 ff.]	[SoFo02, S.104 ff.]	[Ray06, S.238 ff.]	[Wsch08, S.6567 ff.]	[Laqu10, S.812 ff.]	[ScWi04, S.252 f.]	[Foga92, S.169 ff.]	[Krop09, S.170 f.]	[BoLW05, S.396 ff.]
Verschwendung	Fluss	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+
	Takt	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+
Flexibilität	Volumenflexibilität														
	Variantenflexibilität														
Variabilität	stationäre Variabilität														
	variantenspezifische Variabilität														
Lean-Grad	Aggregation der Sub-Metriken	nein	ja	nein	ja	nein	nein	ja	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein
zusammenfassende Beurteilung	Eignung des Ansatzes für die zugrunde liegende Problemstellung	nein	nein	nein	ja	nein	ja	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein

Kritische Würdigung der Ansätze zur Quantifizierung von Flexibilität:

Prinzipiell existiert eine Vielzahl von Ansätzen zur quantitativen Darstellung der relevanten Flexibilitätsrichtlinien. Abele et al. [Abel08, S.322 ff.] und Roscher [Rosco07, S.35 ff.] identifizieren technologische und organisatorische Systemparameter, welche für die unterste Kennzahlenebene der hierarchisch strukturierten und zu entwickelnden Metriken eine umfassende Basis bilden. Der von Bernardo et al. grundlegende Gedanke der noch verfügbaren Kapazität im Verhältnis des Bedarfs¹⁰⁴, wird ebenfalls als Impuls für die zu entwickelnde Lean-Metrik der Volumenflexibilität aufgegriffen. Eine relevante Perspektive für den Kontext der Volumenflexibilität, ist auch die von Wemhöner quantifizierte Lieferbereitschaft [Wemh05, S.142]. Die dargestellten Kennzahl-Komponenten „noch verfügbare Kapazität“, „Anzahl produzierter Einheiten“ und „Kundenbedarf“ sind folglich in diese Lean-Metrik zu integrieren.

Ein **offensichtliches Defizit** existiert bzgl. der **Variantenflexibilität**. Im Rahmen der beschriebenen Ansätze konnte keine Metrik identifiziert werden, welche die an sie gestellten Anforderungen erfüllt. Dieser Sachverhalt ist im weiteren Verlauf der Arbeit zu beseitigen.

Ein objektives Vorgehen zur Verdichtung von Einzelkennzahlen ist hingegen in [Abel08] beschrieben. Da jedoch monetäre Größen zur Gewichtung verwendet werden, welche eine Variation der Parameter implizieren, ist dieses Vorgehen für das statische Evaluationsmodell nicht geeignet.

Kritische Würdigung der Ansätze zur Quantifizierung von Variabilität:

Auch im Kontext der Quantifizierung von Variabilität konnte kein Ansatz identifiziert werden, welcher die relevanten Gestaltungsrichtlinien anhand von relativen Metriken konkretisiert. Dennoch werden die dargestellten Impulse in [Lore11, S.214 ff.], bzgl. der Abweichungen der Zykluszeiten, in Kapitel fünf aufgegriffen. Diese sind hinsichtlich der Abweichungen zwischen den Stationen bei der Fertigung einer Variante und innerhalb einer Station bei der Fertigung multipler Varianten¹⁰⁵ zu spezifizieren. Handlungsbedarf besteht weiterhin bei der Formulierung deterministischer Metriken und deren Komponenten¹⁰⁶, um die Abgrenzung zu stochastischen Schwankungen zu gewährleisten.

¹⁰³ Siehe beispielsweise in [GuRa09, S.291]

¹⁰⁴ [BeMo92, S.148]

¹⁰⁵ In aufeinander folgenden Zyklen

¹⁰⁶ Welche wiederum den technologischen und/oder organisatorischen Systemparametern entsprechen

Tabelle 4.3: Teil drei – Kriterienkatalog zur qualitativen Gegenüberstellung der Ansätze aus der Literatur

Legende:		+ quantitative/operationalisierte Darstellung	[Abel08, S.322 ff.]	[ScGW04, S.299 ff.]	[BeMo92, S.144 ff.]	[Roga09, S.103 f.]	[Rosco07, S.35 ff.]	[Wemh05, S.141 f.]	[Lanz10, S.478 ff.]	[Lore11, S.214 ff.]	[RaRo04, S.312 ff.]
		- qualitativ formulierte Kenngrößen									
		keine Berücksichtigung									
Verschwendung	Fluss										
	Takt										
Flexibilität	Volumenflexibilität	+	-	+	+	-	+				
	Variantenflexibilität	+	+								
Variabilität	stationäre Variabilität									-	+
	variantenspezifische Variabilität								+	-	+
Lean-Grad	Aggregation der Sub-Metriken	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
zusammenfassende Beurteilung	Eignung des Ansatzes für die zugrunde liegende Problemstellung	ja	nein	ja	nein	ja	ja	ja	nein	ja	nein

Kritische Würdigung der Ansätze der mathematischen Optimierung zur Minimierung der Betriebskosten

In Kapitel 3.2 konnte kein Ansatz identifiziert werden, welcher die Betriebskosten eines Fertigungssystems durch die mathematische Optimierung aller technologischen und organisatorischen Systemparameter minimiert. Es existieren zahlreiche Verfahren¹⁰⁷ zur Dimensionierung einer *Teilmenge* der identifizierten Entscheidungsvariablen und Betriebskosten, wie beispielsweise Losgrößen und Lagerhaltungskosten. Um eine Gestaltung der Fertigungslinie nach den Prinzipien der schlanken Produktion zu gewährleisten, sind jedoch **alle** identifizierten Systemparameter zu betrachten. Weiterhin konnten Ansätze identifiziert werden, welche zwar eine geeignete Kostengliederung präsentieren und folglich alle relevanten Komponenten der Betriebskosten berücksichtigen¹⁰⁸, jedoch die sogenannte Feinplanung von Fertigungssystemen fokussieren. Die hierfür optimierten Entscheidungsvariablen entsprechen jedoch nicht dem Kontext der technologischen und organisatorischen Systemparameter. Vielmehr werden letzt genannte durch die **Feinstplanung** von Fertigungssystemen adressiert. Damit besteht ein offensichtlicher Handlungsbedarf für die Generierung eines mathematischen Optimierungsmodells, welches auf Basis der operationalisierten Prinzipien der schlanken Produktion:

1. alle technologischen sowie organisatorischen Systemparameter als Entscheidungsvariablen integriert und diese für die Ableitung der operativen Betriebskosten monetär transformiert
2. die Betriebskosten des Fertigungssystems minimiert

Tabelle 4.4: Teil vier – Kriterienkatalog zur qualitativen Gegenüberstellung der Ansätze aus der Literatur

Legende:		+ Kriterium teilweise/vollständig erfüllt	[Lanz11, S.418 ff.]	[Abel11b, S.46 ff.]	[Ton07, S.2 ff.]	[Helm11, S.5 ff.]	[Abel10, S.572 ff.]	[MuSN11, S.22 ff.]	[Herr10, S.819 ff.]
		- Kriterium nicht erfüllt							
Minimierung der Betriebskosten	technologische Systemparameter	-	+	+	+	+	+	-	-
	organisatorische Systemparameter	+	+	+	-	-	-	+	+
	Kostengliederung an den Ereignissen des Fertigungsprozesses	+	-	-	+	-	-	-	-
zusammenfassende Beurteilung	Eignung des Ansatzes für die zugrunde liegende Problemstellung	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein

¹⁰⁷ Siehe u.a. in [Abel10, S.572 ff.] und [MuSN11, S.22 ff.]

¹⁰⁸ Siehe bspw. in [Helm11, S.5 ff.] und [Lanz11, S.418 ff.]

5 Methodik zur technologischen und organisatorischen Systembewertung und -gestaltung spanender Fertigungslinien nach den Prinzipien der schlanken Produktion

Um die eingangs erläuterte, objektive Quantifizierung und damit Operationalisierung der Prinzipien der schlanken Produktion zu gewährleisten, sind diese anhand geeigneter Kennzahlen zu komprimieren. Deshalb werden im nachfolgenden Abschnitt die entsprechenden Lean-Metriken ausführlich hergeleitet. Anschließend erfolgt die Aggregation dieser zur Spitzenkennzahl, dem sogenannten Lean-Grad. Dieser soll als übergeordneter Indikator die Vergleichbarkeit von spanenden Fertigungssystemen hinsichtlich deren „lean Erfüllung“ ermöglichen. Im dritten Abschnitt wird das Optimierungsmodell abgeleitet. Auf Basis der zu minimierenden, operativen Betriebskosten, sind die technologischen und organisatorischen Systemparameter der Fertigungslinie optimal zu dimensionieren. Da diese den operationalisierten lean Prinzipien entsprechen, resultiert eine bestmögliche Gestaltung einer Fertigungslinie nach den Prinzipien der schlanken Produktion. Damit erfolgt die Erweiterung eines reinen Messinstruments zur Bewertung der Erfüllung der Prinzipien der schlanken Produktion, zu einem monetären Optimierungsmodell, welches konkrete Handlungsempfehlungen zur Entscheidungsunterstützung liefert.

5.1 Quantifizierung der Prinzipien der schlanken Produktion

5.1.1 Quantifizierung von Verschwendung anhand der Lean-Metriken Fluss und Takt

5.1.1.1 Gestaltungsrichtlinie Fluss

Auf Basis der umfassenden Literatursichtung konnte die Gestaltungsrichtlinie „Fluss“ als ein wesentlicher Treiber der schlanken Produktion identifiziert werden (siehe auch Kapitel 2.1.1.1). Dabei impliziert die kontinuierliche Fließfertigung (als Synonym zum Begriff des Fluss) die Bearbeitung und sofortige Weitergabe von Werkstücken zu den jeweils nachfolgenden Prozessschritten. Damit werden die Teile ohne Zwischenlagerung und Doppelhandling in einem kontinuierlichen Fluss durch die einzelnen Arbeitsstationen der Produktionslinie geschleust [Oelt00, S.43]. Ausgehend von dem zugrunde gelegten Verständnis des Fluss, stellt diese Gestaltungsrichtlinie somit die Möglichkeit dar, die nicht-wertschöpfenden Zeitanteile, wie beispielsweise Warte- und Störzeiten, bei der Fertigung zu identifizieren und eliminieren.

Im nächsten Schritt ist die zuvor identifizierte Gestaltungsrichtlinie anhand einer geeigneten Kennzahl zu konkretisieren. Diese bildet die Basis, zusammen mit den weiteren zu definierenden Metriken, sowohl für die Bewertung des Planungskonzeptes als auch die Optimierung der singulären Stellhebel nach den Prinzipien der schlanken Produktion.

Auf Basis der zuvor erfolgten, qualitativen Beschreibung des Fluss, resultiert eine quantitative Beschreibungsgröße im sogenannten Flussfaktor. Der Flussfaktor (eine Verhältniskennzahl) berechnet sich als Quotient zweier absoluter Kennzahlen: die Summe der Bearbeitungszeiten über alle Stationen der Fertigungslinie im Verhältnis zur Durchlaufzeit, bezogen auf die Fertigung eines Werkstücks.

Die Summe der Bearbeitungszeiten beziffern die tatsächlich wertschöpfenden Zeitanteile einer Linie. Neben diesen werden in diesem Zusammenhang die mit dem Bearbeitungsvorgang verbundenen Nebenzeiten erfasst. Diese können im Kontext automatisierter Produktionslinien einen nicht unerheblichen Zeitanteil bilden. Additiv resultieren diese beiden Komponenten wiederum in der Zykluszeit. Die auf die gesamte Fertigungslinie berechnete Durchlaufzeit

markiert die tatsächliche Aufenthaltsdauer des Materials im gesamten Produktionsablauf [Take04, S.11]. Folglich beinhaltet diese Größe neben den Zykluszeiten auch Rüstzeiten, Transportzeiten, Kontrollzeiten sowie Liegezeiten, welche i.d.R. den größten Anteil der Durchlaufzeiten (bis zu 85%) ausmachen. Weitere Details hierzu finden sich in folgender Abbildung:

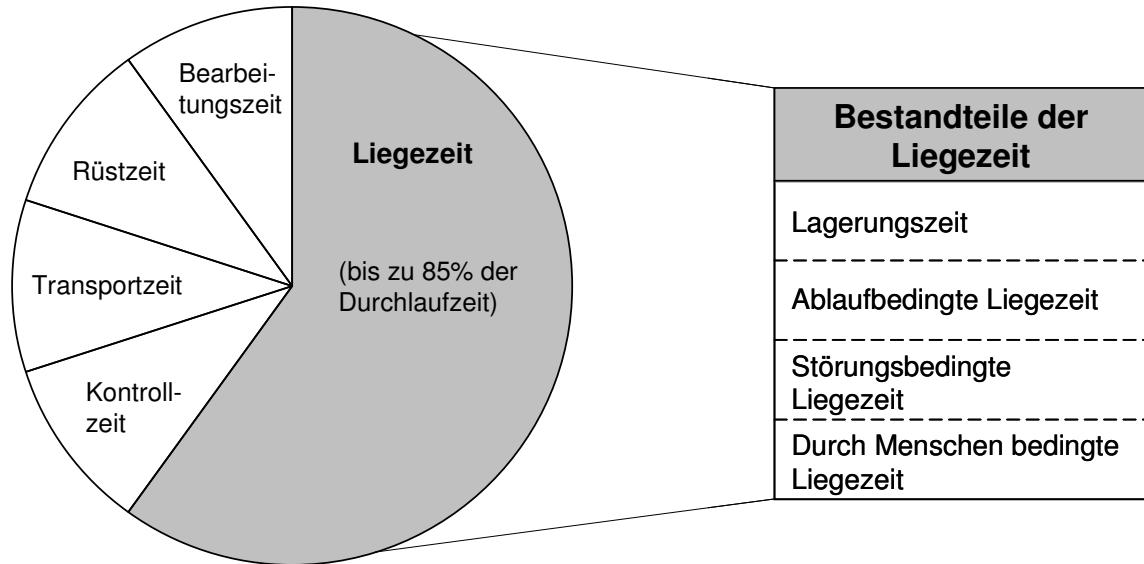


Abbildung 5.1: Bestandteile der Durchlaufzeit in Anlehnung an [Cors04, S.482]

Der Liegezeitanteil setzt sich wiederum aus Lagerzeiten, ablauf- und störungsbedingten Liegezeiten sowie durch den Menschen bedingte Liegezeiten zusammen [Cors04, S.481]. Im Zuge der Gestaltung automatisierter Produktionslinien ist jedoch letztgenannter Faktor in dieser Arbeit zu vernachlässigen.

Die Durchlaufzeit ist in ihrer Eigenschaft als absolute Kennzahl nur eingeschränkt aussagekräftig, da beispielsweise anhand der isolierten Betrachtung der Durchlaufzeit nicht erkennbar ist, ob eine hohe Ausprägung dieser aus einer hohen kumulierten Bearbeitungszeit resultiert (= wertschöpfende Zeiteile) oder aus hohen Liegezeiten (welche nicht-wertschöpfende Zeiteile repräsentieren). Der Flussfaktor ermöglicht hingegen eine relative und damit vergleichbare Aussage darüber, welcher Anteil der Durchlaufzeit für die reine Fertigung des Produktes benötigt wird, und welcher Anteil Verschwendung repräsentiert. Deshalb wird dieser als geeignete Lean-Metrik in die zu entwickelnde Methodik integriert.

Entspricht die Durchlaufzeit der Summe der wertschöpfenden Bearbeitungszeiten über alle Stationen der Fertigungslinie, ergibt sich die maximale Ausprägung dieser Kennzahl, die eine theoretisch vollkommene, kontinuierliche Fließfertigung ohne Verschwendung oder andere nicht-wertschöpfende Tätigkeiten darstellen würde. Unvorteilhafte Planungen spiegeln sich demnach in der Durchlaufzeit und damit in der Kennzahl des Flow wieder. Nicht-wertschöpfende aber notwendige Tätigkeiten sowie Verschwendungen erhöhen die Durchlaufzeit und sollten bei anormaler Ausprägung der Kennzahl kritisch hinterfragt werden. Beispielsweise könnte ein großer Anteil an Transportzeit innerhalb der Durchlaufzeit auf eine unvorteilhafte Layoutplanung hinweisen.

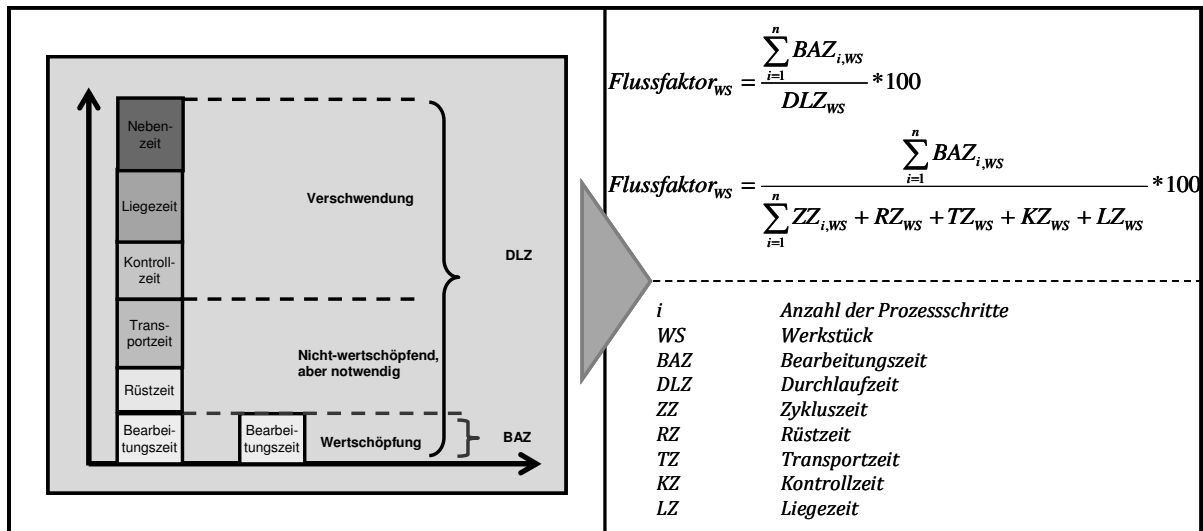


Abbildung 5.2: Herleitung und Definition der Metrik Fluss

Zusammenfassend ergibt sich damit die für das Modell geltende Formel:

Bewertungsgröße:

$$Flussfaktor_{WS} = \frac{\sum_{i=1}^n BAZ_{i,WS}}{DLZ_{WS}} * 100 = \frac{\sum_{i=1}^n BAZ_{i,WS}}{\sum_{i=1}^n ZZ_{i,WS} + RZ_{WS} + TZ_{WS} + KZ_{WS} + LZ_{WS}} * 100 \quad (5-1)$$

Mit

$i = 1, \dots, n$

Anzahl der Stationen (=Prozessschritte) der Linie

$BAZ_{i,WS}$

durchschnittlich, gewichtete wertschöpfende Bearbeitungszeit an Station i pro Werkstück

$$BAZ_{i,WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z BAZ_{i,Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-2)$$

$Var = A, \dots, Z$

Varianten, welche auf der Linie gefertigt werden

$BAZ_{i,Var}$

wertschöpfende Bearbeitungszeit an Station i für eine Variante

$m_{Var,I}$

Produktionsmenge der Fertigungslinie je Variante im Intervall

$NBZ_{i,WS}$

mit dem Bearbeitungsvorgang verbundene nicht-wertschöpfende Nebenzeiten (durchschnittlich gewichtet pro Werkstück) an Station i pro Werkstück

$$NBZ_{i,WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z NBZ_{i,Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-3)$$

$NBZ_{i,Var}$

mit dem Bearbeitungsvorgang verbundene nicht-wertschöpfende Nebenzeit an Station i für eine Variante

$ZZ_{i,WS} = BAZ_{i,WS} + NBZ_{i,WS}$

rechnerisch ermittelte Zykluszeit an Station i, additiv ermittelt aus $BAZ_{i,WS}$ und $NBZ_{i,WS}$

$$ZZ_{i,WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z (BAZ_{i,Var} + NBZ_{i,Var}) * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-4)$$

$$RZ_{WS} = \frac{RZ_I}{x_{L,I}} = \frac{\frac{1}{j} * \sum_{r=1}^j RZ_{r,I}}{\frac{1}{B} * \sum_{b=1}^B x_{b,I}}$$

anteilige Rüstzeit/Werkstück (5-5)

RZ_I

durchschnittliche Rüstzeit pro Rüstvorgang im Intervall

$r = 1, \dots, j$

Anzahl der Rüstvorgänge im Intervall

$RZ_{r,I}$

Rüstzeit des Rüstvorgangs r im Intervall

$x_{L,I}$

durchschnittliche Losgröße im Intervall

$b = 1, \dots, B$

Anzahl der Lose im Intervall

$x_{b,I}$

Losgröße des Loses b im Intervall

TZ_{WS}

gesamte Transportzeit zu allen Stationen beim Durchlaufen der Linie inkl. der Transportzeiten vom/zum Zwischenlager pro Werkstück

$$TZ_{WS} = \sum_{i=1}^n TZ_{i,WS} + TZ_{Ende,WS} \quad (5-6)$$

KZ_{WS}

durchschnittliche Kontrollzeit pro Werkstück an der Qualitätskontrolle am Ende der Linie

$$KZ_{WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{KS,Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-7)$$

$ZZ_{KS,Var}$

Zykluszeit an der Kontrollstation je Variante

LZ_{WS}

durch. Liegezeit pro Werkstück

$$LZ_{WS} = \frac{\sum_I SZ}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} + \sum_{i=1}^n WZ_{i,WS} + \sum_{Lag=WE}^{WA} PZ_{Lag,WS} \quad (5-8)$$

$\sum_I SZ$

kumulierte Störzeit im Intervall; entspricht der Summe der geplanten und ungeplanten Störungsbehebung bzw. Instandhaltungszeit

SZ_{WS}

anteilige Störzeit pro Werkstück, linearisiert im Betrachtungsintervall

$$SZ_{WS} = \frac{\sum_I SZ}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-9)$$

$WZ_{i,WS}$

durchschnittlich, gewichtete Wartezeit vor Station i pro Werkstück, ablaufbedingt

$$WZ_{i,WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z WZ_{i,Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-10)$$

$WZ_{i,Var}$

Wartezeit vor Station i je Variante

$Lag = WE, WA$

Anzahl der betrachteten Lager, entsprechen dem Warenein- und -ausgang der Fertigungslinie

$PZ_{WE,WS}$

durchschnittlich, gewichtete Pufferzeit im Wareneingang pro Werkstück für alle Puffer, welche die Fertigungslinie bedienen (d.h. kumuliert dem Wareneingang entsprechen)

$$PZ_{WE,WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z PZ_{WE,Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \tag{5-11}$$

$PZ_{WE,Var}$ Pufferzeit im Lager Wareneingang je Variante

$PZ_{WA,WS}$ durchschnittlich, gewichtete Pufferzeit im Warenausgang pro Werkstück für alle Puffer, welche die nachfolgende Produktionslinie und damit den internen Kundenbedarf bedienen (d.h. kumuliert dem Warenausgang entsprechen)

$$PZ_{WA,WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z PZ_{WA,Var} * KB_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \tag{5-12}$$

$PZ_{WA,Var}$ Pufferzeit im Lager Warenausgang je Variante

$KB_{Var,I}$ Kundenbedarf je Variante im Intervall

Für die Ermittlung der Pufferzeit je Lager und Variante, ist für die statische deterministische Evaluation, das Grundmodell der statischen deterministischen Lagerhaltung heranzuziehen und zu adaptieren. Charakteristisch sind in diesem Kontext ein stetiger und konstanter Lagerabgang, ein sofortiger Lagerzugang sowie das Verbot von Fehlmengen [Goho09, S.193]. Somit resultiert für den zeitlichen Verlauf des Lagerbestandes die typische Sägezahnfunktion, wie in nachfolgender Abbildung dargestellt.

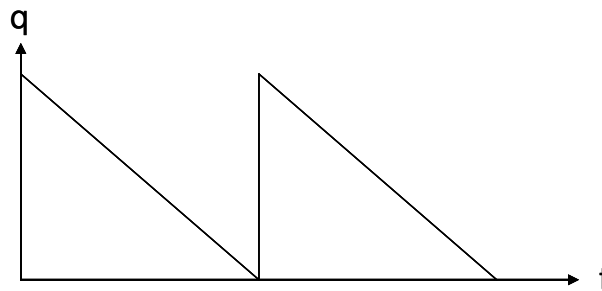


Abbildung 5.3: zeitlicher Verlauf des Lagerbestandes bei stetigem, konstantem Lagerabgang und sofortigem Lagerzugang

Die Verweilzeit eines Werkstücks, unter Einhaltung des FIFO-Prinzips, ist damit für das erste Werkstück null, für das letzte hingegen ein Produktionsintervall abzüglich der letzten Zykluszeit der Bearbeitung.

Kritisch zu sehen ist jedoch die in diesem Modell angenommene, unendliche Auffüll- oder Zugangsgeschwindigkeit des Lagers. Vielmehr muss in der Praxis ebenfalls von einer stetigen und konstanten Zugangsrate ausgegangen werden, wie nachfolgend veranschaulicht.

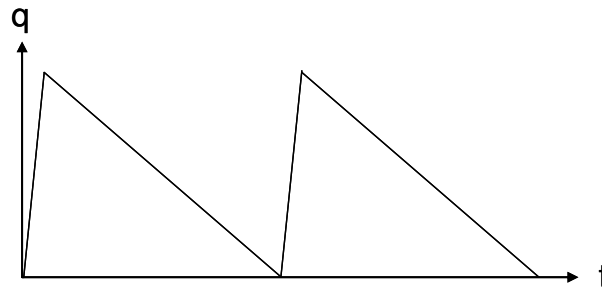


Abbildung 5.4: zeitlicher Verlauf des Lagerbestandes bei stetiger, konstanter Zu- und Abgangsrate

Die Verweilzeiten eines Werkstücks in diesem Fall unterscheiden sich ebenfalls signifikant. Während das erste Teil des Loses während der Produktionszeit des Zulieferers im Lager verweilt, wartet das letzte Werkstück während des gesamten Produktionszyklus der Weiterverarbeitung. Wie obiger Grafik zu entnehmen ist, unterscheidet sich die Dauer der jeweiligen Produktionszyklen um ein Vielfaches.

Weiterhin wird bei beiden Modellen davon ausgegangen, dass die Produktion des vorgelagerten Bereichs, welche die Lagerauffüllung impliziert, asynchron zum Verbrauch erfolgt. Zunächst erfolgt der Aufbau des Lagerbestandes bis zur Menge q . Anschließend setzt die Weiterverarbeitung der soeben im Lager aufgefüllten Variante ein, so dass eine stetige Bestandsabnahme resultiert. In der Praxis ist jedoch zu beobachten, dass obige Vorgänge häufig parallel statt finden. So startet beispielsweise die Schmiede mit der Produktion von Variante A eines Achsschenkels. Zeitversetzt um einen Tag, beginnt die Fertigung mit der Weiterverarbeitung dieser Variante, so dass tatsächlich eine synchrone Produktion über mehrere interne Wertschöpfungsstufen statt findet.

Bezogen auf den zeitlichen Bestandsverlauf im sich dazwischen befindlichen Lager, müssen die Zu- und Abgangsraten analysiert werden. Prinzipiell können dabei zwei Fälle der synchronen Produktion unterschieden werden:

1. Zu- und Abflussgeschwindigkeiten sind identisch: Damit wird in jedem Produktionsintervall (z.B. eine Schicht) die gleiche Menge der Variante aus dem Lager entnommen, mit welcher das Lager gefüllt wurde. Voraussetzung ist folglich eine zeitliche versetzte Produktion des internen Lieferanten. Der sich im Lager befindliche Bestand der Variante kann damit als konstant angenommen werden.
2. Auffüllgeschwindigkeit übersteigt Entnahmegeschwindigkeit: Damit wird in einem identischen Produktionsintervall für beide Stufen der Wertschöpfungskette eine größere Menge eingelagert, als entnommen werden kann. Der Lagerbestand der Variante steigt in diesem Intervall kontinuierlich an.

Unter der Annahme eines nicht-negativen Mindestbestands im Lager, kann der dritte Fall vernachlässigt werden. Da aufgrund einer schnelleren und größeren Entnahmemenge, im Vergleich zur Auffüllung des Lagers, die Mindestbestandsgröße in jedem Produktionsintervall erreicht wird, resultiert analog zu Fall eins, ein konstanter Bestand der Variante im Lager, welcher jedoch der Mindestbestandsmenge entspricht.

Während im erst genannten Fall die Verweilzeit jedes Werkstücks identisch ist, steigt diese im zweiten Fall, analog zum Bestandsverlauf, kontinuierlich an.

Unten stehender Abbildung kann hingegen ein realer Bestandsverlauf einer Variante im Zwischenlager entnommen werden.



Abbildung 5.5: Bestandsverlauf einer Variante (absolute Stückzahl) im Warenausgang der Fertigungslinie für das Jahr 2010

Für die Berechnung der statischen Pufferzeit einer Variante in einem Lager vor oder nach der Fertigungslinie, müssen die in der Realität existierenden, dynamischen Bestandsbewegungen eliminiert werden. Tatsächlich variiert durch zahlreiche Ein- und Auslagerungsvorgänge am Tag je Lager, der absolute Bestandswert je Variante. Auch unter der Annahme der Einhaltung des FIFO-Prinzips (First in first out) verweilt ein Werkstück unterschiedlich lange in einem Lager, sofern sich die Zufluss- und Abflussgeschwindigkeiten unterscheiden. Vor diesem Hintergrund wird als vereinfachende Annahme der durchschnittliche Bestandswert je Variante je Lager für ein Jahr herangezogen. Dividiert durch den durchschnittlichen Bedarf der Variante pro Jahr, resultiert dies in einer durchschnittlichen und damit statischen Pufferzeit, welche gemäß obigen Erläuterungen in die Evaluationsberechnungen integriert wird. Diese Pufferzeit ist weiterhin äquivalent zur durchschnittlichen Verweilzeit, also der Verweildauer und damit anteiligen Liegezeit einer Variante je Lager.

Der Flussfaktor der idealen Produktionslinie beträgt demnach 100% bzw. nähert sich diesem Wert. In Folge dessen muss als Prämisse des Optimierungsmodells gelten, die Durchlaufzeit derart zu reduzieren, so dass diese möglichst nahe der Summe der Bearbeitungszeiten über alle Stationen der Linie entspricht. Letztlich resultiert dies in einer Optimierung der Schlüsselemente der Durchlaufzeit: der Reduktion der anteiligen Neben-, Rüst-, Transport- und Liegezeiten. Der Grad der Beeinflussung dieser Parameter in der Planungsphase ist jedoch sehr differenziert zu betrachten. Während die Transportzeiten nur gering beeinflussbar sind, sind die übrigen Stellhebel ungleich größer. So kann bspw. durch eine geeignete Bestandsdimensionierung die Liegezeit drastisch reduziert werden. Auch eine Reduktion der Rüst- und Störzeiten resultiert in einer maßgeblichen Verringerung der Durchlaufzeit und damit Steigerung des Flussfaktors.

5.1.1.2 Gestaltungsrichtlinie Takt

Eine weitere Gestaltungsrichtlinie im Kontext von Muda ist die Schaffung eines Produktionsrhythmus (Taktzeit), welcher sich am Kundenbedarf (Kudentakt) orientiert. Die

Taktfertigung dient dazu, den Produktionsrhythmus mit dem Rhythmus des Kundenbedarfs zu synchronisieren. Damit kann die Produktionslinie exakt den Bedürfnissen des Marktes entsprechen [Sysk06, S.145]. Der Kundentakt gibt folglich die Frequenz an, in welcher der Kunde ein Produkt nachfragt.

Gemäß dieser Erläuterung muss die Gestaltungsrichtlinie Takt, die Konformität des Produktionsrhythmus mit den Bedürfnissen des Kunden gewährleisten. Bei einer vollständigen Übereinstimmung des geplanten Takt mit dem Kundentakt, ergebe sich somit eine maximale Erfüllung dieser Gestaltungsrichtlinie. Damit resultieren folgende notwendige Beschreibungsgrößen zur Definition der Lean-Metrik:

- Kundentakt: Frequenz, in welcher der interne Kunde die Erzeugnisse nachfragt
- geplanter Takt: in Serie zu realisierender Produktionsrhythmus

In der Literatur existiert eine Vielzahl an Definitionen zur Berechnung des Kundentakt, welche sich jedoch nur marginal unterscheiden. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen den vorgenommenen Definitionen besteht in dem jeweiligen Bezugsrahmen. Während Ohno, Takeda und Syska das betrachtete Intervall auf einen Tag fest legen, reduziert Rother den Bezugspunkt auf eine Schicht [Ohno09, S.89], [Take04, S.108], [Sysk06, S.145], [RoSh04, S.44]. Erlach schlägt hingegen ein Betrachtungsintervall von einem Jahr vor [Erla07, S.48]. Für die vorliegende Arbeit soll deshalb im Folgenden eine allgemeingültigere Definition des Kundentaktes vorgenommen werden:

$$\text{Kundentakt} = \frac{\text{Nettoproduktionszeit}_t}{\text{Kundenbedarf}_t} \quad (5-13)$$

In Abhängigkeit des Planungshorizontes und damit Betrachtungsintervalls, können obige Größen individuell ermittelt werden.

Zur Bestimmung des geplanten Takt, ist die maximale Zykluszeit über alle Prozessschritte der Linie relevant. Der jeweils langsamste Bearbeitungsschritt determiniert den geplanten Takt, welcher wiederum das Ausstoßverhalten der gesamten Linie dominiert. Anteilige Störzeiten sowie Rüstzeiten sind für die Berechnung des Takt ebenfalls zu berücksichtigen. Der geplante Takt ist also nicht mit der Zykluszeit zu verwechseln [Sysk06, S.145].

Für die Ermittlung der Lean-Metrik sind nachfolgend der Kundentakt und der geplante Takt ins Verhältnis zu setzen. Abweichungen implizieren sowohl bei einer Unterdeckung, also nicht Erfüllung des Kundentaktes, als auch Überdeckung, d.h. zu schnelles Produzieren, eine nicht optimale Ausprägung. Die Unterdeckung des Kundentaktes bedeutet eine Nichterfüllung der geforderten Ausbringungsmenge und damit Opportunitäten durch entgangenen Gewinn. Die Überdeckung der Kennzahl resultiert hingegen in temporär zu hohen Ausbringungsmengen, welche zwischengelagert werden müssen und damit entsprechende Handlings- und Lagerhaltungskosten bergen.

Grafisch ist das Dilemma der Unter- bzw. Überdeckung in nachfolgender, qualitativer Betragsfunktion veranschaulicht:

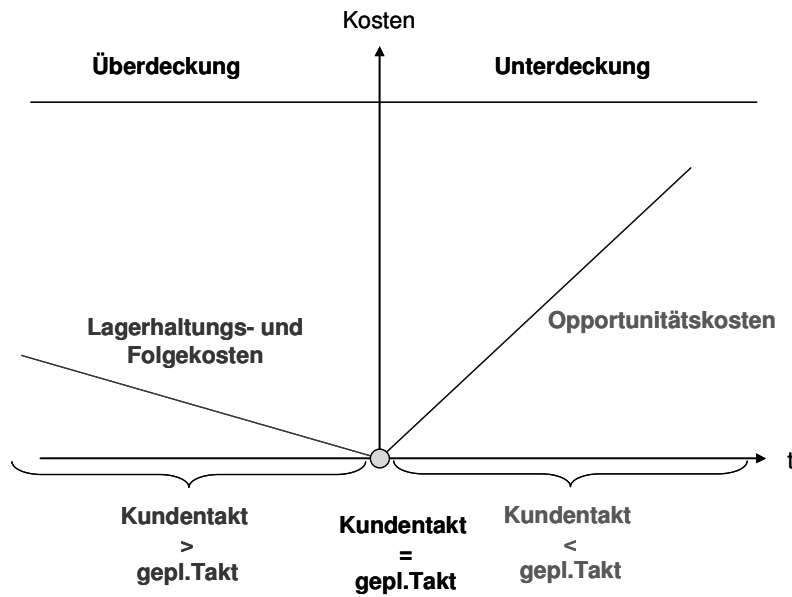


Abbildung 5.6: Ausprägungen der Betragsfunktion des Takt

Zusammenfassend ergibt sich für die Gestaltungsrichtlinie des Takt folgende Formel:

Bewertungsgröße:

$$Takt_{WS} = \left(1 - \frac{|Takt_{Kunde,WS} - Takt_{Plan,WS}|}{Takt_{Kunde,WS}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{\left| \frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} - (ZZ_{max,i,WS} + RZ_{WS} + SZ_{WS}) \right|}{\frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}}}\right) * 100$$

(5-14)

Mit

I betrachtetes Intervall, z.B. Monat, Woche, Schicht im Planungshorizont

$Takt_{Kunde,WS}$ Kundentakt: Frequenz der Kundennachfrage pro Werkstück im Intervall

$Takt_{Plan,WS}$ geplanter Takt: zu realisierender Produktionsrhythmus der Fertigungslinie pro Werkstück gemäß Planung

$$Takt_{Kunde,WS} = \frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} = \frac{BPZ_I - PWI_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \quad (5-15)$$

NPZ_I Nettoproduktionszeit im Intervall, z.B. 1 Schicht abzüglich der Pausen, Wartung und Instandhaltung

BPZ_I	Bruttoproduktionszeit im Intervall, z.B. 1 Schicht
PWI_I	Zeit für geplante Pausen, Wartung und Instandhaltung im Intervall
$\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}$	Kundenbedarf (kumuliert) über alle Varianten im Intervall
$Takt_{Plan,WS} = \max \frac{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{i,Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} + \frac{RZ_I}{x_{L,I}} + \frac{\sum_I SZ}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}}$	(5-16)
$ZZ_{max,i,WS}$	maximale, durchschnittlich, gewichtete Zykluszeit innerhalb der Fertigungslinie über alle Stationen; entspricht dem Engpass der Linie und damit der taktgebenden Station über alle Varianten
$ZZ_{i,Var}$	Zykluszeit an Station i je Variante
$m_{Var,I}$	Produktionsmenge der Fertigungslinie je Variante im Intervall
$Var = A, \dots, Z$	Anzahl Varianten, welche auf Linie gefertigt werden
$\sum_I SZ$	Summe der Störzeiten im Intervall
$RZ_{WS} = \frac{RZ_I}{x_{L,I}} = \frac{\frac{1}{j} * \sum_{r=1}^j RZ_{r,I}}{\frac{1}{B} * \sum_{b=1}^B x_{b,I}}$	anteilige Rüstzeit/Werkstück (5-17)
RZ_I	durchschnittliche Rüstzeit pro Rüstvorgang im Intervall
$r = 1, \dots, j$	Anzahl der Rüstvorgänge im Intervall
$RZ_{r,I}$	Rüstzeit des Rüstvorgangs r im Intervall
$x_{L,I}$	durchschnittliche Losgröße im Intervall
$b = 1, \dots, B$	produzierte Losgrößen im Intervall
$x_{b,I}$	Losgröße des Loses b im Intervall

Gemäß obiger Formel ist der Takt einer Linie umso besser, je näher sich der geplante Takt am Kundentakt befindet. Daher wird die entsprechende Verhältnisskennzahl negiert bzw. von der maximalen Ausprägung eins, subtrahiert. Abweichungen in jeglicher Richtung implizieren eine Verschlechterung der Kennzahl. Da der geplante Takt sowohl kleiner als auch größer als der Kundentakt sein kann, ist obige Betragsfunktion bei der Berechnung der Lean-Metrik integriert. Damit wird erneut die Dimensionierung der Kennzahl zwischen null und 100% gewährleistet.

5.1.2 Quantifizierung der Flexibilität anhand der Lean-Metriken Volumen- und Variantenflexibilität

Da Flexibilität meist einen gewissen finanziellen Mehraufwand bedeutet, darf nicht ein beliebig flexibles Konzept ausgewählt werden. Vielmehr müssen die Flexibilitätsmerkmale optimal auf die Anforderungen zugeschnitten sein [Toni07, S.4]. In Analogie zu den im vorigen Abschnitt abgeleiteten Lean-Metriken der Verschwendung (Muda), gilt es, die im Bereich der Flexibilität relevanten Metriken zu quantifizieren und auf deren Ausprägung zu überprüfen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Nichterfüllung der Flexibilitätsmetriken zu einer inflexiblen und damit verschwendungsreichen Produktion führt. Wie bereits in den Kapitel 2.1.1.3 sowie 5.1.1.3 erläutert, handelt es sich im Kontext der Flexibilität um die Volumen- und Variantenflexibilität von Planungskonzepten, weshalb diese im Folgenden detailliert werden.

5.1.2.1 Gestaltungsrichtlinie Volumenflexibilität

Für die Messung der Volumenflexibilität wird folgende Hypothese zugrunde gelegt, welche zunächst qualitativ erläutert und abschließend in der dazugehörigen Lean-Metrik resultiert:

- Bei einer volumen- bzw. stückzahlflexiblen Linie, können die Kapazitäten sehr viel enger dem Verlauf der Nachfragekurve angepasst werden, als dies bei starren bzw. inflexiblen Systemen der Fall ist.

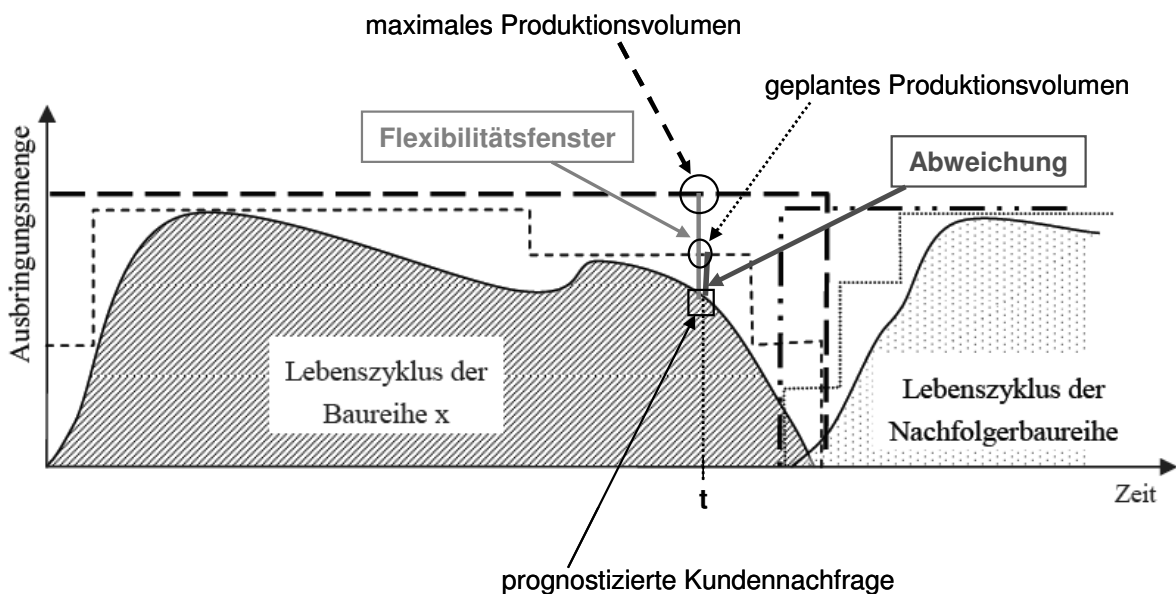


Abbildung 5.7: Beschreibungsgrößen der Volumenflexibilität – grafische Darstellung in Anlehnung an [Toni07, S.5]

Dies bedingt, dass die in oben stehender Abbildung dargestellten Treppenstufen, welche das geplante bzw. in Serie realisierte Produktionsvolumen repräsentieren, sehr eng dem Verlauf der prognostizierten Kundennachfrage folgen. Dieser Sachverhalt wird wiederum durch eine variable Treppenhöhe gewährleistet. Je größer die Spannweite der jeweiligen Treppenhöhen, desto geringer ist die Differenz zwischen den Kurven der zur Verfügung gestellten und nachgefragten

Kapazität. Damit ist im nächsten Kausalitätsschritt die Abweichung zwischen der Anzahl an produzierten Einheiten und der Anzahl der vom Kunden nachgefragten Einheiten minimal. Zusammenfassend kann damit fest gehalten werden: Je variabler die Treppenhöhe, desto geringer sind die Abweichungen und desto flexibler ist das System. Operativ entspricht dies folgendem: Je größer die Schwankungsbreite der Betriebsnutzungszeit und der Taktzeit, desto flexibler ist das System.

Weiterhin spielt das sogenannte Flexibilitätsfenster (siehe obige Abbildung) eine wesentliche Rolle bei der Beschreibung der Volumenflexibilität. Je größer dieses ist, desto höher ist die Differenz zwischen dem maximalen Produktionsvolumen und der Kundennachfrage. Damit können auch Nachfrageschwankungen in diesem Intervall größer ausfallen. Dennoch soll der Anreiz zur Überdimensionierung vermieden werden.

Für die Quantifizierung der Volumenflexibilität zu einem Zeitpunkt t im Verlauf des Produktlebenszyklus¹⁰⁹ resultieren damit die Beschreibungsgrößen:

- **Abweichung** zwischen dem geplanten Produktionsvolumen und der Kundennachfrage
- **Flexibilitätsfenster**, welches die Differenz zwischen der durch die Produktionslinie zur Verfügung gestellten maximalen Kapazität und der Kundennachfrage wieder spiegelt

Die Minimierung der zuvor erläuterten Abweichung sowie die Maximierung des Flexibilitätsfensters repräsentieren damit die erforderlichen Komponenten der Volumenflexibilität und sind entsprechend durch die Kennzahldefinition zu integrieren.

Mit dem Ziel der vollständigen Abdeckung bzw. Reaktionsfähigkeit auf Schwankungen der Kundennachfrage und der Prämisse, dass mit dem theoretisch maximal erzielbaren Produktionsvolumen die Kundennachfrage prinzipiell im Intervall bedient werden kann, ergibt sich damit für die Messung der Volumenflexibilität folgende Kennzahl:

Bewertungsgröße:

$$\text{Volumenflexibilität}_I = \left(1 - \frac{\left|PV_{Plan,I} - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}\right|}{PV_{max,I} - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{\left|\frac{1}{Takt_{Plan,WS}} * NPZ_I - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}\right|}{\frac{1}{Takt_{min,WS}} * NPZ_{max,I} - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}}\right) * 100$$

(5-18)

Mit

I betrachteter Produktionszeitraum, z.B. ein Jahr, da statische Betrachtung

$PV_{Plan,I}$ geplantes Produktionsvolumen im Intervall

$PV_{max,I}$ theoretisch, maximal mögliches Produktionsvolumen im Intervall

$\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}$ Kundenbedarf (kumuliert) über alle Varianten im Intervall

¹⁰⁹ t wird wiederum zu einem Intervall I transferiert

$$PV_{Plan,I} = \frac{NPZ_I}{Takt_{Plan,WS}} \quad (5-19)$$

NPZ_I

Nettoproduktionszeit im Intervall, d.h.
Bruttoproduktionszeit im Intervall abzüglich der darin
geplanten Pausen, Wartung und Instandhaltung

$$NPZ_I = (BPZ_{SH} - PWI_{SH}) * AS_I \quad (5-20)$$

SH

Schicht – kleinstes Betriebsintervall

BPZ_{SH}

Bruttoproduktionszeit pro Schicht

PWI_{SH}

geplante Pausen, Wartung und Instandhaltung pro
Schicht

AS_I

Anzahl der Schichten im Intervall

$Takt_{Plan,WS}$

geplanter Takt: zu realisierender Produktionsrhythmus
pro Werkstück gemäß Planung

$$Takt_{Plan,WS} = \max \frac{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{i,Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} + \frac{\frac{1}{j} * \sum_{r=1}^j RZ_{r,I}}{\frac{1}{B} * \sum_{b=1}^B x_{b,I}} + \frac{\sum_I SZ}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-21)$$

$ZZ_{i,Var}$

Zykluszeit an Station i je Variante

$m_{Var,I}$

Produktionsmenge je Variante im Intervall

$Var = A, \dots, Z$

Anzahl Varianten, welche auf der Fertigungslinie
produziert werden

$$RZ_{WS} = \frac{RZ_I}{x_{L,I}} = \frac{\frac{1}{j} * \sum_{r=1}^j RZ_{r,I}}{\frac{1}{B} * \sum_{b=1}^B x_{b,I}} \quad (5-22)$$

anteilige Rüstzeit/Werkstück

RZ_I

durchschnittliche Rüstzeit pro Rüstvorgang im Intervall

$r = 1, \dots, j$

Anzahl der Rüstvorgänge im Intervall

$RZ_{r,I}$

Rüstzeit des Rüstvorgangs r im Intervall

$x_{L,I}$

durchschnittliche Losgröße im Intervall

$b = 1, \dots, B$	produzierte Losgrößen im Intervall
$x_{b,I}$	Losgröße des Loses b im Intervall
$\sum_I SZ$	Summe der Störzeiten im Intervall
$PV_{\max,I} = \frac{NPZ_{\max,I}}{Takt_{\min,WS}}$	(5-23)
$NPZ_{\max,I}$	maximale Nettoproduktionszeit im Intervall, z.B. 365 Tage/a, 24h/Tag abzüglich der darin geplanten Pausen, Wartung und Instandhaltung
$NPZ_{\max,I} = (BPZ_{SH} - PWI_{\min,SH}) * AS_{\max,I}$	(5-24)
$PWI_{\min,SH}$	minimal erforderlicher Zeitanteil für Pausen, Wartung und Instandhaltung pro Schicht
$AS_{\max,I}$	maximale Anzahl der durchführbaren Schichten im Intervall
$Takt_{\min,WS}$	minimal möglicher Takt zur Realisierung des maximalen Produktionsvolumens bei Minimierung der anteiligen Rüst- und Störzeiten
$Takt_{\min,WS} = \max_{Var=A} \frac{\sum_{i=1}^Z ZZ_{i,Var} * m_{Var}}{\sum_{Var=A} m_{Var}} + RZ_{\min,WS} + SZ_{\min,WS}$	(5-25)
$RZ_{\min,WS}$	anteilige, minimale Rüstzeit pro Werkstück; entspricht der theoretischen Untergrenze
$SZ_{\min,WS}$	anteilige, minimale Störzeit pro Werkstück; entspricht der theoretischen Untergrenze

Für die Generierung der Flexibilitätskennzahl wird vereinfacht für den Kontext der Anpassungsplanung von einem sicheren Kundenbedarf¹¹⁰ ausgegangen. Gelingt es aufgrund der zunehmend hohen Marktvolatilität nicht, den zukünftigen Bedarf punktgenau anzugeben, ist es notwendig eine unscharfe Beschreibung zu zulassen, innerhalb derer Stückzahlschwankungen auftreten können. So soll der Planer selbst entscheiden, inwiefern der zugrunde gelegte Kundenbedarf mit Unsicherheiten behaftet ist. Aus vergangenheitsbasierter Erfahrung bei der Planung ähnlicher Produkte oder Vorgängerprodukte, können alternativ Szenarien eingebaut und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmt werden.

¹¹⁰ Im Sinne eines realen Kundenbedarfs

Erwähnenswert ist an dieser Stelle weiterhin die synergetische Korrelation der Lean-Metriken Takt und Volumenflexibilität. Findet beispielsweise eine Überdeckung im Kontext der Lean-Metrik Takt statt (d.h. der Kundentakt ist größer als der geplante Takt), so resultiert dieser Sachverhalt in einem geplanten Produktionsvolumen, welches den kumulierten Kundenbedarf übersteigt. Hingegen führt eine Takt-Unterdeckung zu einer Unterschreitung des Produktionsvolumens hinsichtlich des kumulierten Kundenbedarfs. Vor diesem Hintergrund ist die erneute Integration der Betragsfunktion für obige Formel der Volumenflexibilität von elementarer Bedeutung, da analog zum Takt eine Über- bzw. Unterdeckung statt finden kann.

Nachfolgend wird der mathematische Beweis der positiven Korrelation erläutert.

Es gilt:

$$1. \text{ Takt: } Takt_{Kunde,WS} = \frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \quad \text{sowie} \quad (5-26)$$

$$2. \text{ Volumenflexibilität: } PV_{Plan,I} = \frac{NPZ_I}{Takt_{Plan,WS}} \quad (5-27)$$

Daraus folgt:

$$NPZ_I = PV_{Plan,I} * Takt_{Plan,WS} \quad (5-28)$$

Einsetzen in 1.:

$$Takt_{Kunde,WS} = \frac{PV_{Plan,I} * Takt_{Plan,WS}}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \quad \text{umformuliert} \quad (5-29)$$

$$\frac{Takt_{Kunde,WS}}{Takt_{Plan,WS}} = \frac{PV_{Plan,I}}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \quad (5-30)$$

Beweis der synergetischen Korrelation zwischen den Lean-Metriken Takt und Volumenflexibilität:

Fallunterscheidung:

$$a) \text{ für } PV_{Plan,I} \geq \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \text{ gilt:} \quad (5-31)$$

$$\frac{PV_{Plan,I}}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \geq 1$$

$$\Leftrightarrow \frac{Takt_{Kunde,WS}}{Takt_{Plan,WS}} \geq 1$$

$$\Leftrightarrow Takt_{Kunde,WS} \geq Takt_{Plan,WS}$$

d.h. Überdeckung bzw. Überproduktion, da Betrag positiv

$$\text{für } PV_{Plan,I} \leq \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \text{ gilt:} \quad (5-32)$$

$$\frac{PV_{Plan,I}}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \leq 1$$

$$\Leftrightarrow \frac{Takt_{Kunde,WS}}{Takt_{Plan,WS}} \leq 1$$

$$\Leftrightarrow Takt_{Kunde,WS} \leq Takt_{Plan,WS}$$

d.h. Unterdeckung bzw. Unterproduktion, da Differenz negativ

Eine reduzierte Takt-Ausprägung aufgrund einer zu schnellen oder langsamen Produktionsgeschwindigkeit der Fertigungslinie, geht folglich prinzipiell mit einer kumulierten Über- bzw. Unterproduktion im gesamten Intervall einher. Ein konträres Verhalten wurde durch obigen mathematischen Beweis ausgeschlossen.

5.1.2.2 Gestaltungsrichtlinie Variantenflexibilität

Aufgrund der im Kapitel „Gestaltungsrichtlinie Nivellierung“ ausführlich vorgenommenen, qualitativen Beschreibungen, soll nachfolgend direkt auf die Quantifizierung der entsprechenden Lean-Metrik eingegangen werden.

Es ergeben sich aufgrund der erwähnten, beeinflussten Indikatoren folgende Beschreibungsgrößen für die Variantenflexibilität:

- **Anzahl geplanter Rüstvorgänge:** bestimmt die theoretisch möglich, durchführbaren Rüstungen innerhalb des Zeitintervalls
- **Anzahl optimaler Rüstvorgänge:** gibt die optimale Anzahl der Rüstvorgänge unter der Prämisse der minimalen Losgröße wieder

Dies resultiert damit in folgender Formel:

Bewertungsgröße:

$$\text{Variantenflexibilität}_I = \frac{AGRVI}{AORVI} * 100 = \frac{BPZ_I - PWI_I - PP_I - \sum_I SZ}{\frac{RZ_I}{\frac{PP_I}{PP_{ideal,L,I}} * Z}} * 100$$

$$\text{Variantenflexibilität}_I = \frac{BPZ_I - PWI_I - \sum_{Var=A}^Z ZZ_{max,i,Var} * m_{Var,I} - \sum_I SZ}{\frac{1}{j} * \sum_{r=1}^j RZ_{r,I}} * 100 \quad (5-33)$$

$$\frac{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{max,i,Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{max,i,Var} * x_{ideal,L,Var,I}} * Z$$

Mit

I	betrachteter Produktionszeitraum, z.B. ein Jahr, da statische Betrachtung
$AGR_{V,I}$	Anzahl der geplanten Rüstvorgänge im Intervall
$AOR_{V,I}$	Anzahl optimaler Rüstvorgänge im Intervall mit Bezug zur idealen Losgröße eins
BPZ_I	Bruttoproduktionszeit im Intervall, z.B. 1 Schicht
PWI_I	Zeit für geplante Pausen, Wartung und Instandhaltung im Intervall
PP_I	benötigte Zeit für das zu leistende Produktionsprogramm im Intervall über alle Varianten
$PP_I = \sum_{Var=A}^Z ZZ_{\max,i,Var} * m_{Var,I}$	(5-34)
$ZZ_{\max,i,Var}$	maximale Zykluszeit über alle Stationen bei der Fertigung einer Variante (vertikale Spalte der Stations-Varianten-Matrix)
$m_{Var,I}$	Produktionsmenge je Variante im Intervall
$Var = A, \dots, Z$	Anzahl Varianten, welche auf Linie gefertigt werden
$\sum_I SZ$	Summe der Störzeiten im Intervall
RZ_I	durchschnittliche Rüstzeit pro Rüstvorgang im Intervall
$RZ_I = \frac{1}{j} * \sum_{r=1}^j RZ_{r,I}$	(5-35)
$r = 1, \dots, j$	Anzahl der Rüstvorgänge im Intervall
$RZ_{r,I}$	Rüstzeit des Rüstvorgangs r im Intervall
$PP_{ideal,L,I}$	benötigte Zeit für die Fertigung eines idealen Produktionszyklus mit Bezug zur idealen Losgröße eins je Variante im Intervall

$$PP_{ideal,L,I} = \sum_{Var=A}^Z ZZ_{\max,i,Var} * x_{ideal,L,Var,I} \quad (5-36)$$

$x_{ideal,L,Var,I}$

ideale/visionäre Losgröße je Variante im Intervall mit Bezug zur Losgröße eins

Z

Anzahl der zu produzierenden Varianten

In diesem Zusammenhang stellt sich die legitime Frage, warum als Referenzwert der optimalen Anzahl an Rüstvorgängen eine Losgröße von eins zugrunde gelegt wurde? Aus Sicht der Prinzipien der schlanken Produktion repräsentiert dieser Sachverhalt, gekoppelt an eine Rüstzeit im Takt, eine Vision. Diese gilt es durch den kontinuierlichen Verbesserungsprozess in kleinen Schritten anzustreben. Konkret müssen die internen Zeitanteile eines Rüstvorgangs¹¹¹ aufgrund eines Produktwechsels, kontinuierlich in externe Zeitanteile¹¹² konvertiert werden. Dies führt zu einer Reduktion der durchschnittlichen Rüstzeit je Rüstvorgang, damit zu einer Erhöhung der geplanten Rüstvorgänge und folglich zu einer kontinuierlichen Reduktion der Losgröße. Da die Anzahl der optimalen Rüstvorgänge aufgrund des Bezugs zur minimal realisierbaren Losgröße, prinzipiell höher ist, als die Anzahl der geplanten Rüstvorgänge, handelt es sich auch bei der Lean-Metrik Variantenflexibilität um eine Kennzahl mit der Dimensionierung zwischen null und 100%.

5.1.3 Quantifizierung der Variabilität anhand der Lean-Metriken variantenspezifische und stochastische Stabilität

Da auf stochastische Schwankungen nur bedingt Einfluss genommen werden kann, ist für diesen Aspekt der Variabilität im Folgenden keine Metrik zu quantifizieren. Der Fokus liegt hingegen auf den stationären und variantenspezifischen Variabilitäten (vgl. Kapitel 2.1.1.3). Da diese in Analogie zu den bereits quantifizierten Metriken zwischen null und 100% dimensioniert werden, wird im weiteren Verlauf der Begriff Stabilität anstelle von Variabilität verwendet. Die stationäre und variantenspezifische Stabilität stellen damit repräsentative Lean-Metriken dar, anhand welcher die Bewertung und Optimierung des Teilaspekts Mura erfolgt.

5.1.3.1 Gestaltungsrichtlinie der stationären Stabilität

Aufgrund der zeitlich nicht exakt gleichmäßig aufteilbaren Arbeitsumfänge zwischen den Prozessen, resultieren unterschiedliche Bearbeitungszeiten *zwischen den Stationen* bei der Fertigung *einer Variante*. So dauert das Bohren an Station sechs bspw. sieben Sekunden länger als der Fräsvorgang an Station eins bei Fertigung der Variante A. Im Sinne einer schlanken Produktion sind diese stationären Schwankungen jedoch zu eliminieren. Operativ handelt es sich hierbei um das Thema der Austaktung oder Engpass-Eliminierung.

¹¹¹ Welche einen Maschinenstillstand implizieren

¹¹² Während des Bearbeitungsvorgangs

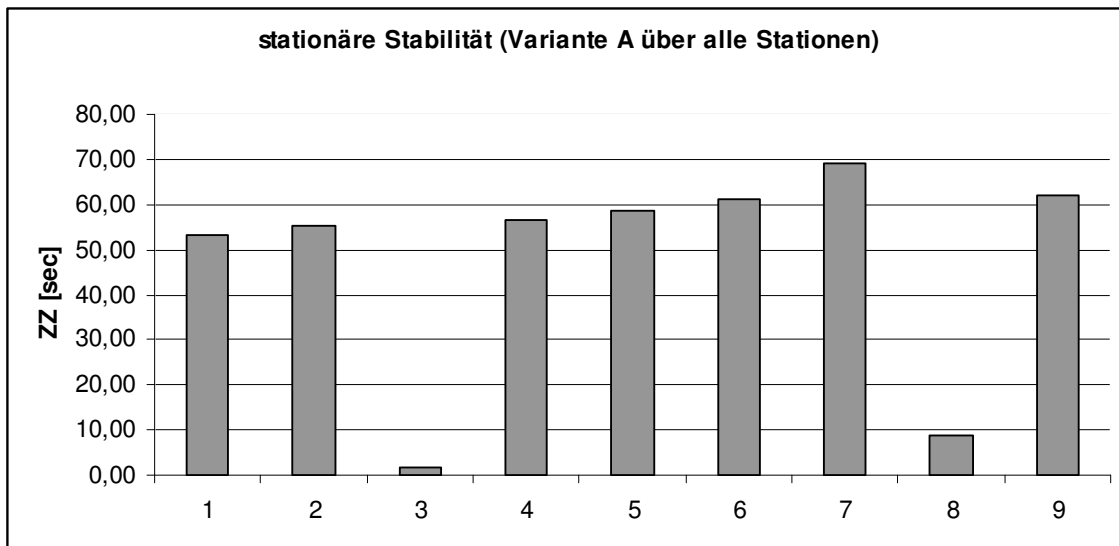


Abbildung 5.8: stationäre Stabilität – exemplarisch für Variante A über alle Stationen der Fertigungslinie dargestellt

Aufgrund der einheitlichen Dimensionierung aller Lean-Metriken zw. null und 100%, soll auch im Kontext der stationären Variabilität die maximale Ausprägung der Metrik positiv formuliert werden. Deshalb wird im Folgenden anstelle des Begriffs der Variabilität die sogenannte Stabilität als positiver und anzustrebender Zielzustand verwendet. Damit ergibt sich im Zusammenhang der stationären Stabilität folgende in das Modell zu integrierende Formel:

Bewertungsgröße:

$$stationäreStabilität_{WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z stationäreStabilität_{Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} * 100$$

(5-37)

$$stationäreStabilität_{WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z (1 - \frac{ZZ_{max,i,Var} - ZZ_{min,i,Var}}{ZZ_{max,i,Var}}) * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} * 100$$

Mit

$stationäreStabilität_{WS}$

durchschnittlich, gewichtete stationäre Stabilität der Fertigungslinie pro Werkstück über alle Varianten

$Var = A, \dots, Z$

Anzahl der Varianten, welche auf der Linie gefertigt werden

$m_{Var,I}$

Produktionsmenge der Fertigungslinie je Variante im Intervall

*stationäre Stabilität*_{Var}

stationäre Stabilität der Fertigungslinie je Variante

$$\text{stationäre Stabilität}_{\text{Var}} = \left(1 - \frac{ZZ_{\text{max},i,\text{Var}} - ZZ_{\text{min},i,\text{Var}}}{ZZ_{\text{max},i,\text{Var}}}\right) \quad (5-38)$$

$ZZ_{\text{max},i,\text{Var}}$

maximale Zykluszeit über alle Stationen der Fertigungslinie für eine Variante (vertikale Spalte der Stations-Varianten-Matrix)

$ZZ_{\text{min},i,\text{Var}}$

minimale Zykluszeit über alle Stationen der Fertigungslinie für eine Variante (vertikale Spalte der Stations-Varianten-Matrix)

Demnach ergibt sich für die stationäre Stabilität folgender Grundsatz: Je geringer die Abweichung der Zykluszeiten zwischen den einzelnen Arbeitsstationen bzw. je kleiner der Korridor zwischen der minimalen und maximalen Ausprägung der Zykluszeit über alle Stationen für eine Variante, desto kleiner wird der Subtraktionsterm und desto größer wird die Ausprägung der stationären Stabilität für eine Variante und damit durchschnittlich über alle Varianten. Kurz formuliert: Je höher der Wert der stationären Stabilität, desto geringer sind die in der Linie vorherrschenden Schwankungen bzgl. der Zykluszeit und desto stabiler ist deren Zustand.

5.1.3.1 Gestaltungsrichtlinie der variantenspezifischen Stabilität

Die zweite Lean-Metrik im Kontext der Reduktion von Variabilität umfasst die horizontale Perspektive, die sogenannte **variantenspezifische Stabilität**. Aufgrund der geometrischen Abweichungen zwischen den Varianten, ergeben sich variierende Zykluszeiten an den jeweiligen Stationen. Das Ziel besteht folglich in einer möglichst gleichmäßigen und somit stabilen Arbeitszeitbelastung innerhalb *einer Station* bei der Fertigung der *differenzierten Varianten*. Die Veränderlichkeit dieser Variabilität liegt letztlich im Produktdesign und ist in der Praxis der Thematik „Produktionsgerechte Produktgestaltung“ zugeordnet.

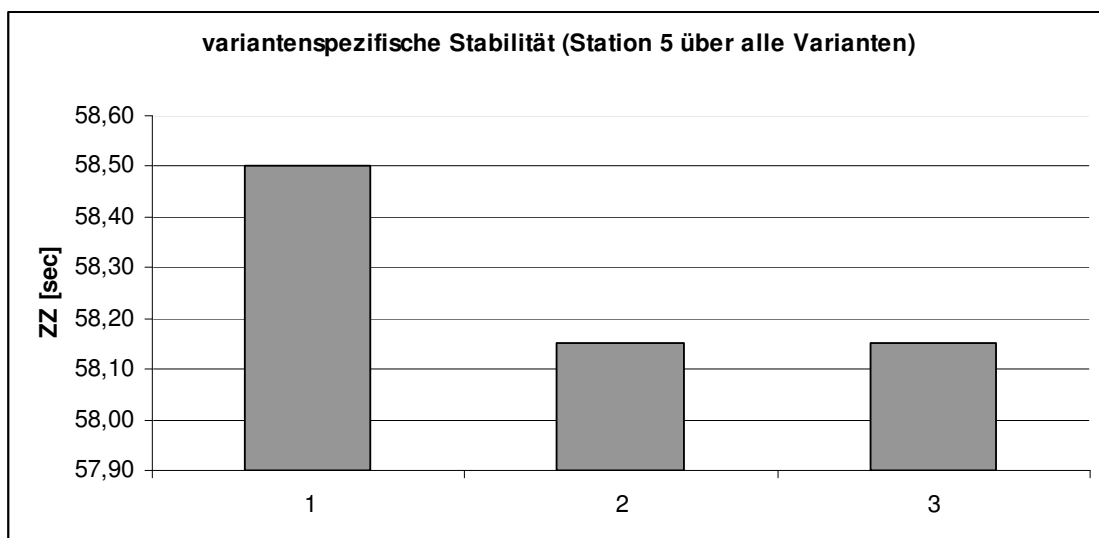


Abbildung 5.9: variantenspezifische Stabilität – exemplarische Darstellung der schwankenden Zykluszeiten an Station fünf über alle drei Varianten

Analog zur positiven Formulierung der stationären Variabilität/Stabilität resultiert folglich in diesem Zusammenhang der Begriff der variantenspezifischen Stabilität mit folgender in das Modell zu integrierende Formel:

Bewertungsgröße:

$$\text{variantenspezifische Stabilität}_{\text{WS}} = \left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n VS_i \right) * 100 \quad (5-39)$$

$$\text{variantenspezifische Stabilität}_{\text{WS}} = \left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{ZZ_{\text{max,Var},i} - ZZ_{\text{min,Var},i}}{ZZ_{\text{max,Var},i}} \right) \right) * 100$$

Mit

$\text{variantenspezifische Stabilität}_{\text{WS}}$ durchschnittlich, gewichtete variantenspezifische Stabilität der Fertigungslinie pro Werkstück über alle Stationen

$i = 1, \dots, n$ Anzahl Stationen (=Prozessschritte) der Linie

$\text{variantenspezifische Stabilität}_i$ variantenspezifische Stabilität der Fertigungslinie je Station

$$\text{variantenspezifische Stabilität}_i = \left(1 - \frac{ZZ_{\text{max,Var},i} - ZZ_{\text{min,Var},i}}{ZZ_{\text{max,Var},i}} \right) \quad (5-40)$$

$ZZ_{\text{max,Var},i}$ maximale Zykluszeit über alle Varianten, welche auf der Linie gefertigt werden, für eine Station (horizontale Zeile der Stations-Varianten-Matrix)

$ZZ_{\text{min,Var},i}$ minimale Zykluszeit über alle Varianten, welche auf der Linie gefertigt werden, für eine Station (horizontale Zeile der Stations-Varianten-Matrix)

Offensichtlich handelt es sich hierbei erneut um eine Durchschnittsbetrachtung. Zunächst werden auf Stationsebene die variantenspezifischen Abweichungen quantifiziert und anschließend über alle Stationen zu einer Gesamtvariabilität/-stabilität aggregiert. Da alle Sub-Stabilitäten jedoch Werte/Ausprägungen im Bereich von null und 100% annehmen, ergibt sich auch für die übergeordnete Stabilität eine Ausprägung innerhalb dieser Normierung.

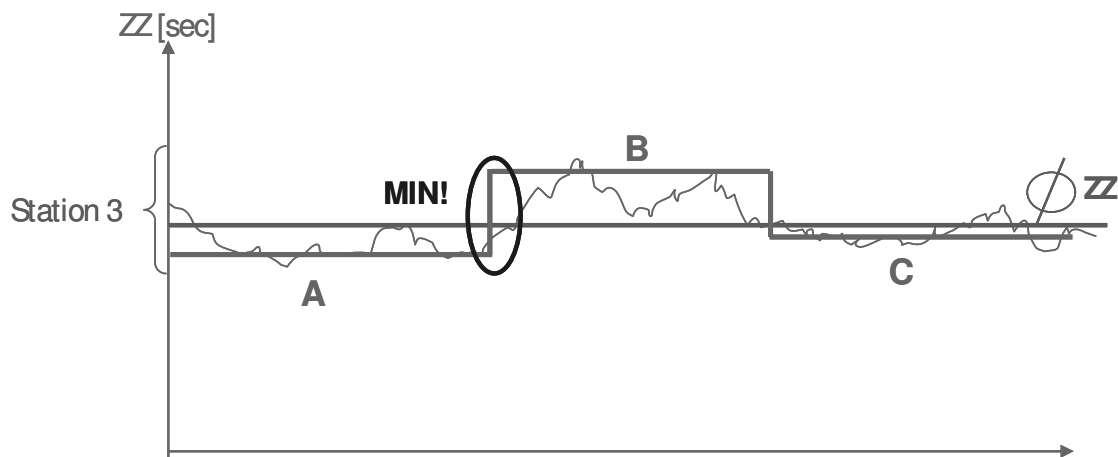


Abbildung 5.10: Grafische Darstellung der variantenspezifischen Stabilität innerhalb einer Bearbeitungsstation

Eine Optimierung dieser Metrik ist ausschließlich über eine Variation der maximalen und minimalen Zykluszeiten, jeweils *innerhalb einer Bearbeitungsstation*, betrachtet über alle Varianten, möglich. Das Ziel besteht folglich in der Minimierung der Abweichung zwischen der minimalen und maximalen Ausprägung der jeweiligen Zykluszeiten. Im Gegensatz zur stationären Stabilität¹¹³, wird jedoch in diesem Kontext eine Optimierung des Korridors für jeweils eine Bearbeitungsstation vorgenommen.

5.2 Entwicklung des Evaluationsmodells

5.2.1 Ableitung der Lean-Kennzahlenpyramide

Für die Bewertung und den Vergleich verschiedener Fertigungslinien und ihrem Grad an Verschwendung dient eine Spitzenkennzahl, der „Lean-Grad“. Diese fasst die zuvor identifizierten Prinzipien der schlanken Produktion zusammen, um somit als Erstindikator zu dienen. Die sogenannte Lean-Kennzahlenpyramide (Abbildung 5.11) gibt in diesem Zusammenhang sowohl die Aggregation der Lean-Metriken zum Lean-Grad, als auch die operative Konkretisierung der Metriken wieder.

¹¹³ Welche zunächst die Optimierung für eine Variante fokussiert

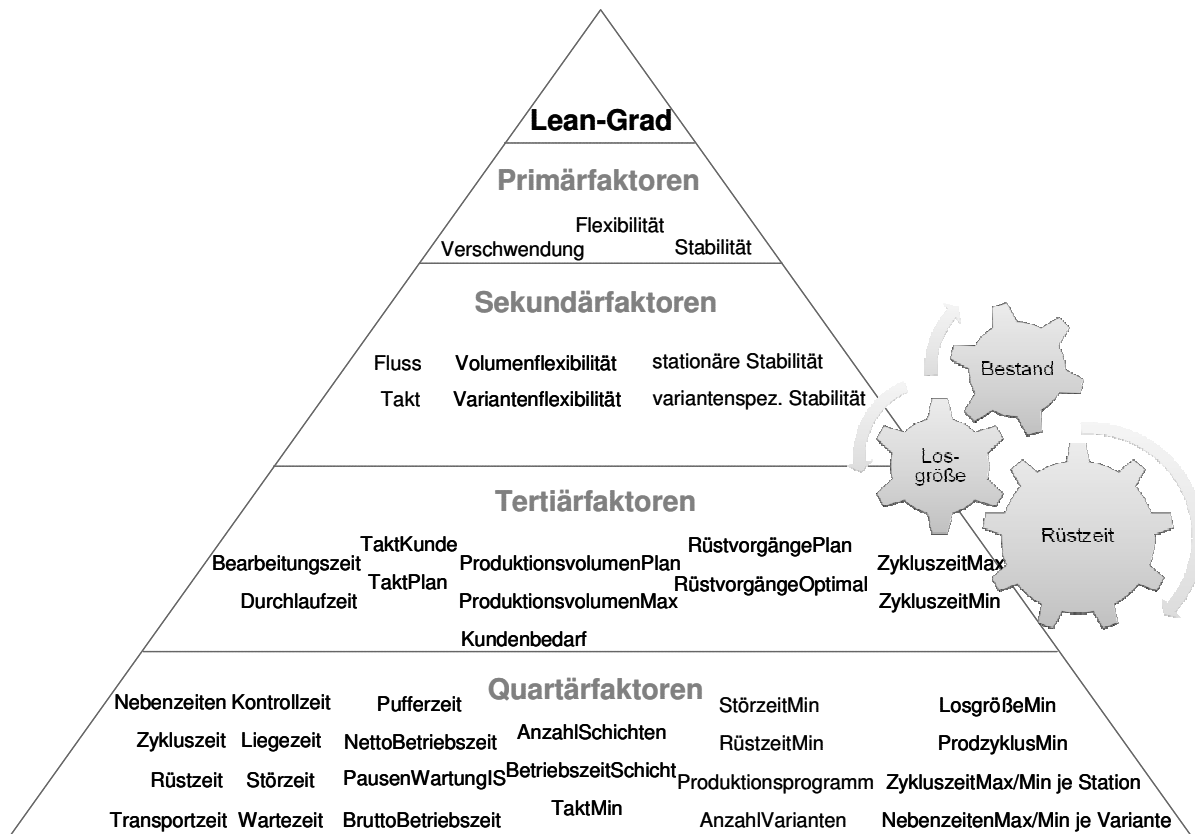


Abbildung 5.11: Ebenen der Lean-Kennzahlenpyramide

An übergeordneter Stelle der Pyramide steht der Lean-Grad, welcher die Erfüllung der Prinzipien der schlanken Produktion als übergeordnete Kennzahl repräsentiert. Diesem liegen wiederum die Prinzipien Verschwendung, Flexibilität und Stabilität in Form sogenannter Primärfaktoren zugrunde. Hieraus erfolgt wiederum die Ableitung der Sekundärfaktoren, dargestellt anhand der zuvor erläuterten Lean-Metriken. Auf Basis der zugrunde liegenden Definitionen der jeweiligen Metriken, lassen sich hieraus im nächsten Schritt die sogenannten Tertiärfaktoren als Komponenten der Metriken darstellen. Auch diese sind in einem weiteren Schritt zu detaillieren. Der Prozess der Operationalisierung endet schließlich bei den technologischen und organisatorischen Systemparametern, wie beispielsweise Rüst-, Stör-, Warte- und Transportzeiten, welche die fünfte Ebene der Lean-Kennzahlenpyramide repräsentieren. Im Umkehrschluss bedeutet dies: Es existiert eine endliche Menge an Kennzahlen bzw. Parametern, welche die Prinzipien der schlanken Produktion konkretisieren. Diese spiegelt sich in der Lean-Kennzahlenpyramide strukturiert wieder und aggregiert sich zu einem übergeordneten Lean-Grad.

Bzgl. der einzelnen Faktoren existieren Überschneidungen, insbesondere zwischen der vierten und fünften Ebene als auch innerhalb der Quartärfaktoren. So dient beispielsweise der geplante Takt (TaktPlan) einerseits der Berechnung der Lean-Metrik Takt und ist folglich in der Menge der Tertiärfaktoren enthalten. Andererseits bildet dieser eine Eingangsgröße zur Berechnung des geplanten Produktionsvolumens und findet sich damit auf fünfter Ebene der Pyramide wieder¹¹⁴. Als weiteres Beispiel kann in diesem Kontext die durchschnittliche Rüstzeit je Rüstvorgang angeführt werden. Transferiert auf die anteilige Rüstzeit je Werkstück, repräsentiert diese ein wesentlicher Bestandteil bei der Ermittlung der Durchlaufzeit. Weiterhin kann in Abhängigkeit der Ausprägung der Rüstzeit, die Anzahl an geplanten bzw. durchführbaren Rüstvorgänge

¹¹⁴ Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf eine wiederholte Auflistung der Kennzahlen in den unterschiedlichen Ebenen der Pyramide verzichtet.

berechnet werden. Die Rüstzeit findet sich damit als Quartärfaktor in unterschiedlichen Tertiärfaktoren wieder.

Die zuvor angeführten Erläuterungen machen deutlich, dass entsprechende Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen und innerhalb der jeweiligen Ebenen der Lean-Kennzahlenpyramide existieren. Dieser Sachverhalt muss deshalb adäquat bei der Berechnung und Optimierung des Lean-Grades berücksichtigt werden. Die in obiger Abbildung dargestellten Zahnräder sollen dies noch einmal visualisieren.

Eine alternative Darstellung der resultierenden technologischen und organisatorischen Systemparameter aus den Lean-Metriken, bietet nachfolgende Tabelle. Im Gegensatz zu Abbildung 5.11 sind diese in Abhängigkeit der ausgeführten Prozessschritte auf der Fertigungslinie strukturiert. Die Logik der Darstellung folgt damit dem Transformationsprozess und berücksichtigt die zeit-, anzahl- und mengenbezogenen Größen der technischen und organisatorischen Systemzustände.

Tabelle 5.1: formalisierte Darstellung der technologischen und organisatorischen Systemparameter, resultierend aus der Operationalisierung der Prinzipien der schlanken Produktion - Teil eins

Prozessschritt	technische Systemzustände					
	Bearbeiten	Nebenzeiten	Zykluszeit	Rüsten		
ggf. Faktor in Lean-Metrik	BAZ(WS)	NBZ(WS)	ZZ(WS)	RZ(WS)		
Detaillierung	BAZ(i,WS)	NBZ(i,WS)	ZZ(i,WS)		RZ(l)	xL(l)
	BAZ(i,Var)	NBZ(i,Var)	ZZ(i,Var)		RZ(r,l)	x(b,l)

Tabelle 5.2: formalisierte Darstellung der technologischen und organisatorischen Systemparameter, resultierend aus der Operationalisierung der Prinzipien der schlanken Produktion - Teil zwei

Prozessschritt	technische Systemzustände					Lagern
	Transportieren	Warten (störungsbedingt)			Warten (ablaufbedingt)	
ggf. Faktor in Lean-Metrik	TZ(WS)	SZ(WS)			WZ(WS)	PZ(WS)
Detaillierung	TZ(i,WS)		SZ(l)	m(Var,l)	WZ(i,WS)	PZ(Lag,WS)
	TZ(Lager,WS)				WZ(i,Var)	PZ(Lag,Var)
						Bestand(Lag,Var)

Tabelle 5.3: formalisierte Darstellung der technologischen und organisatorischen Systemparameter, resultierend aus der Operationalisierung der Prinzipien der schlanken Produktion - Teil drei

Prozessschritt	organisatorische Systemzustände					
	Anzahl Rüstvorgänge (l)	Produktionsmenge	NPZ(l)		PW(l)	
ggf. Faktor in Lean-Metrik	AGRV(l)	m(Var,l)	NPZ(SH)	AS(l)	PW(SH)	AS(l)
Detaillierung						

Offen ist weiterhin, inwiefern die Lean-Metriken die Anforderungen einer vollständigen Ordnung erfüllen. So gilt nach [Opit04, S.121] für eine binäre Relation R auf der Menge A, also für $R \subset A \times A$: Sei R eine binäre Relation auf A. Dann heißt R *vollständig*, wenn $((a,b) \in R \Rightarrow (b,a) \in R)$ für alle $a,b \in A$. Da jede vollständige Relation zugleich reflexiv und transitiv ist, gilt weiterhin: R heißt *reflexiv*, wenn $(a,a) \in R$ für alle $a \in A$. R heißt *transitiv*, wenn $((a,b) \in R \wedge (b,c) \in R \Rightarrow (a,c) \in R)$ für alle $a,b,c \in A$. Im Kontext der vorliegenden Arbeit entsprechen die Lean-Metriken jeweils einer Relation. Die Menge der technologischen und organisatorischen Systemparameter repräsentiert hingegen A. Auf einen umfassenden mathematischen Beweis, hinsichtlich der Erfüllung der vollständigen Ordnung durch die Lean-Metriken, wird an dieser Stelle jedoch verzichtet. Eine Erläuterung der positiven Korrelation

zwischen den Lean-Metriken Takt und Volumenflexibilität (siehe Kapitel 5.1.2.1 und 5.3.2.2) sowie der Überschneidungen innerhalb der Lean-Kennzahlenpyramide werden als ausreichend erachtet, um auf eine Nicht-Erfüllung obiger Anforderung zu schließen.

Dennoch führen die Lean-Metriken zu einer Konkretisierung und damit Operationalisierung der Prinzipien der schlanken Produktion. Insbesondere die Ermittlung der Ausprägungen der technologischen und organisatorischen Systemparameter stellt eine Ausgangsbasis für die Evaluations- und Optimierungsmodelle dar, weshalb diese nachfolgend¹¹⁵ präzisiert werden.

5.2.2 Aggregation der Lean-Metriken und Ermittlung des Lean-Grad

Die Aggregation der verschiedenen Lean-Metriken zu einer Kennzahl, dem Lean-Grad, dient, wie bereits erläutert, der Einführung eines übergeordneten Indikators. Dieser soll sowohl die Vergleichbarkeit von Planungsalternativen gewährleisten, als auch vorab aussagekräftig auf Handlungsbedarfe hinweisen. In nachfolgender Abbildung finden sich die einzelnen Lean-Metriken, belegt mit fiktiven Werten und visualisiert durch ein Spinnennetz Diagramm, wieder:

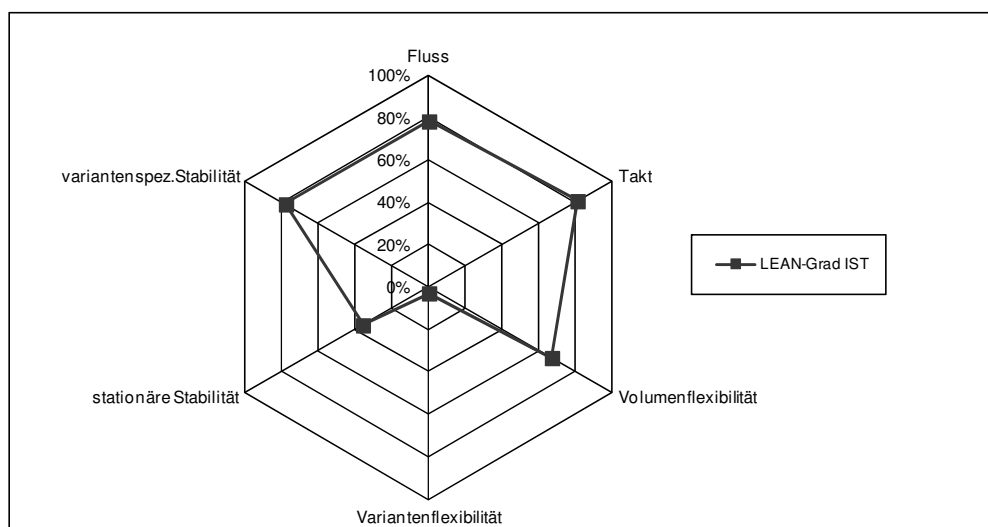


Abbildung 5.12: Visualisierung der prozentualen Ausprägungen der Lean-Metriken

Die Art der Gewichtung spielt demnach eine zentrale Rolle in der Fusion der Kennzahlen zum Lean-Grad. So muss einerseits bei einer hohen Ausprägung (z.B. größer als 70%) aller singulären Kennzahlen, auch der Lean-Grad eine entsprechend hohe Ausprägung widerspiegeln. Dies ist jedoch beispielsweise bei der Multiplikation der Kennzahlen, in Analogie zur Berechnung des OEE, nicht gewährleistet. Ist hingegen das prozentuale Ergebnis einer Metrik gering (z.B. kleiner als zehn %), muss sich dieser Sachverhalt analog im Lean-Grad wieder finden.

Vor diesem Hintergrund wird deshalb bei der Berechnung des Lean-Grad zunächst eine Transformation der einzelnen Kennzahlenausprägungen, durch die Berechnungsformel des logistischen Wachstums, vorgenommen:

$$f(x) = \frac{g}{2} * \operatorname{tanhyp}(k * (x - w) + 1) \quad (5-41)$$

Gemäß den Eigenschaften des logistischen Wachstums, werden die Werte unterhalb des Wendepunktes im Vergleich zur linearen Ausprägung minimiert. Damit soll insbesondere dem Einfluss sehr geringer Werte auf den Lean-Grad Rechnung getragen werden. Oberhalb des Wendepunktes erfolgt hingegen die Transformation zu einem größeren Wert im Vergleich zur

¹¹⁵ Trotz obigem Defizit

linearen Darstellung. Damit kann die Aggregation hoher Kennzahlausprägungen zu einem hohen Gesamtwert gewährleistet werden.

Nachfolgend findet sich der Verlauf der logistischen Wachstumskurve wieder. In unten stehender Abbildung wurde dabei eine Schranke, d.h. maximale Kennzahlausprägung, von eins hinterlegt. Dies entspricht der Dimensionierung des Lean-Grades sowie den Metriken zwischen null und 100%. Weiterhin wurde eine Stauchungsfaktor von $k=4$ hinterlegt. Dieser bestimmt die Größe der Fläche zwischen der linearen und logistischen Wachstumskurve. Je größer dabei der Stauchungsfaktor, desto größer sind die jeweiligen Flächenanteile. Der Wendepunkt wurde (auch für die Berechnung des Lean-Grad) auf 0,5 festgelegt. Damit werden, wie unten stehender Abbildung zu entnehmen ist, alle Werte kleiner als 0,5 in eine minimierte Größe und alle Werte größer als 0,5 in einen maximierten Wert transferiert.

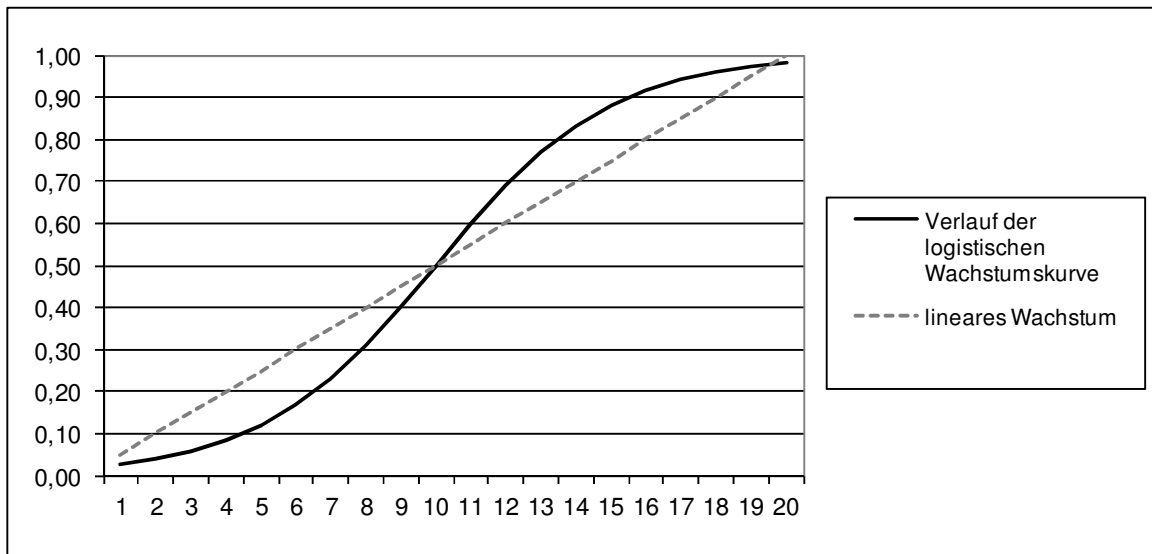


Abbildung 5.13: Transformation der linearen Werte in die logistische Wachstumskurve

Die abschließende Berechnung des Lean-Grad erfolgt durch das arithmetische Mittel:

$$\text{arithmetisches Mittel} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5-42)$$

Dieses ist invariant gegenüber der Anordnung bzw. Reihenfolge der singulären Lean-Metriken. Weiterhin werden sowohl positive als auch negative Ausprägungen einzelner Kennzahlenwerte normiert. Eine Zusammenfassung des erläuterten Sachverhalts findet sich in folgender Tabelle wieder:

Tabelle 5.4: Transformation der Lean-Metriken und Berechnung des Lean-Grad durch das arithmetische Mittel der Transformationswerte

Lean-Metrik	IST	Transformation - logistisches Wachstum
Fluss	78,00%	0,90
Takt	81,00%	0,92
Volumenflexibilität	67,00%	0,80
Variantenflexibilität	3,00%	0,02
stationäre Stabilität	36,00%	0,25
variantenspez. Stabilität	78,00%	0,90
Lean-Grad:	63,25%	
arithmetisches Mittel der Transformation		

5.3 Entwicklung des Optimierungsmodells

Für die Gestaltung spanender Fertigungslinien nach den Prinzipien der schlanken Produktion, ist die Erfüllung dieser durch das System zu optimieren. Hinsichtlich des Lean-Grad impliziert dessen prinzipielle Steigerung gemäß der Formel

$$\text{Lean-Grad} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5-43)$$

mit x_i singuläre Lean-Metrik nach der logistischen Wachstumstransformation
 $i = 1, \dots, n$ Lean-Metriken

die Verbesserung der Ausprägung jeder singulären Lean-Metrik, da $n = \text{konstant}$.

Unterschieden werden kann jedoch ein weiterer Fall, nämlich:

$$x_i \uparrow \quad \neg \forall i = 1, \dots, n$$

aufgrund konträrer oder neutraler Interdependenzen zwischen den singulären Lean-Metriken. In diesem Kontext muss abgewogen werden, inwiefern die Verschlechterung einer oder mehrerer Lean-Metriken durch die Verbesserung der anderen Metriken kompensiert werden kann. Ist dies der Fall, so resultiert ein optimierter Lean-Grad. Andernfalls ist ein konstanter oder reduzierter Lean-Grad zu beachten.

Dieser Aufgabe wird in Form des mathematischen Optimierungsmodells nachgegangen. Durch die monetäre Gewichtung der technologischen und organisatorischen Systemparameter, resultierend aus den Lean-Metriken, werden die operativen Kosten des Serienbetriebs minimiert. Im Folgenden ist es notwendig das Optimierungsproblem lösungsgerecht zu formulieren, was wiederum die formale Unterteilung des Modells in Eingangsgrößen, bestehend aus Indizes und Parametern, Entscheidungsvariablen, die Zielfunktion sowie die entsprechenden Restriktionen voraussetzt. Da sich die Zielfunktion additiv aus mehreren Kostenfunktionen zusammen setzt, soll nachfolgend zunächst die Ableitung dieser fokussiert werden.

5.3.1 Identifikation der relevanten Kostenparameter

Das Ziel besteht in der Minimierung der anteiligen Stückkosten, welche im operativen Betrieb der Fertigungslinie entstehen, bedingt durch eine optimale Ausprägung der technologischen und organisatorischen Systemparameter. Diese Kosten finden sich anteilig in den Herstellkosten je Werkstück wieder und sind daher als Teilkosten zu bezeichnen.

Um die Teilkosten zu bestimmen, welche durch die auf der Fertigungslinie ausgeführten Prozessschritte determiniert werden, muss zunächst eine geeignete Kostengliederung geschaffen werden. Dazu soll die Orientierung an den Ereignissen des Fertigungsprozesses¹¹⁶ als Ausgangspunkt verwendet werden. Im Gegensatz zur konventionellen Herstellkostenkalkulation auf Vollkostenbasis, bietet die Verrichtungsorientierung eine adäquate, verursachungsgerechte Detaillierung der Teilkosten.

Auf Basis der identifizierten Prozessschritte¹¹⁷ (siehe Kapitel 5.2.1), werden die jeweils dadurch verursachten Kosten anhand der Faktoren Mensch, Maschine und Material¹¹⁸ klassifiziert bzw. formalisiert. Konkret sind die korrespondierenden technologischen und organisatorischen Systemparameter der Prozessschritte anhand von Personen-, Maschinen- und Materialsätzen monetär zu bewerten. Die Integration dieser (horizontalen und vertikalen) Dimensionen impliziert

¹¹⁶ Analog hierzu kann der Begriff des Transformationsprozesses verwendet werden.

¹¹⁷ Horizontale Dimension

¹¹⁸ Vertikale Dimension

die top-down Ableitung aller relevanten Kostenparameter und wird folglich den Anforderungen einer systematischen Kostengliederung gerecht.

5.3.1.1 Rüstkosten

Die anschließenden Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf das Rüsten aufgrund eines Produkt-/Variantenwechsels. Die den Rüstkosten zugrunde liegenden Rüstprozesse determinieren das Fertigungsverhalten der Linie wesentlich. In Ergänzung zu Kapitel 5.1.2.4, in welchem die Auswirkungen der Rüstzeit auf die Ausprägung der Variantenflexibilität erläutert wurden, sollen nachfolgend die monetären Effekte der geplanten Rüstvorgänge aufgezeigt werden.

Die Bezugsgröße der Rüstkosten ist die Rüstzeit je Rüstvorgang. Letzt genannte variiert in Abhängigkeit von der jeweils zuvor und anschließend gefertigten Variante¹¹⁹. Für das Optimierungsmodell soll jedoch vereinfachend von einer durchschnittlichen Zielgröße ausgegangen werden¹²⁰. Grafisch ergibt sich damit folgender Sachverhalt:

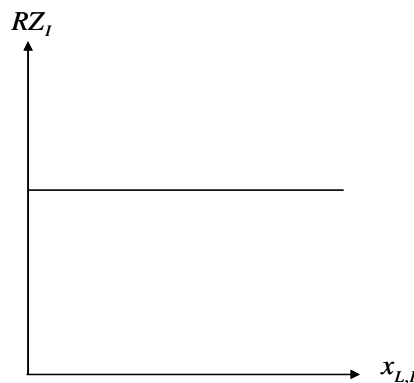


Abbildung 5.14: von der Losgröße unabhängige, durchschnittliche Rüstzeit je Rüstvorgang nach [Koeh88, S.44]

Wird die durchschnittliche Rüstzeit je Rüstvorgang mit einem konstanten Rüstkostensatz multipliziert, ergeben sich dadurch losgrößenunabhängige Rüstkosten [Koeh88, S.44]. Der Anteil eines Stücks aus einem Los an diesen Kosten, errechnet sich durch einfache Division dieses Betrages durch die durchschnittliche Losgröße. Damit ergeben sich die anteiligen Rüstkosten je Werkstück während eines Produktionszyklus wie folgt:

$$\frac{RZ_I * f_{Maschbel}}{x_{L,I}} \quad (5-44)$$

Unter der Annahme, dass ein Rüstvorgang durch die Maschinenbediener erfolgt, welche fixe Personalkosten verursachen, dürfen diese nicht in den Rüstkostensatz inkludiert werden. Vielmehr repräsentiert die Rüstbelegungszeit¹²¹ als Basis der Maschinenkosten obigen Rüstkostensatz.

Für eine adäquate, monetäre Quantifizierung der Rüstzeit, darf diese¹²² jedoch nicht ausschließlich mit einem konstanten Rüstkostensatz multipliziert werden. Die eigentliche

¹¹⁹ Dieser Sachverhalt findet sich in der sogenannten Rüstmatrix wieder.

¹²⁰ Die Optimierung der durchschnittlichen Rüstzeit je Rüstvorgang ist anteilig auf die singulären Rüstzeiten in der Rüstmatrix aufzuteilen.

¹²¹ Unter Rüstbelegungszeit (Werkzeugwechsel, Maschine justieren, Maschine anfahren bis zum ersten i.O. Teil) ist die gesamte Zeit zu verstehen, die benötigt wird, um nach einem Sortenwechsel auf einer Maschine mit der Fertigung der neuen Varianten zu beginnen.

¹²² Im Gegensatz zu bisherigen Ausführungen in der Literatur; siehe beispielsweise [Koeh88, S.44]

Kostenproblematik liegt nicht in einer Minimierung der durch die Rüstzeit verursachten Maschinenbelegungskosten, sondern in der durch das Rüsten verloren gegangenen Produktionszeit.

Die anteiligen Rüstkosten je Werkstück setzen sich im betrachteten Zeitintervall folglich aus zwei Kostenfaktoren zusammen:

- Maschinenbelegungskosten während der Rüstzeit je Rüstvorgang für Energie, Werkzeug sowie evtl. variablem, externem Unterstützungspersonal
- Opportunitätskosten des Rüstens aufgrund der verloren gegangenen Produktionszeit, welche anhand der opportunen Ausbringungsmenge quantifiziert wird

Mathematisch formalisiert, resultiert dieser Sachverhalt in folgender Kostenfunktion:

$$\min c_{Rüsten,I,WS} = \left(\frac{RZ_I * f_{Maschbel} + \frac{RZ_I}{(ZZ_{\max,i,WS} + SZ_{WS})} * f_{Gewinn}}{x_{L,I}} \right) \quad (5-45)$$

Mit

$c_{Rüsten,I,WS}$

anteiligen Rüstkosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells und gemäß der Nomenklatur der Arbeit einer tertiären Entscheidungsvariablen

$$RZ_I = \frac{1}{j} * \sum_{r=1}^j RZ_{r,I}$$

durchschnittliche Rüstzeit je Rüstvorgang im Betrachtungsintervall; primäre Entscheidungsvariable, welche als Aggregationsgröße entsprechend der Zielfunktion zu dimensionieren ist; das Optimierungsergebnis ist anschließend anteilig auf die Rüstzeiten $RZ_{r,I}$ in der Rüstmatrix zu adaptieren

$ZZ_{\max,i,WS}$

maximale, durchschnittlich, gewichtete Zykluszeit innerhalb der Fertigungslinie über alle Stationen; sekundäre Entscheidungsvariable, welche durch die primäre Entscheidungsvariable $NBZ(i,Var)$ determiniert wird

$$ZZ_{\max,i,WS} = \max_{Var=A} \frac{\sum_{i=1}^Z (BAZ_{i,Var} + NBZ_{i,Var}) * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-46)$$

SZ_{WS}

anteilige Störzeit je Werkstück; sekundäre Entscheidungsvariable in Abhängigkeit der primären Entscheidungsvariablen $\sum_I SZ$ (kumulierte Störzeit im

Betrachtungsintervall) und $\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}$ (Produktionsmenge über alle Varianten im Intervall)

$$SZ_{WS} = \frac{\sum_I SZ}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-47)$$

$$\frac{RZ_I}{(ZZ_{\max,i,WS} + SZ_{WS})}$$

verloren gegangene Ausbringungsmenge während des Rüstens, welche mit entsprechenden Opportunitätskosten bewertet wird

 $x_{L,I}$

durchschnittliche Losgröße im Intervall; primäre Entscheidungsvariable, welche analog zur durchschnittlichen Rüstzeit als Aggregationsgröße entsprechend der Zielfunktion zu dimensionieren ist

$$x_{L,I} = \frac{1}{B} * \sum_{b=1}^B x_{b,I} \quad (5-48)$$

 $f_{Maschbel}$

konstanter Maschinenbelegungskostensatz in €/h für Energie, Werkzeuge etc.

 $f_{Gewinn} = f_{\text{int. Verrechnungspreis-HK}}$

konstanter Gewinn in €/WS, welcher durch den Verkauf eines Werkstücks erzielt werden kann

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Minimierung obiger Kostenfunktion, die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

 $RZ_I \downarrow$ $x_{L,I} \uparrow$

$ZZ_{\max,i,WS} \uparrow$ und damit

$NBZ_{i,Var} \uparrow$

$SZ_{WS} \uparrow$ und damit

$$\sum_I SZ \uparrow$$

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \downarrow \text{ und folglich}$$

$$AGRV_I \downarrow$$

Weiterhin sind die Interdependenzen zwischen den Entscheidungsvariablen zu berücksichtigen. So besteht beispielsweise zwischen $AGRV_I$ und $x_{L,I}$ eine umgekehrt proportionale Korrelation. Wird die Anzahl der Rüstvorgänge erhöht, wird die Losgröße reduziert und umgekehrt. Der Bezug zur durchschnittlichen Rüstzeit ist jedoch Fallspezifisch. Erfolgt eine Reduktion dieser, so kann die zusätzlich gewonnene Zeit entweder als Produktionszeit oder für zusätzliche Rüstvorgänge verwendet werden. Dies ist wiederum abhängig von der Erfüllung des Kundenbedarfs. Weitere Interdependenzen sind daher durch übergreifende Restriktionen des Modells abzubilden.

5.3.1.2 Losanlaufkosten

Im Zusammenhang der Rüstkosten treten zwangsläufig sogenannte Losanlaufkosten auf. Nach Beendigung des Rüstens resultieren häufig Anlaufprobleme, verursacht durch erhöhte Zykluszeiten je Werkstück. Mit zunehmender Ausbringungsmenge nähert sich diese Größe jedoch dem Planwert an. Unter der Annahme, dass nach unmittelbarem Fertigungsbeginn die Losanlauf-/Zykluszeitverluste am größten sind und dann langsam ausklingen, ist folgender hyperbelähnlicher Verlauf mit linearem Übergang zu beobachten:

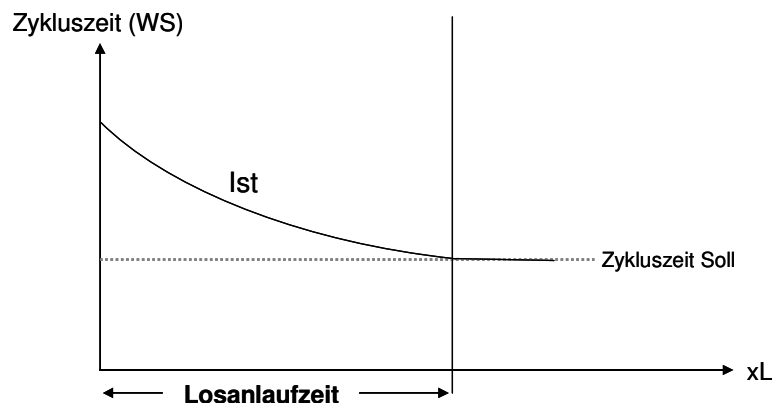


Abbildung 5.15: Verlauf der Zykluszeit in Abhängigkeit der Ausbringungsmenge/Losgröße nach einem Rüstvorgang

In diesem Zeitintervall fallen die von der Produktionsdauer abhängigen Kosten¹²³ unverändert an und belasten die jeweiligen Werkstücke mit höheren variablen Kosten. Für die Ableitung der Stückkostenfunktion im Kontext der Losanlaufverluste bestehen folglich zwei Optionen:

- Monetäre Quantifizierung der zusätzlich benötigten Produktionszeit¹²⁴ durch Personal- und Maschinenkosten
- Monetäre Quantifizierung der Differenz in der Ausbringungsmenge anhand von Opportunitätskosten durch entgangenen Gewinn

¹²³ Siehe Maschinen- und Personalkosten

¹²⁴ Für die Fertigung der Differenz in der Ausbringungsmenge

Damit dient die Losanlaufzeit als Bezugsgröße für die Losanlaufkosten [Koeh88, S.46]. Bzgl. der Stückkosten ist somit eine analoge Degression mit hyperbelähnlichem Verlauf zu beobachten, welche bei Erreichung der vollen Leistung in eine Gerade übergeht.

Für die Ableitung der Stückkostenfunktion werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die erhöhten variablen Kosten anhand von Opportunitäten quantifiziert. Durch eine entsprechend erhöhte Zykluszeit je Arbeitsstation nach unmittelbarer Beendigung des Rüstvorgangs, resultiert ein Delta in der Ausbringungsmenge, verglichen mit einem eingeschwungenen Systemzustand. Diese Differenz kann analog zu den Opportunitätskosten des Rüstens bewertet, auf ein Werkstück bezogen und für alle Produktionsintervalle summiert werden. Zusammenfassend ergibt sich damit:

$$\min c_{\text{Losanlauf}, I, \text{WS}} = \left(\frac{\frac{LAZ_I}{(ZZ_{\max, i, \text{WS}} + SZ_{\text{WS}})} - \frac{LAZ_I}{(ZZ_{\max, i, \text{Losanlauf}, \text{WS}} + SZ_{\text{WS}})}}{x_{L, I}} \right) * f_{\text{Gewinn}} \quad (5-49)$$

Mit

$c_{\text{Losanlauf}, I, \text{WS}}$

anteilige Losanlaufkosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells

LAZ_I

durchschnittliche Losanlaufzeit im Intervall nach jedem Rüstvorgang; primäre Entscheidungsvariable

$ZZ_{\max, i, \text{Losanlauf}, \text{WS}}$

maximale, durchschnittlich, gewichtete Zykluszeit während des Losanlaufs innerhalb der Fertigungslinie über alle Stationen; sekundäre Entscheidungsvariable, welche durch die primäre Entscheidungsvariable $ZZ(i, \text{Losanlauf}, \text{WS})$ determiniert wird

$\frac{LAZ_I}{(ZZ_{\max, i, \text{WS}} + SZ_{\text{WS}})}$

theoretische Ausbringungsmenge während der Losanlaufzeit bei Vernachlässigung der Losanlaufverluste

$\frac{LAZ_I}{(ZZ_{\max, i, \text{Losanlauf}, \text{WS}} + SZ_{\text{WS}})}$

reale Ausbringungsmenge während der Losanlaufzeit

$ZZ_{\max, i, \text{Losanlauf}, \text{WS}} \geq ZZ_{\max, i, \text{WS}}$

Abbildung der erhöhten Zykluszeit während des Losanlaufs

LAZ_{WS}

anteilige Losanlaufzeit je Werkstück; sekundäre Entscheidungsvariable

$$LAZ_{WS} = \frac{LAZ_I}{x_{L,I}} \quad (5-50)$$

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Minimierung obiger Kostenfunktion, die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$$x_{L,I} \uparrow$$

$$\frac{LAZ_I}{(ZZ_{\max,i,WS} + SZ_{WS})} \downarrow \text{ und damit}$$

$$LAZ_I \downarrow$$

$$ZZ_{\max,i,WS} \uparrow \text{ und damit}$$

$$NBZ_{i,Var} \uparrow$$

$$SZ_{WS} \uparrow \text{ und damit}$$

$$\sum_I SZ \uparrow$$

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \downarrow$$

$$\frac{LAZ_I}{(ZZ_{\max,i,Losanlauf,WS} + SZ_{WS})} \uparrow \text{ und damit}$$

$$LAZ_I \uparrow$$

$$ZZ_{\max,i,Losanlauf,WS} \downarrow$$

$$ZZ_{i,Losanlauf,WS} \downarrow$$

$$SZ_{WS} \downarrow \text{ und damit}$$

$$\sum_I SZ \downarrow$$

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \uparrow$$

Da die Differenz der Ausbringungsmenge, quantifiziert anhand des Term $\left(\frac{LAZ_I}{(ZZ_{\max,i,WS} + SZ_{WS})} - \frac{LAZ_I}{(ZZ_{\max,i,Losanlauf,WS} + SZ_{WS})} \right)$, im Sinne der Kostenminimierung reduziert werden soll, resultiert ein Konflikt bzgl. der Ausprägung der Entscheidungsvariablen, wie oben dargestellt.

5.3.1.3 Bestandskosten

Für den Kontext der vorliegenden Arbeit sind zunächst die relevanten Kosten auf das Zwischenlager¹²⁵ einzugrenzen. Sogenannte Puffer innerhalb der Fertigungslinie sowie unmittelbar vor und nach der Fertigung, werden aufgrund ihrer geringen Verweildauer im Vergleich zum Zwischenlager vernachlässigt.

Aufgrund der Vielfalt an Veröffentlichungen zu Bestands-/Lagerkosten, soll zunächst definiert werden, welche singulären Kostenbestandteile darin enthalten sind.

[Koeh88, S.57] inkludiert in den Begriff der Bestandskosten, Kapitalbindungs- und Lagerkosten. Dabei berechnen sich die Kapitalbindungskosten aus der Summe des im Lager gebundenen Materialwertes und Herstellkosten über alle Werkstücke, multipliziert mit dem kalkulatorischen Zins. Diese repräsentieren damit Opportunitätskosten. Bei den Lagerkosten werden Lagerraum, Lagermittel und personelle Aufwendungen erfasst. In Abhängigkeit der Lagerstruktur¹²⁶, können diese Gemeinkosten auf Basis eines Kalkulationsschlüssels anteilig den Produkten zugeordnet werden.

[Helm11, S.19] unterteilt den Begriff der Lagerkosten zusätzlich in Kosten für Lager bzw. Lagersysteme und variable Lagerkosten. Erst genannte entsprechen Fixkosten unabhängig von der Lagermenge¹²⁷. Die variablen Kosten resultieren in Abhängigkeit der Lagermenge, multipliziert mit dem variablen Lagerkostensatz¹²⁸. Zusammenfassend beinhalten damit die Bestandskosten sowohl Kapitalbindungs-, als auch fixe und variable Lagerkosten.

Die Bezugsgröße der variablen Kostenfaktoren ist folglich die Lagermenge sowie die dadurch determinierte Verweildauer im Lager. Mit Bezugnahme zu Kapitel 5.1.1.1, soll auch in diesem Kontext von statischen Größen ausgegangen werden. Weiterhin sind für die Ableitung der Bestandskosten folgende Annahmen zu treffen:

- Die maximale Lagerkapazität entspricht der durchschnittlichen Losgröße $x_{L,I}$ über alle Varianten.
- $x_{L,I}$ sowie der durchschnittliche Bestand im Lager verhalten sich proportional.
- Bei einer Losgrößenreduktion passt sich der interne Kunde dieser an, welche die zuvor getroffene Annahme weiter legitimiert.

Wird als durchschnittlicher Lagerbestand $\frac{x_{L,I}}{2}$ angenommen, ergeben sich die Bestandskosten je Werkstück im Betrachtungsintervall wie folgt:

$$\min c_{\text{Bestand},I,WS} = \frac{1}{\sum_{\text{Var}=A} m_{\text{Var},I}} * \left(\frac{x_{L,I}}{2} * (f_{\text{Materialwert}} + f_{\text{HK}}) * f_{\text{kalk.Zins}} + \frac{x_{L,I}}{2} * f_{\text{Lagerkosten,var}} + f_{\text{Lagerkosten,fix},I} \right)$$

(5-51)

¹²⁵ Zwischen zwei Fertigungsstufen; Auf Basis des in Kapitel 5.4.3 definierten Fokus der Arbeit, tangieren die in dieser Arbeit definierten Bestandskosten ausschließlich die Bestände, d.h. Halbfertigerzeugnisse, im Warenausgangslager der Fertigungslinie.

¹²⁶ So werden beispielsweise in der Großserienfertigung in einem Lagerraum mehrere Erzeugnisse (Halbfertig und Fertig) umgeschlagen.

¹²⁷ Hierzu gehören beispielsweise Kosten der Lageradministration sowie der Lagermittel

¹²⁸ In Abhängigkeit des Lagerbestands, sind die variablen Kosten für die Anzahl der benötigten Lagerplätze sowie die damit verbundenen Opportunitätskosten durch den Flächenbedarf zu berücksichtigen.

Mit

$c_{\text{Bestand},I,WS}$

Bestandskosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells

$f_{\text{Materialwert}}$

konstanter Materialwert in €/WS; durchschnittliche Größe über alle Varianten

$f_{\text{kalk.Zins}}$

kalkulatorischer, konstanter Zins als Basis der Berechnung von Opportunitätskosten aufgrund des im Lager gebundenen Kapitals

$f_{\text{Lagerkosten,var}}$

Lagerhaltungskostensatz in €/WS für Lagerplätze und Lagerfläche für die Berechnung der variablen Lagerkosten;

$f_{\text{Lagerkosten,fix,I}}$

für die Fertigungslinie fixe Lagerhaltungskosten in € im Intervall, unabhängig von der Lagermenge für Lagermittel, Lagerraum und personelle Aufwendungen

Letzt genannte Komponente könnte auch durch einen Kalkulationsschlüssel den Varianten im Lager zugeordnet werden und wäre damit abhängig von der Losgrößenentwicklung. Dennoch ist zu beachten, dass eine prozentuale Losgrößenreduktion, nicht zu einer äquivalenten Reduktion der Kosten für einen Lagerraum führt¹²⁹. Vor diesem Hintergrund wird diese Kostenkomponente im Kontext der Arbeit als fix erachtet¹³⁰ und anteilig den Werkstücken über die Produktionsmenge zugerechnet.

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Minimierung obiger Kostenfunktion, die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$x_{L,I} \downarrow$

$\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} \uparrow$

$$PZ_{\text{WA,WS}} = \frac{\frac{x_{L,I}}{2}}{\text{Takt}_{\text{Kunde,WS}}} \downarrow \text{ und damit}$$

¹²⁹ Die Lagerhalle sowie entsprechende Lagermittel werden dennoch benötigt, wenn auch nur zu einem geringeren Umfang. Entsprechende Investitionen oder Abschreibungen werden dadurch jedoch nicht minimiert.

¹³⁰ Ausblick: Bei einer Reduktion von Beständen über **alle** Varianten im Lager sowie im gesamten Werk, ist hingegen eine Reduktion der fixen Lagerkosten zu integrieren. So kann beispielsweise ein existierendes Lager aufgelöst oder der Bau eines neuen vermieden werden. Hierfür ist jedoch die Methodik auf die gesamte Wertschöpfungskette eines Unternehmens/Werks auszuweiten.

$$Takt_{Kunde,WS} = \frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} = \frac{BPZ_I - PWI_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}}$$

Die Dimensionierung des Kundentakts erfolgt in Abhängigkeit der Betriebszeit. Da diese im Rahmen der Bestandskosten nicht relevant ist, wird auf weitere Kostenfaktoren im Verlauf der Arbeit verwiesen.

5.3.1.4 Folgekosten des Bestands

Folgekosten des Bestands resultieren aus Qualitätsproblemen sowie erforderlichen Änderungen an Werkstücken. Aufgrund von hohen Verweilzeiten¹³¹ im Lager können Werkstücke rosten. Auch die nach Abschluss eines Fertigungsloses identifizierten Qualitätsmängel, führen bei entsprechend großen Fertigungslosen zu hohen Nacharbeits- oder Ausschussaufwendungen. Bei Modellpflegen im Automobilbau werden hingegen Änderungen an den gelagerten Teilen erforderlich. In jedem Fall führt dies zu Ausschuss oder Nacharbeit¹³² sowie im erst genannten Fall zu einer erneuten Produktion der benötigten Werkstücke.

Monetär quantifizieren lässt sich dieser Sachverhalt ausschließlich empirisch. Die bei der Validierung erhobenen Daten zeigen, dass ein pauschaler, prozentualer Faktor in Abhängigkeit der Bestandskosten angenommen werden kann. Damit resultiert folgende Stückkostenfunktion für die Folgekosten des Bestands:

$$\min c_{FolgeBestand,I,WS} = f1 * c_{Bestand,I,WS} \quad (5-52)$$

Mit

$$0 \leq f1 \leq 1 \quad \text{aus Studien/Empirie ermittelter Faktor}$$

Die primären und sekundären Entscheidungsvariablen verhalten sich damit analog zu den Bestandskosten.

5.3.1.5 Transportkosten

In Anlehnung an [Koeh88, S.60], werden in diesem Kontext alle Kostenfaktoren erfasst, welche aufgrund von Transporten in und zwischen den Produktionsbereichen inkl. der erforderlichen Handlungsschritte¹³³ zur Bereitstellung von Material und Werkzeugen anfallen. Damit sind konkret die Transportvorgänge zwischen dem Lager und einer Fertigungsstufe beinhaltet.

Es wird davon ausgegangen, dass ein Transportmittel eine maximale Transportmenge $x_{T,Var}$ je Transportvorgang und Variante transportieren kann. Darunter soll im weiteren Verlauf die Transportlosgröße verstanden werden. Aufgrund des unterschiedlichen Werkstückvolumens je Variante, ist die jeweilige Transportlosgröße für alle Varianten zu ermitteln. Analog zur durchschnittlichen Losgröße im Betrachtungsintervall über alle Varianten, wird eine durchschnittliche Transportlosgröße berechnet. Unter der Annahme, dass ein Transportmittel nur ein Transportbehälter je Transportvorgang¹³⁴ transportieren kann¹³⁵, ist die Anzahl der geplanten Transportvorgänge für ein Los, gemäß nachfolgender Formel, zu berechnen:

¹³¹ Im Kontext der Arbeit als Pufferzeiten bezeichnet und unmittelbar durch die Losgröße determiniert

¹³² Jedoch explizite Abgrenzung zu den Werkstücken, welche unmittelbar nach der Qualitätskontrolle (letzte Arbeitsstation der Fertigungslinie) zu Ausschuss oder Nacharbeit deklariert werden.

¹³³ Z.B. Ein- und Auslagern, Reinigen von Behältern

¹³⁴ Dieser ist Sortenrein, beinhaltet also nur eine Variante

¹³⁵ Wie beispielsweise eine Gitterbox auf der Gabel eines Staplers

$$AGTV_L = \left\lceil \frac{x_{L,I}}{x_{T,I}} \right\rceil \quad (5-53)$$

Weiterhin wird eine identische Transportlosgröße für das Rohmaterial und die Halbfertigteile angenommen.

Erfolgt eine Reduktion der Losgröße, sinkt zunächst die Auslastung des Transportmittels bei einer konstanten Anzahl erforderlicher Transportvorgänge. In diesem Fall werden beispielsweise nur partiell gefüllte Gitterboxen transportiert. Bei einer weiteren Verringerung der Produktionslosgröße über die Transportlosgröße, springen die Anzahl der erforderlichen Transportvorgänge auf eine niedrigere Stufe. Diese verhalten sich damit sprunghaft in Abhängigkeit der Losgröße, wie nachfolgender Abbildung zu entnehmen ist:

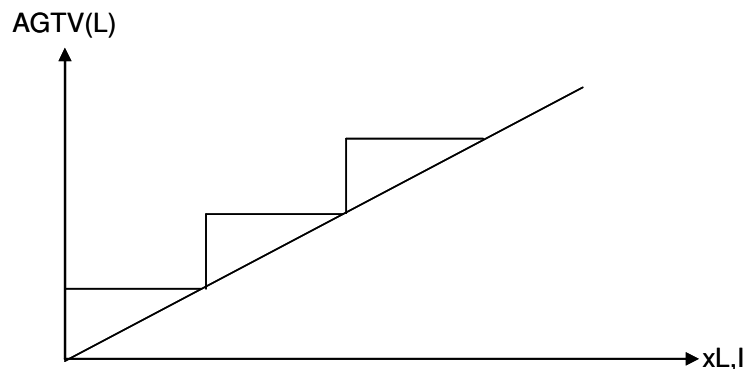


Abbildung 5.16: Sprungfixe Funktion der Transportvorgänge je Produktionslos in Abhängigkeit der durchschnittlichen Losgröße

Analog kann diese Argumentation für das Ansteigen der Losgröße transferiert werden.

Mathematisch formuliert ist eine Funktion $f : X \rightarrow Y$ auf einem Intervall $X \in \mathfrak{R}$ sprunghaft, wenn es disjunkte Intervalle X_1, \dots, X_n gibt, so dass

$$X = \bigcup_{i=1}^n X_i \quad (5-54)$$

und f auf den Intervallen konstant ist.

Die Bezugsgröße der Transportkosten ist damit die Zeit der Inanspruchnahme des für den Transportvorgang erforderlichen Personals und der Betriebsmittel¹³⁶ [Koeh88, S.62]. Unter der Annahme, dass diese Personal- und Betriebsmittelkosten ausschließlich variabel¹³⁷ sind, resultiert folgende Stückkostenfunktion für den Transport:

$$\min c_{Transport,I,WS} = \frac{1}{x_{L,I}} * \left\lceil \frac{x_{L,I}}{x_{T,I}} \right\rceil * (TZ_i + TZ_{Lager}) * (f_{BeMi} + f_{Per}) \quad (5-55)$$

¹³⁶ Z.B. Gabelstapler, Ladungsträger, Verpackungsmaterial

¹³⁷ D.h. nur bei einer tatsächlichen Inanspruchnahme des Transportpersonals sowie der Betriebsmittel, wie beispielsweise bei Fremdvergabe an einen externen Dienstleister, resultieren die entsprechenden Kostenfaktoren.

Mit

$C_{Transport,I,WS}$	Transportkosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells
$x_{T,I}$	durchschnittliche Transportlosgröße im Intervall; primäre Entscheidungsvariable, welche analog zur durchschnittlichen Losgröße der Produktion als Aggregationsgröße entsprechend der Zielfunktion zu dimensionieren ist
$AGTV_L$	Anzahl der geplanten Transportvorgänge während der Fertigung eines Los; sekundäre Entscheidungsvariable
$AGTV_L = \left\lceil \frac{x_{L,I}}{x_{T,I}} \right\rceil$	(5-56)
TZ_i	Transportzeit vom Lager zur Fertigungslinie je Transportvorgang, unabhängig von der Variante; primäre Entscheidungsvariable
TZ_{Lager}	Transportzeit von der Fertigungslinie zum Lager je Transportvorgang, unabhängig von der Variante; primäre Entscheidungsvariable
f_{BeMi}	konstanter Betriebsmittelkostensatz in €/h
f_{Per}	konstanter Personalkostensatz in €/h, welcher additiv mit obigem Betriebsmittelkostensatz in dem Transportkostensatz resultiert

Grafisch dargestellt, resultiert ein hyperbelähnlicher, degressiver Verlauf, welcher spungfixe Stellen aufweist. Mit zunehmender Losgröße nehmen diese in ihrer Ausprägung ab.

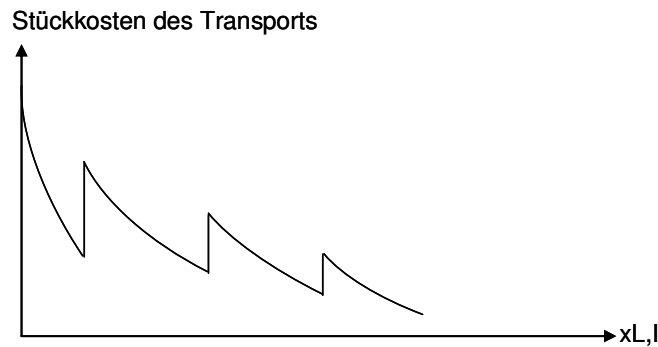


Abbildung 5.17: Verlauf der Stückkostenfunktion für den Transport in Abhängigkeit der Losgröße

Weiterhin nehmen bei einer Erhöhung eines Transportloses¹³⁸ die Anzahl der erforderlichen Transportvorgänge ab, was wiederum in reduzierten Stückkosten mündet. Die Stellhebel zur Minimierung der Stückkosten liegen folglich sowohl in einer Produktionslosgrößen- als auch in einer Transportlosgrößenvariation. Weitere Entscheidungsvariablen finden sich in der nachfolgenden Auflistung.

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Minimierung obiger Kostenfunktion, die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$$x_{L,I} \uparrow$$

$$\left[\frac{x_{L,I}}{x_{T,I}} \right] \downarrow \text{ und damit}$$

$$AGTV_L \downarrow$$

$$x_{L,I} \downarrow$$

$$x_{T,I} \uparrow$$

$$TZ_{Lager} \downarrow$$

$$TZ_i \downarrow$$

5.3.1.6 Folgekosten des Transports

Folgekosten des Transports resultieren aus Transportschäden an den Werkstücken und führen erneut zu entsprechenden Kosten der Nacharbeit/Ausschuss. Analog zur Argumentation der Folgekosten des Bestands, ist auch in diesem Kontext ein prozentualer Faktor zugrunde zu legen. Damit ergibt sich die Stückkostenfunktion der Folgekosten des Transports mit:

$$\min c_{\text{FolgeTransport},I,WS} = f_2 * c_{\text{Transport},I,WS} \quad (5-57)$$

Mit

$$0 \leq f_2 \leq 1$$

aus Studien/Empirie ermittelter Faktor

Die primären und sekundären Entscheidungsvariablen verhalten sich damit analog zu den im Kapitel der Transportkosten.

¹³⁸ D.h. die maximale Transportmenge je Transportvorgang, beispielsweise aufgrund einer Behältervergrößerung.

5.3.1.7 Instandhaltungskosten

Instandhaltungskosten fallen sowohl prinzipiell als auch zusätzlich im Zuge der Variantenvielfalt an. Da sich die Definition und Berechnung der Instandhaltungskosten im allgemeingültigen und variantenabhängigen Fall der Sonderbetriebsmittel nicht unterscheiden, beide Faktoren dennoch für den Kontext der Arbeit von Relevanz sind, werden im weiteren Verlauf die Instandhaltungskosten allgemeingültig betrachtet. Darin sollen alle Faktoren adäquat Berücksichtigung finden. Weiterhin ist von einer voll verketteten Anlage auszugehen, d.h. die Störung an einer Station kann nicht durch Puffer kompensiert werden und ist daher anteilig für jedes Werkstück zu berechnen.

Zunächst erscheint eine Klassifikation der unterschiedlichen Instandhaltungsmaßnahmen sinnvoll. Entweder erfolgt diese nach einer bestimmten Serviceintervallzeit¹³⁹ oder als Reaktion auf im Betrieb auftretende Störungen. Erst genannte ist damit geplant, letzter genannte entsprechend ungeplant. Für die intervallmäßige Instandhaltung¹⁴⁰ sind die Anzahl der geplanten Instandhaltungsvorgänge im Intervall sowie die Instandhaltungszeit je Vorgang kritische Erfolgsfaktoren. Die Anzahl der geplanten Instandhaltungen im Betrachtungszeitraum ergeben sich nach [Helm11, S.16] durch die Division der Zeit zwischen zwei Instandhaltungsvorgängen, dem sogenannten Instandhaltungsintervall (ISI), und dem zur Verfügung stehenden Betrachtungszeitraum:

$$AGIV_I = \frac{BPZ_I}{ISI} \quad (5-58)$$

Unter der Annahme, dass die geplanten Instandhaltungsmaßnahmen durch die Instandhaltung selbst oder einen externen Dienstleister ausgeführt werden, resultiert eine variable Kostenfunktion für geplante Instandhaltungen je Werkstück im Betrachtungsintervall in Abhängigkeit der Inanspruchnahme des IS-Personals und der –Betriebsmittel:

$$K_1 = \frac{AGIV_I * ISZ_V * f_{IS-Kostensatz}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-59)$$

Mit

ISZ_V Instandhaltungszeit je geplanter Instandhaltungsvorgang; primäre Entscheidungsvariable, welche vereinfachend als statische Größe angenommen wird

$f_{IS-Kostensatz=Per+BeMi}$ konstanter IS-Kostensatz in €/h, welcher aus der Addition der Personal- und Betriebsmittelkostensätze der Instandhaltung resultiert

Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Intervalle zwischen den Instandhaltungen identisch sind und auch die hierfür erforderliche Zeit je Instandhaltungsvorgang konstant ist. Erhöht sich das Instandhaltungsintervall eines Betriebsmittels¹⁴¹, wird die Anzahl der geplanten Instandhaltungen minimiert und damit auch K_1 .

Für die Berechnung der Instandhaltungskosten in Abhängigkeit ungeplanter Störungen, ist zunächst eine weitere Differenzierung vorzunehmen in:

¹³⁹ Alternativ kann dieses Intervall nach einer zuvor definierten Produktionsmenge erfolgen

¹⁴⁰ Wie beispielsweise GAB (=ganzheitliche Anlagenbetreuung)

¹⁴¹ Durch eine entsprechende Optimierung hinsichtlich Material etc.

- Störungen, welche durch den Maschinenbediener behoben werden können. Diese umfassen primär den Austausch von Werkzeugen aufgrund des Bruchs oder Verschleiß dieser.
- Störungen, welche ausschließlich durch Schlosser, Elektriker etc. behoben werden können und damit einer externen Kostenstelle zuzuordnen sind.

Aufgrund der dadurch resultierenden Komplexität, werden diese Instandhaltungsaufwendungen vereinfacht in die variablen Maschinenkosten inkludiert (siehe Kapitel 5.3.1.11).

Bei allen Störungen, unabhängig von deren Klassifikation, sind jedoch erneut Opportunitäten in die Kostenfunktion zu integrieren, welche aufgrund der verloren gegangenen Produktionszeit während der Störzeiten entstehen.

Mathematisch formalisiert ergeben sich diese im gesamten Intervall zu:

$$K_2 = \frac{\frac{\sum_I SZ}{I} * f_{\text{Gewinn}}}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} (ZZ_{\text{max},i,WS} + RZ_{WS})} \tag{5-60}$$

Die gesamten Instandhaltungskosten je Werkstück im Betrachtungszeitraum sind folglich zu addieren und ergeben sich durch:

$$\min c_{IS-Kosten,I,WS} = K_1 + K_2 \tag{5-61}$$

$$\min c_{IS-Kosten,I,WS} = \frac{\frac{\sum_I SZ}{I} * f_{\text{Gewinn}}}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} (ZZ_{\text{max},i,WS} + RZ_{WS})} + \frac{AGIV_I * ISZ_V * f_{IS-Kostensatz}}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I}} \tag{5-62}$$

Mit

$c_{IS-Kosten,I,WS}$

Instandhaltungskosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Minimierung obiger Kostenfunktion, die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$$\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} \uparrow$$

$$\sum_I SZ \downarrow$$

$$ZZ_{\text{max},i,WS} \uparrow \text{ und damit}$$

$$NBZ_{i,Var} \uparrow$$

$RZ_{WS} \uparrow$ und damit

$RZ_I \uparrow$

$x_{L,I} \downarrow$

$AGIV_I \downarrow$

$ISZ_v \downarrow$

Abschließend ist der Verfasserin noch folgende Anmerkung wichtig: Durch eine Losgrößenreduktion sowie eine damit verbundene Erhöhung der Anzahl an Rüstvorgängen, werden die Standzeiten der Werkzeuge reduziert. Damit treten die Ermüdungserscheinungen, welche zum Bruch/Verschleiß der Werkzeuge führen, verfrüht auf und erhöhen die variablen Maschinenkosten. Da dieser Sachverhalt jedoch empirisch nachgewiesen werden müsste, werden diese Kosten der Losgrößenreduktion ausschließlich qualitativ genannt.

5.3.1.8 Kosten durch Ausschuss und Nacharbeit

Für die Nacharbeit entstehen zusätzliche Kosten in der Fertigungs- oder einer Hilfskostenstelle. Die relevanten Kosten im Kontext des Ausschuss umfassen zusätzliche Entsorgungs- oder Verschrottungskosten. Bezugsgröße im ersten Fall ist damit die Fertigungszeit, welche analog zur Rüstzeit mit entsprechenden Auftrags- und Belegungskosten bewertet wird. Für den zweiten Fall ist als Bezugsgröße der Materialwert zu bestimmen sowie die bis zur entsprechenden Fertigungsstufe getätigte Wertschöpfung [Koeh88, S.57].

Vereinfachend werden diese Kosten in der vorliegenden Arbeit in die fixen und variablen Sachgemeinkosten und damit in die Maschinenkosten (siehe Kapitel 5.3.1.10 und 5.3.1.11) integriert.

5.3.1.9 Variabilitätskosten

Auf Basis der in Kapitel 5.1.3 definierten Stabilitäten, soll an dieser Stelle die dazugehörige Kostenfunktion bei entsprechender Nicht-Erfüllung definiert werden. Der Fokus liegt dabei auf der stationären Variabilität. Konkret handelt es sich um Opportunitätskosten aufgrund von Maschinenwartezeiten¹⁴², welche bei Abweichung der Zykluszeiten zwischen den Stationen einer Fertigungslinie resultieren.

Aus Werkstückperspektive definiert sich die Wartezeit vor einer Station innerhalb der Fertigungslinie mit:

$$WZ_{i+1,Var} = ZZ_{\max,i,Var} - ZZ_{i,Var} \quad (5-63)$$

Unter der Annahme eines voll verketteten Systems, erfolgt die Weitergabe eines Werkstücks zur nachfolgenden Station erst nach Abschluss der Bearbeitung an der sogenannten Engpassstation mit $ZZ_{\max,i,Var}$ und damit synchron. Damit wartet jede singuläre Bearbeitungsstation $i = 1, \dots, n$ unter Berücksichtigung der Transportzeit gemäß der folgenden Formel:

$$WZ_i = ZZ_{\max,i,Var} - ZZ_{i,Var} + TZ_{i,WS} \quad (5-64)$$

Während des Transportvorgangs eines Werkstücks zur Station entstehen also zusätzliche Wartezeiten für diese Station.

Bei vollständiger Eliminierung obiger Variabilität entspricht die Zykluszeit an allen Stationen für alle Varianten der Zykluszeit $ZZ_{\min,i,Var}$, unter der Annahme, dass die bestehenden Zykluszeiten

¹⁴² Und damit reduzierte Auslastung bzw. Leerlauf

minimiert werden. Die Nicht-Erfüllung dieses Sachverhalts führt zu Stückzahlverlusten aufgrund von Maschinenwartezeiten, welche anhand von Opportunitätskosten monetär zu quantifizieren sind. Wird als Opportunität die maximale Maschinenwartezeit in Höhe von $WZ_{i,Var} = ZZ_{max,i,Var} - ZZ_{min,i,Var}$ zugrunde gelegt, resultiert unten stehende Formel:

$$\min c_{\text{Variabilität},I,WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{max,i,Var} - ZZ_{min,i,Var}}{(ZZ_{max,i,WS} + RZ_{WS} + SZ_{WS})} * f_{\text{Gewinn}} \quad (5-65)$$

Mit

$c_{\text{Variabilität},I,WS}$

Variabilitätskosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells

$$\frac{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{max,i,Var} - ZZ_{min,i,Var}}{Var}$$

durchschnittliche Variabilität über alle Varianten im Intervall pro Werkstück; entspricht der verloren gegangenen Zeit je Werkstück aufgrund der Zykluszeitabweichungen

$WZ_{i,Var}$

maximale Maschinenwartezeit an einer Station der Fertigungslinie für eine Variante bei Vernachlässigung der Wartezeit während des Werkstücktransports zur Station¹⁴³; Basis für die Quantifizierung der Opportunitätskosten und damit sekundäre Entscheidungsvariable

$$WZ_{i,Var} = ZZ_{max,i,Var} - ZZ_{min,i,Var} \quad (5-66)$$

$ZZ_{max,i,Var}$

maximale Zykluszeit über alle Stationen für eine Variante; sekundäre Entscheidungsvariable

$ZZ_{min,i,Var}$

minimale Zykluszeit über alle Stationen für eine Variante; sekundäre Entscheidungsvariable

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Minimierung obiger Kostenfunktion, die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$WZ_{i,Var} \downarrow$ und damit

¹⁴³ Diese Komponente kann gemäß der in Kapitel 5.4.3 getroffenen Annahmen nicht minimiert werden.

$ZZ_{\max,i,Var} \downarrow$ und damit

$NBZ_{i,Var} \downarrow$

$ZZ_{\max,i,WS} \uparrow$ und damit

$NBZ_{i,Var} \uparrow$

$SZ_{WS} \uparrow$ und damit

$\sum_I SZ \uparrow$

$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \downarrow$

$RZ_{WS} \uparrow$

$RZ_I \uparrow$

$x_{L,I} \downarrow$

5.3.1.10 fixe Maschinenkosten

Fixe Maschinenkosten inkludieren alle Kostenfaktoren, welche unabhängig vom Nutzungs-/Auslastungsgrad der Fertigungslinie anfallen. Dazu gehören Flächen-/Raumkosten, fixe Energiekosten, Abschreibungen¹⁴⁴, fixe Sachgemeinkosten sowie fixe Personalkosten.

Mathematisch formalisiert, bedeutet dies für die Stückkostenfunktion der fixen Maschinenkosten:

$$\min c_{fixMaschine,I,WS} = \frac{f_{Maschine,fix,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad (5-67)$$

Mit

$c_{fixMaschine,I,WS}$

anteilige Maschinenkosten im Intervall je Werkstück;
entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion
des Optimierungsmodells

$f_{Maschine,fix,I}$

fixe Maschinenkosten im Intervall gemäß obiger
Faktoren

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Minimierung obiger Kostenfunktion, die Dimensionierung der primären und Entscheidungsvariablen wie folgt:

$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \uparrow$

Diese Erkenntnis findet sich häufig in der Massenproduktion wieder. Auf Basis von Stückzahlsteigerungen werden hohe Investitionen den Werkstücken anteilig zugerechnet, mit dem Ziel der Minimierung der Herstellkosten dieser¹⁴⁵.

¹⁴⁴ Linear und auf Basis der getätigten Investitionen inklusive Kaufpreis, Installation, Einrichtungskosten, Programmierkosten sowie weiteren Integrationskosten zu berechnen.

5.3.1.11 variable Maschinenkosten

Variable Maschinenkosten entsprechen hingegen sogenannten Prozesskosten, welche ausschließlich in Abhängigkeit der Betriebsdauer/gefertigten Stückzahl anfallen. Zu nennen sind an dieser Stelle variable Energiekosten¹⁴⁶, variable Sachgemeinkosten, dazu gehören beispielsweise Werkzeugverschleißkosten, variable Instandhaltungskosten sowie variable Personalkosten¹⁴⁷. Damit muss für die Stückkostenfunktion dieser Kostenparameter nicht mehr anteilig auf die Produktionsmenge berechnet werden, sondern kann als konstanter Faktor je Werkstück in das Modell integriert werden:

$$\min c_{\text{var Maschine},I,WS} = f_{\text{Maschine,var},I,WS} \quad (5-68)$$

5.3.1.12 Produktionsmengenkosten

In Ergänzung zu den bis dato erläuterten Kostenparametern, sind diejenigen Kostenfaktoren in das Modell zu integrieren, welche in Abhängigkeit der kumulierten Produktionsmenge über alle Varianten sowie des Kundenbedarfs anfallen.

Das Ziel besteht in der exakten Erfüllung der Kundenbedarfsmenge. Mathematisch formuliert bedeutet dies:

$$\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} = \sum_{\text{Var}=A}^Z KB_{\text{Var},I} \quad (5-69)$$

Damit sind Abweichungen, sowohl positiver als auch negativer Art, zu minimieren. Konkret handelt es sich um Kosten der Über- und Unterproduktion. In Abhängigkeit der quantifizierten Abweichung im Betrachtungsintervall, resultiert eine abschnittsweise definierte Funktion folgender Gestalt:

$$\min c_{\text{Pr odmenge},I,WS} = \left\{ \begin{array}{l} c_{\text{Fremdbezug},I,WS} ; \sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} < \sum_{\text{Var}=A}^Z KB_{\text{Var},I} \\ 0 ; \sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} = \sum_{\text{Var}=A}^Z KB_{\text{Var},I} \\ c_{\text{Überprod},I,WS} ; \sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} > \sum_{\text{Var}=A}^Z KB_{\text{Var},I} \end{array} \right\} \quad (5-70)$$

Mit

$c_{\text{Pr odmenge},I,WS}$

anteilige Produktionsmengenkosten im Intervall je Werkstück; abschnittsweise definiert; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells

¹⁴⁵ Siehe auch Skaleneffekte

¹⁴⁶ Z.B. für Strom, Kühl-/Schmiermittel, Druckluft

¹⁴⁷ Da durch Tarifverträge der größte Anteil des Personals der Stammebelegschaft zuzuordnen ist, kann nur ein kleiner Prozentsatz entsprechend des tatsächlichen Bedarfs variabel eingesetzt werden. Somit ist die absolute Mehrheit der Personalkosten auch den fixen Maschinenkosten anteilig zuzuordnen.

Unter der Annahme linearer Kostenfunktionen, ergibt sich die grafische Funktionsdarstellung der Produktionsmengenkosten im Betrachtungsintervall pro Werkstück gemäß unten stehender Abbildung:

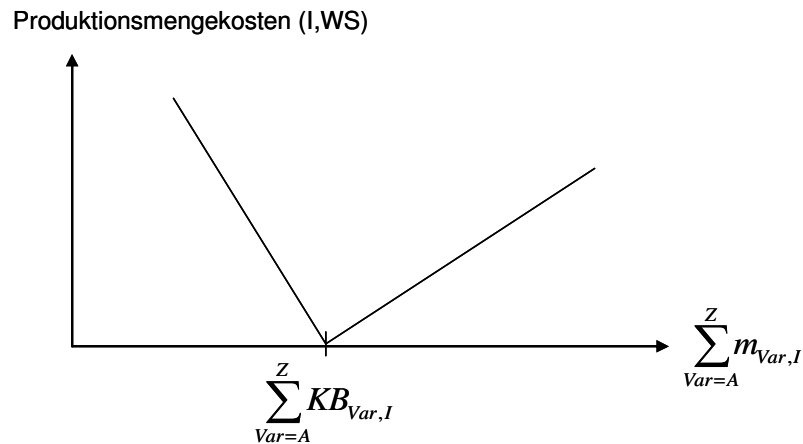


Abbildung 5.18: Verlauf der Kostenfunktion in Abhängigkeit der Abweichung der Produktionsmenge vom Kundenbedarf

Übersteigt die Produktionsmenge der Fertigungslinie den Kundenbedarf im Betrachtungsintervall, wird von der Produktion auf Lager gesprochen. Die Weiterverarbeitung der Werkstücke erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt, weshalb die temporäre Lagerung der produzierten Werkstücke erforderlich ist. Die dadurch entstehenden Kosten sind anhand des Aufwands für die zusätzliche Lagerhaltung und damit anhand von Bestandskosten zu quantifizieren. Es werden für die Ableitung der Stückkostenfunktion ausschließlich variable Kostenfaktoren angenommen.

Die Kosten der Überproduktion je Werkstück ergeben sich folglich additiv aus den Opportunitätskosten durch das gebundene Kapital und den variablen Lagerhaltungskosten¹⁴⁸:

$$\begin{aligned} \min c_{\text{Überprod., I, WS}} &= \frac{1}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} * \left(\left(\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \right) * (f_{\text{Materialwert}} + f_{\text{HK}}) * f_{\text{kalk. Zins}} \right. \\ &\quad \left. + \left(\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \right) * f_{\text{Lagerkosten, var}} \right) \end{aligned} \quad (5-71)$$

Mit

$c_{\text{Überprod., I, WS}}$

Kosten der Überproduktion im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells

$$\left(\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \right)$$

positive Abweichung der Produktionsmenge vom Kundenbedarf; Anzahl der Werkstücke, welche überproduziert werden und für welche im Betrachtungsintervall kein Kundenbedarf besteht

¹⁴⁸ Für Lagerplätze und Lagerfläche

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} = \frac{NPZ_I}{Takt_{Plan,WS}} \tag{5-72}$$

$Takt_{Plan,WS}$ geplanter Takt, d.h. zu realisierender
Produktionsrhythmus; sekundäre
Entscheidungsvariable

$$Takt_{Plan,WS} = ZZ_{max,i,WS} + RZ_{WS} + SZ_{WS} \tag{5-73}$$

NPZ_I Nettoproduktionszeit im Intervall, z.B. 1 Schicht
abzüglich der Pausen, Wartung und Instandhaltung;
sekundäre Entscheidungsvariable

$$NPZ_I = AS_I * (BPZ_{SH} - PWI_{SH}) \tag{5-74}$$

AS_I Anzahl der Schichten im Intervall; primäre
Entscheidungsvariable

BPZ_{SH} Bruttoproduktionszeit pro Schicht – kleinstes
Betrachtungsintervall und fixe Eingangsgröße

PWI_{SH} Zeit für geplante Pausen, Wartung und Instandhaltung
je Schicht; primäre Entscheidungsvariable

$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} > \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}$ zu gewährleistende Prämisse im Betrachtungsintervall;
Gültigkeitsbereich der zuvor definierten Funktion

Bzgl. der Erläuterung der weiteren Funktionskomponenten wird auf die voran gegangenen Kapitel verwiesen, in welchen eine detaillierte Erläuterung dieser erfolgte.

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Minimierung obiger Kostenfunktion, die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \uparrow$$

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \downarrow$$

$$Takt_{Plan,WS} \uparrow$$

$$ZZ_{max,i,WS} \uparrow \text{ und damit}$$

$$NBZ_{i,Var} \uparrow$$

$RZ_{WS} \uparrow$ und damit

$RZ_I \uparrow$

$x_{L,I} \downarrow$

$SZ_{WS} \uparrow$ und damit

$\sum SZ_I \uparrow$

$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \downarrow$

$NPZ_I \downarrow$ und damit

$AS_I \downarrow$

$PWI_{SH} \uparrow$

Die Dimensionierung obiger Entscheidungsvariablen korreliert mit den intuitiv ableitbaren Handlungsoptionen der Produktionsmengenreduktion:

- Reduktion der Betriebszeit, insbesondere weniger teure Sonderschichten
- Verwendung der zur Verfügung stehenden Betriebszeit für häufigeres Rüsten, reduzierten Losgrößen und damit zur Erzielung einer erhöhten Variantenflexibilität

Unter der Annahme, dass die prinzipielle Erfüllung des Kundenbedarfs gewährleistet sein muss und die Produktionsmenge der Fertigungslinie den Kundenbedarf unterschreitet, ist die Bedienung dessen durch Fremdbezug zu gewährleisten. Dabei werden die Rohlinge des internen Lieferanten zur spanenden Bearbeitung an einen externen Marktteilnehmer gegeben. Die in diesem Kontext anfallenden Fremdbezugskosten werden der Fertigungskostenstelle zugerechnet und belasten alle produzierten Werkstücke mit erhöhten variablen Kosten gemäß folgender Formel:

$$\min c_{Fremdbezug,I,WS} = \frac{1}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} * \left(\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} - \sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \right) * f_{Fremdbezug,WS} \quad (5-75)$$

Mit

$c_{Fremdbezug,I,WS}$

Kosten des Fremdbezugs im Intervall pro Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells

$$\left(\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} - \sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \right)$$

negative Abweichung der Produktionsmenge vom Kundenbedarf; Anzahl der Werkstücke, welche nicht entsprechend des Bedarfs produziert werden und daher extern zu beziehen sind

$f_{\text{Fremdbezug,WS}}$

Fremdbezugskostensatz in € pro Werkstück; werden unabhängig von der Bezugsmenge vereinfachend als konstant angenommen und repräsentieren damit eine konstante Eingangsgröße des Modells

 $f_{\text{Fremdbezug,WS}} > f_{\text{HK}}$

Prämisse: Fremdbezugskosten übersteigen die Herstellkosten pro Werkstück um ein Vielfaches

Bzgl. der Erläuterung der weiteren Funktionskomponenten wird aufgrund der entsprechenden Schnittmenge auf die voran gegangene Kostenfunktion verwiesen.

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Minimierung obiger Kostenfunktion, die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$$\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} \uparrow$$

$$Takt_{\text{Plan,WS}} \downarrow$$

$$ZZ_{\text{max},i,WS} \downarrow \text{ und damit}$$

$$NBZ_{i,Var} \downarrow$$

$$RZ_{\text{WS}} \downarrow \text{ und damit}$$

$$RZ_I \downarrow$$

$$x_{L,I} \uparrow$$

$$SZ_{\text{WS}} \downarrow \text{ und damit}$$

$$\sum SZ_I \downarrow$$

$$\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} \uparrow$$

$$NPZ_I \uparrow \text{ und damit}$$

$$AS_I \uparrow$$

$$PWI_{SH} \downarrow$$

5.3.1.13 Variable Kosten der Organisation

Wie in Kapitel 5.3.1.12 erläutert, ist die Betriebszeit ein wesentlicher Stellhebel für die Variation der Ausbringungsmenge. Werden zusätzliche Schichten am Wochenende und an Feiertagen benötigt, sind den Personalkosten sogenannte Zuschlagssätze hinzuzufügen, welche sich in den variablen Kosten der Organisation wieder finden. Fallspezifisch ist daher eine Kostenfunktion abzuleiten und in die Gesamtfunktion zu integrieren, welche diesen Sachverhalt quantifiziert.

Unter der Annahme, dass an einem Tag in maximal drei Schichten zu je acht Stunden produziert werden kann, sind nachfolgender Tabelle für das Jahr 2010 die Anzahl der Arbeitstage und Schichten, klassifiziert, zu entnehmen:

Tabelle 5.5: Anzahl der Arbeitstage und damit Schichten, rückblickend für das Jahr 2010

# Arbeitstage (Mo-Fr)	253	= 759 Schichten
# Arbeitstage (Sa-So)	104	= 312 Schichten
# Feiertage	8	= 24 Schichten
SUMME	365	1.095

Wird an der Fertigungslinie in weniger als 760 Schichten im Betrachtungsintervall¹⁴⁹ produziert, fallen keine Zuschlagsätze an. Für $759 < AS_I \leq 1.095$ sind die Zuschläge pro Schicht anteilig der gesamten Produktionsmenge zuzurechnen¹⁵⁰ und erhöhen damit die anteiligen Herstellkosten.

Mathematisch resultiert damit erneut eine abschnittsweise definiert Funktion mit folgendem Verlauf:

$$\min c_{\text{var Orga}, I, WS} = \left\{ \begin{array}{l} 0; AS_I \leq 759 \\ \frac{AS_I * f_{\text{Zuschläge}}}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var}, I}}; 759 < AS_I \leq 1.095 \end{array} \right\} \quad (5-76)$$

Mit

$c_{\text{var Orga}, I, WS}$

variable Kosten der Organisation im Intervall pro Werkstück für Sonderschichten; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells

$f_{\text{Zuschläge}}$

Zuschlagskostensatz in € pro Schicht; wird unabhängig von der Sonderschicht¹⁵¹ vereinfachend als konstant angenommen und repräsentiert damit eine konstante Eingangsgröße des Modells

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Minimierung obiger Kostenfunktion, die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$AS_I \downarrow$

$\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var}, I} \uparrow$

5.3.1.14 Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix

Abschließend gibt die Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix einen Überblick über alle definierten Kostenfunktionen, der darin enthaltenen primären und sekundären Entscheidungsvariablen sowie deren Interdependenzen. Diese bildet die Basis des Optimierungsmodells, insbesondere unter Berücksichtigung der konträren Abhängigkeiten für eine optimale Dimensionierung dieser.

¹⁴⁹ Unter der Annahme, dass dieses ein Jahr ist

¹⁵⁰ Vereinfachend wird auch dieser Sachverhalt linearisiert. Tatsächlich belasten obige Zuschläge nur die während der Sonderschichten gefertigten Stückzahlen.

¹⁵¹ Siehe Samstag oder Sonntag, Tag oder Nacht

Tabelle 5.6: Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil eins

Prozessschritt	technische Systemzustände						
	Bearbeiten	Nebenzeiten	Zykluszeit	Zykluszeit Losanlauf	Rüsten		
ggf. Faktor in Lean-Metrik	BAZ(WS)	NBZ(WS)	ZZ(WS)	ZZ(Losanlauf, WS)	RZ(WS)		
Detaillierung	BAZ(i,WS)	NBZ(i,WS)	ZZ(i,WS)	ZZ(i,Losanlauf, WS)		RZ(l)	xL(l)
	BAZ(i,Var)	NBZ(i,Var)	ZZ(i,Var)			RZ(r,l)	x(b,l)
Minimierung Kostenparameter							
Rüstkosten		max	max			min	
Losanlaufkosten		max	max	min			
Bestandskosten							
Folgekosten des Bestands							
Transportkosten							
Folgekosten des Transports							
Instandhaltungskosten		max	max		max	max	min
Variabilitätskosten		min/max	min/max		max	max	min
fixe Maschinenkosten							
variable Maschinenkosten							
Kosten der Überproduktion		max	max		max	max	min
Kosten des Fremdbezugs		min	min		min	min	max
variable Kosten der Organisation							

Legende:

bewirkt Minimierung der Variable: min
 bewirkt Maximierung der Variable: max
 primäre Entscheidungsvariable
 sekundäre Entscheidungsvariable

Tabelle 5.7: Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil zwei

Prozessschritt	Losanlaufzeit		Transportieren	Warten (störungsbedingt)		
	LAZ(WS)		TZ(WS)	SZ(WS)		
ggf. Faktor in Lean-Metrik	LAZ(l)	xL(l)	TZ(i,WS)	SZ(l)		m(Var,l)
Detaillierung			TZ(Lager,WS)		MTR(v)	
Minimierung Kostenparameter						
Rüstkosten				max	max	min
Losanlaufkosten	min/max			max/min	max/min	min/max
Bestandskosten						
Folgekosten des Bestands						
Transportkosten			min			
Folgekosten des Transports			min			
Instandhaltungskosten				min		
Variabilitätskosten				max	max	min
fixe Maschinenkosten						
variable Maschinenkosten						
Kosten der Überproduktion				max	max	min
Kosten des Fremdbezugs				min	min	max
variable Kosten der Organisation						

Tabelle 5.8: Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil drei

Prozessschritt	organisatorische Systemzustände						
	Warten (ablaufbedingt)	Lagern	Anzahl Rüstvorgänge (l)	Anzahl Transportvorgänge(L)	Anzahl IS-Vorgänge (l)	IS-Zeit(v)	Losgröße
ggf. Faktor in Lean-Metrik	WZ(WS)	PZ(WS)	AGRv(l)	AGTV(L)	AGV(l)	ISZ(v)	xL(l)
Detaillierung	WZ(i,WS)	PZ(Lag,WS)					x(b,l)
	WZ(i,Var)	PZ(Lag,Var)					
Minimierung Kostenparameter							
Rüstkosten			min				max
Losanlaufkosten							max
Bestandskosten		min					min
Folgekosten des Bestands		min					min
Transportkosten				min			max/min
Folgekosten des Transports				min			max/min
Instandhaltungskosten					min	min	
Variabilitätskosten	min						
fixe Maschinenkosten							
variable Maschinenkosten							
Kosten der Überproduktion							
Kosten des Fremdbezugs							
variable Kosten der Organisation							

Tabelle 5.9: Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil vier

Prozessschritt	Transport- losgröße	Produktions- menge	BPZ(I)		NPZ(I)		PW(I)	
			BPZ(SH)	AS(I)	NPZ(SH)	AS(I)	PW(SH)	AS(I)
ggf. Faktor in Lean-Metrik	xT(I)	m(Var.,I)						
Detaillierung								
Minimierung Kostenparameter								
Rüstkosten								
Losanlaufkosten								
Bestandskosten		max						
Folgekosten des Bestands		max						
Transportkosten	max							
Folgekosten des Transports	max							
Instandhaltungskosten		max						
Variabilitätskosten								
fixe Maschinenkosten		max						
variable Maschinenkosten								
Kosten der Überproduktion		max/min			min	min	max	
Kosten des Fremdbezugs		max			max	max	min	
variable Kosten der Organisation		max				min		

5.3.2 Abbildung der Lean-Metriken auf die Kostenparameter

Damit die Gestaltung des Fertigungssystems nach den Prinzipien der schlanken Produktion erfolgt, sind die Ausprägungen der technologischen und organisatorischen Systemparameter zu optimieren. Die Gestaltung *nach lean* erfolgt damit *anhand* obiger Systemparameter, welche wiederum den operationalisierten lean Prinzipien entsprechen. Wie bereits in Kapitel zwei erläutert, ist ein verschwendungsarmes, flexibles und stabiles Fertigungssystem identisch zu minimalen operativen Kosten, welche es während des Betriebs verursacht. Der Beweis hierfür wird nachfolgend erbracht.

Die top-down Ableitung der relevanten Kostenparameter erfolgte auf Basis der identifizierten technologischen und organisatorischen Systemparameter (entsprechen der operativen Ebene der Lean-Metriken) sowie deren monetäre Gewichtung anhand der Kostenfaktoren Mensch, Maschine und Material. Die *Minimierung der jeweiligen Kosten* impliziert die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen gemäß der Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix (siehe Kapitel 5.3.1.14). Die *maximierte Erfüllung der Prinzipien der schlanken Produktion* bedingt hingegen eine Maximierung der singulären Lean-Metriken und impliziert eine erneute Dimensionierung der Entscheidungsvariablen. So führt beispielsweise die Maximierung der Lean-Metrik Fluss zu einer Minimierung der anteiligen Rüstzeiten pro Werkstück. Eine analoge Dimensionierung des technologischen Systemparameters findet sich in der Minimierung der Rüst- und Fremdbezugskosten. Die Optimierung der Lean-Metrik Fluss ist folglich anhand von reduzierten Rüst- und Fremdbezugskosten abbildbar. Nur wenn alle Lean-Metriken anhand der abgeleiteten Kostenparameter abgebildet werden können, ist das Kostenmodell eine legitime Vorgehensweise zur Gestaltung eines Fertigungssystems nach den Prinzipien der schlanken Produktion. Vor diesem Hintergrund ist die sogenannte Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix im ersten Schritt abzuleiten. Daraus sind anschließend die beiden Matrizen¹⁵² zu fusionieren und die Vollständigkeit der Abbildung der Lean-Metriken auf die Kostenparameter zu überprüfen.

5.3.2.1 Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix

Für die Ableitung der Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix werden zunächst die singulären Lean-Metriken maximiert.

5.3.2.1.1 Fluss

Für die Lean-Metrik Fluss wurde in Kapitel 5.1.1.1 die nachfolgende Bewertungsgröße abgeleitet:

¹⁵² Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix sowie Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix

$$Flussfaktor_{WS} = \frac{\sum_{i=1}^n BAZ_{i,WS}}{DLZ_{WS}} * 100 = \frac{\sum_{i=1}^n BAZ_{i,WS}}{\sum_{i=1}^n ZZ_{i,WS} + RZ_{WS} + TZ_{WS} + KZ_{WS} + LZ_{WS}} * 100 \quad (5-77)$$

Mathematisch, objektiv betrachtet impliziert die Maximierung des Flussfaktors, die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$ZZ_{i,WS} \downarrow$ und damit

$NBZ_{i,WS} \downarrow$ und damit

$NBZ_{i,Var} \downarrow$

$RZ_{WS} \downarrow$ und damit

$RZ_I \downarrow$

$x_{L,I} \uparrow$

$TZ_{WS} \downarrow$ und damit

$TZ_{i,WS} \downarrow$

$TZ_{Ende,WS} \downarrow$

$LZ_{WS} \downarrow$ und damit

$SZ_{WS} \downarrow$ und damit

$\sum_I SZ \downarrow$

$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \uparrow$

$WZ_{i,WS} \downarrow$ und damit

$WZ_{i,Var} \downarrow$

$PZ_{WE,WS} \downarrow$

$PZ_{WA,WS} \downarrow$

5.3.2.1.2 Takt

Analoge Überlegungen resultieren für die Maximierung der Lean-Metrik Takt in folgenden Ergebnissen:

$$Takt_{WS} = \left(1 - \frac{|Takt_{Kunde,WS} - Takt_{Plan,WS}|}{Takt_{Kunde,WS}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{\left| \frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} - (ZZ_{max,i,WS} + RZ_{WS} + SZ_{WS}) \right|}{\frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}}}\right) * 100$$

(5-78)

Mit

$$\frac{\left| \frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} - (ZZ_{max,i,WS} + RZ_{WS} + SZ_{WS}) \right|}{\frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}}}$$

Aufgrund der Betragsfunktion in obiger Metrik, ist eine Fallunterscheidung für die Dimensionierung der Entscheidungsvariablen vorzunehmen:

$$1. \text{ Fall: } \frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \geq (ZZ_{max,i,WS} + RZ_{WS} + SZ_{WS}) \quad (5-79)$$

$$\frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \downarrow \text{ und damit}$$

$$NPZ_I \downarrow \text{ und damit}$$

$$AS_I \downarrow$$

$$PWI_{SH} \uparrow$$

$$ZZ_{max,i,WS} \uparrow \text{ und damit}$$

$$NBZ_{i,Var} \uparrow$$

$$RZ_{WS} \uparrow \text{ und damit}$$

$$RZ_I \uparrow$$

$$x_{L,I} \downarrow$$

$$SZ_{WS} \uparrow \text{ und damit}$$

$$\sum_I SZ \uparrow$$

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \downarrow$$

2. Fall: $\frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \leq (ZZ_{\max,i,WS} + RZ_{WS} + SZ_{WS})$ (5-80)

$$\frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \uparrow \text{ und damit}$$

$$NPZ_I \uparrow \text{ und damit}$$

$$AS_I \uparrow$$

$$PWI_{SH} \downarrow$$

$$ZZ_{\max,i,WS} \downarrow \text{ und damit}$$

$$NBZ_{i,Var} \downarrow$$

$$RZ_{WS} \downarrow \text{ und damit}$$

$$RZ_I \downarrow$$

$$x_{L,I} \uparrow$$

$$SZ_{WS} \downarrow \text{ und damit}$$

$$\sum_I SZ \downarrow$$

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \uparrow$$

Unabhängig von der Ausprägung der Betragsfunktion, folgt für die Dimensionierung des Nenners:

$$\frac{NPZ_I}{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \uparrow \text{ und damit}$$

$$NPZ_I \uparrow \text{ und damit}$$

$$AS_I \uparrow$$

$$PWI_{SH} \downarrow$$

5.3.2.1.3 Volumenflexibilität

Mathematisch objektiv betrachtet impliziert die Maximierung der Volumenflexibilität die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$$Volumenflexibilität_I = \left(1 - \frac{\left| PV_{Plan,I} - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \right|}{PV_{max,I} - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}}\right) * 100 = \left(1 - \frac{\left| \frac{1}{Takt_{Plan,WS}} * NPZ_I - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \right|}{\frac{1}{Takt_{min,WS}} * NPZ_{max,I} - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}}\right) * 100$$

(5-81)

Mit

$$\frac{\left| \frac{1}{Takt_{Plan,WS}} * NPZ_I - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \right|}{\frac{1}{Takt_{min,WS}} * NPZ_{max,I} - \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}} \downarrow$$

Aufgrund der Betragsfunktion in obiger Metrik, ist erneut¹⁵³ eine Fallunterscheidung für die Dimensionierung der Entscheidungsvariablen vorzunehmen:

$$1. \text{ Fall: } \frac{1}{Takt_{Plan,WS}} * NPZ_I \geq \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \quad (5-82)$$

$$\frac{NPZ_I}{Takt_{Plan,WS}} \downarrow \text{ und damit}$$

$$NPZ_I \downarrow \text{ und damit}$$

$$AS_I \downarrow$$

$$PWI_{SH} \uparrow$$

$$ZZ_{max,i,WS} \uparrow \text{ und damit}$$

$$NBZ_{i,Var} \uparrow$$

$$RZ_{WS} \uparrow \text{ und damit}$$

$$RZ_I \uparrow$$

$$x_{L,I} \downarrow$$

$$SZ_{WS} \uparrow \text{ und damit}$$

$$\sum_I SZ \uparrow$$

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \downarrow$$

¹⁵³ Vgl. Maximierung der Lean-Metrik Takt

$$2. \text{ Fall: } \frac{1}{Takt_{Plan,WS}} * NPZ_I \leq \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \quad (5-83)$$

$$\frac{NPZ_I}{Takt_{Plan,WS}} \uparrow \text{ und damit}$$

$$NPZ_I \uparrow \text{ und damit}$$

$$AS_I \uparrow$$

$$PWI_{SH} \downarrow$$

$$ZZ_{max,i,WS} \downarrow \text{ und damit}$$

$$NBZ_{i,Var} \downarrow$$

$$RZ_{WS} \downarrow \text{ und damit}$$

$$RZ_I \downarrow$$

$$x_{L,I} \uparrow$$

$$SZ_{WS} \downarrow \text{ und damit}$$

$$\sum_I SZ \downarrow$$

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \uparrow$$

Damit resultiert die Fallunterscheidung im Kontext der Volumenflexibilität in einer identischen Dimensionierung derselben Entscheidungsvariablen wie bei der Lean-Metrik Takt. Daher sei an dieser Stelle erneut auf die synergetische Korrelation und analoge Aussagekraft (siehe Beweis in Kapitel 5.1.2.1) der beiden Metriken verwiesen. Für die Maximierung der Differenz im Nenner gilt hingegen:

$$\frac{NPZ_{max,I}}{Takt_{min,WS}} \uparrow$$

Wegen $NPZ_{max,I} = konst.$ und $Takt_{min,WS} = konst.$, impliziert dieser Sachverhalt keine Dimensionierung weiterer Entscheidungsvariablen.

5.3.2.1.4 Variantenflexibilität

Die Lean-Metrik Variantenflexibilität ist gemäß Kapitel 5.1.2.2 wie folgt definiert:

$$\text{Variantenflexibilität}_I = \frac{AGRV_I}{AORV_I} * 100 = \frac{BPZ_I - PWI_I - PP_I - \sum_I SZ}{\frac{RZ_I}{\frac{PP_I}{PP_{ideal,L,I}} * Z}} * 100$$

$$\text{Variantenflexibilität}_I = \frac{BPZ_I - PWI_I - \sum_{Var=A}^Z ZZ_{\max,i,Var} * m_{Var,I} - \sum_I SZ}{\frac{\frac{1}{j} * \sum_{r=1}^j RZ_{r,I}}{\frac{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{\max,i,Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{\max,i,Var} * x_{ideal,L,Var,I}}} * Z} * 100 \quad (5-84)$$

Mathematisch objektiv betrachtet impliziert die Maximierung der Lean-Metrik die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen wie folgt:

$AGRV_I \uparrow$ und damit

$$\frac{NPZ_I - PP_I - \sum_I SZ}{RZ_I} \uparrow \text{ und damit}$$

$NPZ_I \uparrow$ und damit

$AS_I \uparrow$

$PWI_{SH} \downarrow$

$ZZ_{\max,i,Var} \downarrow$ und damit

$NBZ_{i,Var} \downarrow$

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \downarrow$$

$$\sum_I SZ \downarrow$$

$RZ_I \downarrow$

5.3.2.1.5 Stationäre Stabilität

Für den Kontext der stationären Stabilität resultiert die Maximierung der Lean-Metrik in der Variation folgender Variablen:

$$stationäreStabilität_{WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z stationäreStabilität_{Var} * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} * 100 \quad (5-85)$$

$$stationäreStabilität_{WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z (1 - \frac{ZZ_{max,i,Var} - ZZ_{min,i,Var}}{ZZ_{max,i,Var}}) * m_{Var,I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} * 100$$

Mit

$$\frac{ZZ_{max,i,Var} - ZZ_{min,i,Var}}{ZZ_{max,i,Var}} \downarrow \text{ und damit}$$

$$ZZ_{max,i,Var} \downarrow \text{ und damit}$$

$$NBZ_{i,Var} \downarrow$$

Damit ist die maximale Zykluszeit für eine Variante über alle Stationen der Fertigungslinie¹⁵⁴ der als konstant erachteten, minimalen Zykluszeit derselben Variante über alle Stationen anzunähern.

5.3.2.1.6 Variantenspezifische Stabilität

Bei der variantenspezifischen Stabilität ist hingegen die maximale Zykluszeit für eine Station über alle Varianten der als konstant erachteten, minimalen Zykluszeit derselben Station über alle Varianten anzunähern¹⁵⁵. Mathematisch ist dieser Sachverhalt der Maximierung nachfolgender Bewertungsgröße geschuldet:

$$variantenspezifischeStabilität_{WS} = \left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n VS_i \right) * 100 \quad (5-86)$$

$$variantenspezifischeStabilität_{WS} = \left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{ZZ_{max,Var,i} - ZZ_{min,Var,i}}{ZZ_{max,Var,i}} \right) \right) * 100$$

Mit

$$VS_i \uparrow \text{ und damit}$$

$$\frac{ZZ_{max,Var,i} - ZZ_{min,Var,i}}{ZZ_{max,Var,i}} \downarrow \text{ und damit}$$

$$ZZ_{max,Var,i} \downarrow \text{ und damit}$$

$$NBZ_{Var,i} \downarrow$$

¹⁵⁴ Die Station mit der maximalen Zykluszeit entspricht folglich der Engpassstation.

¹⁵⁵ Siehe Reihenfolge der Indizes für Abgrenzung der jeweiligen Systemparameter.

5.3.2.1.7 Ableitung der Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix

Abschließend fasst die Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix die implizierte Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen durch die Maximierung alle Lean-Metriken zusammen. Diese bildet die Basis für die Abbildung der Lean-Metriken auf die Kostenparameter und damit für die erforderliche Fusionierung der Matrizen.

Tabelle 5.10: Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil eins

Prozessschritt	technische Systemzustände					
	Bearbeiten	Nebenzeiten	Zykluszeit	Rüsten		
ggf. Faktor in Lean-Metrik	BAZ(WS)	NBZ(WS)	ZZ(WS)	RZ(WS)		
Detaillierung	BAZ(i,WS)	NBZ(i,WS)	ZZ(i,WS)		RZ(l)	xL(l)
	BAZ(i,Var)	NBZ(i,Var)	ZZ(i,Var)		RZ(r,l)	x(b,l)
Maximierung Lean-Metrik						
Fluss		min	min	min	min	max
Takt		max/min	max/min	max/min	max/min	min/max
Volumenflexibilität		max/min	max/min	max/min	max/min	min/max
Variantenflexibilität		min	min		min	
stationäre Stabilität		min	min			
variantenspezifische Stabilität		min	min			

Legende:

- bewirkt Minimierung der Variable: min
- bewirkt Maximierung der Variable: max
- primäre Entscheidungsvariable
- sekundäre Entscheidungsvariable

Tabelle 5.11: Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil zwei

Prozessschritt	Transportieren	Warten (störungsbedingt)			Warten (ablaufbedingt)
	ggf. Faktor in Lean-Metrik	TZ(WS)	SZ(WS)		
Detaillierung	TZ(i,WS)		SZ(l)		m(Var,l)
	TZ(Lager,WS)			MTTR(v)	WZ(i,Var)
Maximierung Lean-Metrik					
Fluss	min	min	min		max
Takt		max/min	max/min		min/max
Volumenflexibilität		max/min	max/min		min/max
Variantenflexibilität			min		
stationäre Stabilität					
variantenspezifische Stabilität					

Tabelle 5.12: Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil drei

Prozessschritt	organisatorische Systemzustände						
	Lagern	Anzahl Rüstvorgänge (l)	Produktionsmenge	NPZ(l)		PWI(l)	
ggf. Faktor in Lean-Metrik	PZ(WS)	AGRv(l)	m(Var,l)	NPZ(SH)	AS(l)	PWI(SH)	AS(l)
Detaillierung	PZ(Lag,WS)						
	PZ(Lag,Var)						
Maximierung Lean-Metrik							
Fluss	min						
Takt				min/max	min/max	max/min	
Volumenflexibilität				min/max	min/max	max/min	
Variantenflexibilität		max	min	max	max	min	
stationäre Stabilität							
variantenspezifische Stabilität							

Kritisch anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass nicht alle technologischen und organisatorischen Systemparameter, welche in den Kostenfunktionen enthalten sind, durch die Lean-Metriken erfasst werden. Konkret handelt es sich um die folgenden Parameter:

1. Losanlaufzeit und damit die erhöhte Zykluszeit während des Losanlaufs
2. Anzahl der Transportvorgänge
3. Transportlosgröße
4. Anzahl der geplanten Instandhaltungsvorgänge
5. Instandhaltungszeit je geplantem Vorgang

Während die zwei letzt genannten Parameter einer Detaillierung bzw. Teilmenge des technologischen Systemparameters „kumulierte Stör- bzw. Instandhaltungsdauer“¹⁵⁶ entsprechen, wurden die drei erst genannten im Zuge der Definition der Losanlaufkosten und Transportkosten iterativ ergänzt. Die Menge der betrachteten technologischen und organisatorischen Systemparameter für die Kostenfunktionen ist folglich umfangreicher im Vergleich zur Menge für die Lean-Metriken.

5.3.2.2 Fusionierung der Matrizen

Im nächsten Schritt ist zu überprüfen, inwiefern die Dimensionierung der primären und sekundären Entscheidungsvariablen durch die Maximierung einer Lean-Metrik auf die identifizierten Kostenparameter abgebildet werden kann. Aus Darstellungsgründen wird jedoch an dieser Stelle auf eine dreidimensionale Matrix¹⁵⁷ verzichtet. Es werden lediglich die Dimensionen der Kostenparameter und Lean-Metriken mit einer binären Ergebnisdarstellung visualisiert, um festzustellen, ob die Lean-Metriken anhand eines Kostenparameters abgebildet werden können. Das Ergebnis hierfür findet sich in nachfolgender Tabelle:

Tabelle 5.13: Kostenparameter-Learn-Metriken Matrix

	Fluss	Takt	Volumenflexibilität	Variantenflexibilität	stationäre Stabilität	variantenspezifische Stabilität
Rüstkosten	+	+	+	+		
Losanlaufkosten	+	+	+	+		
Bestandskosten	+					
Folgekosten des Bestands	+					
Transportkosten	+					
Folgekosten des Transports	+					
Instandhaltungskosten	+	+	+	+		
Variabilitätskosten	+	+	+	+	+	
fixe Maschinenkosten		+	+			
variable Maschinenkosten						
Kosten der Überproduktion		+	+	+		
Kosten des Fremdbezugs	+	+	+	+	+	
variable Kosten der Organisation		+	+			

Offensichtlich können alle Lean-Metriken, bis auf die variantenspezifische Stabilität, auf die abgeleiteten Kostenparameter abgebildet werden. Damit wird durch das Kostenmodell kein Anreiz zur Optimierung der variantenspezifischen Stabilität gegeben. Offen ist damit, inwiefern eine evtl. Reduktion in der Ausprägung dieser Metrik durch die Optimierung¹⁵⁸ der anderen fünf Metriken kompensiert werden kann¹⁵⁹. Ein weiteres Defizit existiert bzgl. der Lean-Metriken Takt und Volumenflexibilität. Da deren Abbildung auf die Kostenarten identisch ist, stellt sich die

¹⁵⁶ Welche in den Lean-Metriken enthalten ist

¹⁵⁷ 1. Dimension: technologische und organisatorische Systemparameter; 2. Dimension: Kostenparameter; 3. Dimension: Lean-Metriken

¹⁵⁸ D.h. erhöhte prozentuale Ausprägung

¹⁵⁹ So dass dennoch eine Steigerung des aggregierten Lean-Grad zu verzeichnen ist

legitime Frage, inwiefern die Integration beider Metriken in das Evaluationsmodell zu einer doppelten Gewichtung desselben Sachverhalts führt.

Umgekehrt, können alle Kostenparameter, bis auf die variablen Maschinenkosten, durch die Lean-Metriken dargestellt werden. Da diese jedoch auch in der Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix nicht zu einer Variation der Entscheidungsvariablen führen, sondern als Konstante in das Modell integriert werden, konnte diese Kostenart nicht bei der Fusionierung der Matrizen erfasst werden.

Zusammenfassend konnten 5/6 der Lean-Metriken in einem bottom-up Verfahren auf die Kostenparameter abgebildet werden, wodurch die Minimierung dieser mit einer Optimierung der Lean-Metriken positiv korreliert. Damit wird die Optimierung der technologischen und organisatorischen Systemparameter, als operationalisierte Prinzipien der schlanken Produktion, anhand des Kostenmodells umfassend gewährleistet und als weitere Vorgehensweise für die Gestaltung eines Fertigungssystems legitimiert.

5.3.3 Weiterführende Modellannahmen

Für das entwickelte Modell zur Abbildung und Optimierung der operativen Betriebskosten, werden im weiteren Verlauf der Arbeit folgende Annahmen unterstellt (gegeben sind):

1. Die Pufferzeit/Verweildauer im Wareneingangslager wird in die Berechnung der Durchlaufzeit inkludiert. Eine Optimierung dieser kann jedoch nicht durch eine Variation des durchschnittlichen Bestands erzielt werden¹⁶⁰, sondern durch die Dimensionierung des $Takt_{plan,WS}$ unter Berücksichtigung weiterer Entscheidungsvariablen.
2. Reparaturen werden im direkten Anschluss an eine Störungsfeststellung initiiert, wobei neben Reparaturzeiten auch Wartezeiten bis zum Beginn der Instandsetzung entstehen können.
3. Der Bearbeitungsprozess wird an der Stelle fortgesetzt, an dem die Störung den Produktionsprozess unterbrochen hat.
4. Der prognostizierte Kundenbedarf muss zu jedem Zeitpunkt des Produktlebenszyklus befriedigt werden können.
5. Kann dieser durch die interne Produktionskapazität der Linie nicht abgedeckt werden, ist durch Fremdbezug eine Abdeckung zu gewährleisten.
6. In Anlehnung an [Toni07, S.48] wird davon ausgegangen, dass die Orientierung des Materialflusses durch die Fertigungslinie nicht veränderbar ist. „[...] Da die Kosten für eine grundsätzliche Veränderung des kompletten Transportsystems und die damit unter Umständen zusammenhängende Umstellung von Maschinen immens wären und somit nicht mehr von einem kleinem Eingriff in die Produktionstechnik gesprochen werden kann, soll im Rahmen dieses Optimierungsmodells jener Aspekt nicht in die Betrachtung einfließen.“
7. Damit werden auch die Transportzeiten innerhalb der Fertigungslinie zu den jeweiligen Stationen als Entscheidungsvariablen eliminiert. Unter der Annahme, dass eine Optimierung dieser ausschließlich durch eine grundsätzliche Veränderung der Transportmechanismen¹⁶¹ und nicht durch eine technologische Variation¹⁶² erfolgen kann, erscheint die Vernachlässigung dieser im Optimierungsmodell legitim. Die Transportzeiten vom Lager zur Fertigungslinie (und damit zu ersten Station i) und zurück dürfen hingegen nicht vernachlässigt werden, da diese durch eine entsprechende

¹⁶⁰ Dieser ist abhängig von der durchschnittlichen Fertigungslosgröße des internen Lieferanten

¹⁶¹ Resultierend in einem Transportkomponententausch, z.B. Ersetzen des Kettenförderers mit einem Rollenband

¹⁶² Wie beispielsweise die Erhöhung des Beschleunigungsanteils zur Reduktion der Transportzeit

- Dimensionierung maßgeblich auf den Gesamtprozess der Fertigung sowie die damit korrelierenden Zeitbausteine Einfluss nehmen.
8. Die Transportlosgröße für das Rohmaterial sowie die Halbfertigteile wird als identisch erachtet.
 9. Reihenfolgefragestellungen spielen weiterhin keine Rolle. Die Sequenz der Varianten wird somit als deterministisch erachtet. So wird beispielsweise das Produktionsprogramm ausschließlich in der Reihenfolge ABC, ABC, etc. erstellt.
 10. Puffer oder Zwischenlager innerhalb der Fertigungslinie werden nicht in die Betrachtung einbezogen, da von einer voll verketteten automatisierten Fertigungslinie ausgegangen wird.
 11. Aufgrund von Produktions- oder Materialfehlern entsteht in einer Fertigung Ausschuss und Nacharbeit, der entweder nachbearbeitet oder ausgeschleust werden muss. Dieser Sachverhalt ist bis dato durch die Qualitätskontrolle an der letzten Station der Fertigungslinie in den Lean-Metriken berücksichtigt¹⁶³. An dieser Stelle können kleinere Defekte¹⁶⁴ unmittelbar nachgearbeitet werden oder die Werkstücke als Ausschuss identifiziert werden. Die dadurch entstehenden Ausschuss- und Nacharbeitskosten sind entsprechend im Optimierungsmodell berücksichtigt.
 12. Es werden Abschreibungen als anteilige Folgekosten in Abhängigkeit der getätigten Investitionen in die Fertigungslinie berechnet. Diese sind prinzipiell über den Zeitraum des Maschinenlebenszyklus linear.
 13. Es wird davon ausgegangen, dass eine Variation der Zykluszeit ausschließlich durch eine entsprechende Optimierung der darin enthaltenen Nebenzeit erfolgt. Die rein wertschöpfenden Bearbeitungszeiten werden als konstant erachtet.
 14. Während des Losanlaufs resultieren erhöhte Zykluszeiten, welche auf das Einfahren zurück zu führen sind. Da diese Zykluszeiten sowohl durch erhöhte Nebenzeiten als auch Bearbeitungszeiten verursacht werden können, wird vereinfachend auf eine erneute Stations-Varianten-Matrix verzichtet. Die durchschnittlich, gewichteten Zykluszeiten für alle Stationen repräsentieren hingegen aggregierte, primäre Entscheidungsvariablen für die Optimierung.
 15. Die durchschnittliche Losgröße sowie die Bestände im Warenausgangslager der Fertigungslinie verhalten sich proportional.
 16. Obige Annahme bedingt, dass sich bei einer Losgrößenreduktion der interne Kunde dieser anpasst.
 17. Unter der Annahme, dass nach jedem Los auf die nächste Variante gerüstet werden muss und ein Los einem Produktionszyklus entspricht, folgt: Die Anzahl der geplanten Rüstvorgänge im Betrachtungsintervall entsprechen der Anzahl an Produktionszyklen.
 18. Damit besteht eine umgekehrte Proportionalität zwischen der Anzahl an Rüstvorgängen und der durchschnittlichen Losgröße.
 19. Kosten der variantenspezifischen Stabilität werden vernachlässigt. Die in diesem Kontext resultierende Variabilität resultiert aus der Abweichung von Zykluszeiten $ZZ_{Var,i}$ innerhalb einer Station bei der Fertigung multipler Varianten. Ursachen hierfür sind wiederum geometrische Differenzen zwischen den Varianten, welche unterschiedliche Bearbeitungsschritte an einer Station erfordern. Die Ableitung entsprechender Kosten bedingt jedoch folgende Voraussetzungen:

¹⁶³ Konkret handelt es sich um die Integration der Kontrollzeit an dieser Station in die Durchlaufzeit und damit in den Flussfaktor.

¹⁶⁴ Wie beispielsweise Grate

- a) $x_{L,I} = 1$, da nur in diesem Fall die Abweichungen häufig auftreten
- b) Die Differenz der Zykluszeiten (z.B. $ZZ_{A,1} - ZZ_{B,1}$) ist signifikant groß, so dass Wartezeiten resultieren.

Unter der Annahme, dass diese Voraussetzungen in der spanenden, automatisierten Fertigung der Automobilindustrie bis dato nicht gegeben sind und auch durch eine Optimierung der weiteren Entscheidungsvariablen nicht herbei geführt werden können, wird obige Annahme als legitim erachtet.

20. $\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}$ entspricht der Produktionsmenge von i.O. Werkstücken im Betrachtungsintervall über alle Varianten.

5.3.4 Definition der Eingangsgrößen und Entscheidungsvariablen

Basierend auf Kapitel 5.3.1, werden in den nachfolgenden Abschnitten die Komponenten des Optimierungsmodells zusammenfassend dargestellt.

5.3.4.1 Eingangsgrößen

Diese lassen sich wiederum in Indizes, Parameter und Kostenparameter für die Gewichtung der Entscheidungsvariablen klassifizieren.

Indizes:

<i>I</i>	betrachtetes Intervall, z.B. eine Woche, Monat, Quartal, Jahr
<i>WS</i>	Werkstück
<i>BAZ</i>	Bearbeitungszeit (rein wertschöpfend)
<i>DLZ</i>	Durchlaufzeit
<i>NBZ</i>	Nebenzeit
<i>ZZ</i>	Zykluszeit
<i>RZ</i>	Rüstzeit
<i>TZ</i>	Transportzeit
<i>KZ</i>	Kontrollzeit
<i>LZ</i>	Liegezeit
<i>SZ</i>	Störzeit
<i>WZ</i>	ablaufbedingte Wartezeit
<i>PZ</i>	Pufferzeit/Verweilzeit im Lager

$Var = A, \dots, Z$	Anzahl der zu produzierenden Varianten im Intervall
$i = 1, \dots, n$	Anzahl der Stationen (=Prozessschritte) der betrachteten Fertigungslinie
$r = 1, \dots, j$	Anzahl der Rüstvorgänge im Intervall
$Lag = 1, \dots, l$	Anzahl der Lager (Warenein- und ausgang der Linie)
<i>Kunde</i>	interner Kunde der Fertigungslinie
<i>Plan</i>	gemäß Planung
$b = 1, \dots, B$	Anzahl der produzierten Losgrößen im Intervall
<i>Losanlauf</i>	Losanlauf
<i>Maschbel</i>	Maschinenlegung
<i>Gewinn</i>	erzielter Gewinn
<i>int.Verrechnungspreis</i>	interner Verrechnungspreis anstelle eines Marktpreises aufgrund der betrachteten internen Kunden-Lieferantenbeziehung
<i>HK</i>	Herstellkosten
<i>Materialwert</i>	Materialwert auf Basis des Beschaffungspreises/Einkaufswertes
<i>kalk.Zins</i>	kalkulatorischer Zins
<i>Lagerkosten, var</i>	Lagerhaltungskostensatz variabel
<i>Lagerkosten, fix</i>	fixe Lagerhaltungskosten
<i>BeMi</i>	Betriebsmittel
<i>Per</i>	Personal
<i>IS – Kostensatz</i>	Instandhaltungskostensatz
<i>SH</i>	Schicht, kleinstes Betrachtungsintervall
<i>Pr odmenge</i>	Produktionsmenge
<i>Überprod</i>	Überproduktion
<i>var</i>	variabel

<i>Orga</i>	Organisation
<i>L</i>	Index der Losgröße
<i>T</i>	Index der Transportlosgröße
<i>WA</i>	Warenausgang
<u>Parameter:</u>	
$BAZ_{i,Var}$	wertschöpfende, konstante Bearbeitungszeit an Station i pro Variante
$\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,l}$	Kundenbedarf (kumuliert) über alle Varianten im Intervall; fixe Eingangsgröße
<i>f1</i>	empirisch ermittelter Faktor zur Berechnung der Folgekosten des Bestands in Abhängigkeit der Bestandskosten
<i>f2</i>	empirisch ermittelter Faktor zur Berechnung der Folgekosten des Transports in Abhängigkeit der Transportkosten
<i>Var</i>	Anzahl der auf der Linie gefertigten Varianten
BPZ_{SH}	Bruttoproduktionszeit pro Schicht – kleinstes Betrachtungsintervall und fixe Eingangsgröße
<u>Kostenparameter für die Gewichtung der Entscheidungsvariablen:</u>	
$f_{Maschbel}$	konstanter Maschinenbelegungskostensatz in €/h für Energie, Werkzeuge etc.
$f_{Gewinn} = f_{int.Verrechnungspreis-HK}$	konstanter Gewinn in €/WS, welcher durch den Verkauf eines Werkstücks erzielt werden kann
$f_{int.Verrechnungspreis}$	konstanter interner Verrechnungspreis in €/WS, aufgrund der Weitergabe an einen internen Kunden; durchschnittliche Größe über alle Varianten
f_{HK}	konstante Herstellkosten in €/WS; durchschnittliche Größe über alle Varianten

$f_{\text{Materialwert}}$	konstanter Materialwert in €/WS; durchschnittliche Größe über alle Varianten
$f_{\text{kalk.Zins}}$	kalkulatorischer, konstanter Zins als Basis der Berechnung von Opportunitätskosten aufgrund des im Lager gebundenen Kapitals
$f_{\text{Lagerkosten,var}}$	Lagerhaltungskostensatz in €/WS für Lagerplätze und Lagerfläche für die Berechnung der variablen Lagerkosten
$f_{\text{Lagerkosten,fix}}$	anteilige für die Fertigungslinie fixe Lagerhaltungskosten in €, unabhängig von der Lagermenge für Lagermittel, Lagerraum und personelle Aufwendungen
f_{BeMi}	konstanter Betriebsmittelkostensatz in €/h für Transportvorgänge
f_{Per}	konstanter Personalkostensatz in €/h, welcher additiv mit obigem Betriebsmittelkostensatz in dem Transportkostensatz resultiert
$f_{\text{IS-Kostensatz}}$	Durchschnittskostensatz der Hilfsbetriebskostenstelle, welcher sowohl Maschinen- als auch Personalkosten inkludiert
$f_{\text{Maschine,fix,I}}$	fixe Maschinenkosten im Intervall
$f_{\text{Maschine,var,I,WS}}$	variable Maschinenkosten im Intervall je Werkstück; konstanter Kostenfaktor, unabhängig von der kumulierten Produktionsmenge
$f_{\text{Fremdbezug,WS}}$	Fremdbezugskostensatz in € pro Werkstück; werden unabhängig von der Bezugsmenge vereinfachend als konstant angenommen und repräsentieren damit eine konstante Eingangsgröße des Modells

$f_{\text{Zuschläge}}$	Zuschlagskostensatz in € pro Schicht; wird unabhängig von der Sonderschicht vereinfachend als konstant angenommen und repräsentiert damit eine konstante Eingangsgröße des Modells
5.3.4.2 Entscheidungsvariablen	
$C_{\text{Rüsten},I,WS}$	anteiligen Rüstkosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells und gemäß der Nomenklatur der Arbeit einer tertiären Entscheidungsvariablen
RZ_I	durchschnittliche Rüstzeit je Rüstvorgang im Betrachtungsintervall; primäre Entscheidungsvariable
$ZZ_{\text{max},i,WS}$	maximale, durchschnittlich, gewichtete Zykluszeit innerhalb der Fertigungslinie über alle Stationen; sekundäre Entscheidungsvariable, welche durch die primäre Entscheidungsvariable $NBZ(i,Var)$ determiniert wird
$NBZ_{i,Var}$	mit dem Bearbeitungsvorgang verbundene nicht-wertschöpfende Nebenzeit an Station i pro Variante; primäre Entscheidungsvariable
SZ_{WS}	anteilige Störzeit je Werkstück; sekundäre Entscheidungsvariable in Abhängigkeit der primären Entscheidungsvariablen $\sum_I SZ$ und $\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}$
$\sum_I SZ$	kumulierte Störzeit (geplant und ungeplant) im Betrachtungsintervall; z.T. resultierend aus $\sum_v MTTR$; sonst primäre Entscheidungsvariable
$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}$	Produktionsmenge der Fertigungslinie über alle Variante im Intervall; primäre Entscheidungsvariable
$x_{L,I}$	durchschnittliche Losgröße im Intervall; primäre Entscheidungsvariable, welche analog zur durchschnittlichen Rüstzeit als Aggregationsgröße entsprechend der Zielfunktion zu dimensionieren ist

$AGRV_I$	Anzahl der geplanten Rüstvorgänge im Betrachtungsintervall; sekundäre Entscheidungsvariable in Abhängigkeit der primären Entscheidungsvariablen $\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}$ und $x_{L,I}$
$C_{Losanlauf,I,WS}$	anteilige Losanlaufkosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable
LAZ_I	durchschnittliche Losanlaufzeit im Intervall nach jedem Rüstvorgang; primäre Entscheidungsvariable
$ZZ_{max,i,Losanlauf,WS}$	maximale, durchschnittlich, gewichtete Zykluszeit während des Losanlaufs innerhalb der Fertigungslinie über alle Stationen; sekundäre Entscheidungsvariable, welche durch die primäre Entscheidungsvariable $ZZ(i,Losanlauf,WS)$ determiniert wird
$ZZ_{i,Losanlauf,WS}$	durchschnittlich, gewichtete Zykluszeit während des Losanlaufs für alle Stationen; primäre Entscheidungsvariable
LAZ_{WS}	anteilige Losanlaufzeit je Werkstück; sekundäre Entscheidungsvariable
$C_{Bestand,I,WS}$	Bestandskosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable
$PZ_{WA,WS}$	durchschnittlich, gewichtete Pufferzeit/Verweilzeit im Warenausgang pro Werkstück für alle Puffer/Lager, welche die nachfolgende Produktionslinie und damit den internen Kundenbedarf bedienen (d.h. kumuliert dem Warenausgang entsprechen); sekundäre Entscheidungsvariable
$C_{FolgeBestand,I,WS}$	Folgekosten des Bestands im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable

$C_{Transport,I,WS}$	Transportkosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable
$x_{T,I}$	durchschnittliche Transportlosgröße im Intervall; primäre Entscheidungsvariable, welche analog zur durchschnittlichen Losgröße der Produktion als Aggregationsgröße entsprechend der Zielfunktion zu dimensionieren ist
$AGTV_L$	Anzahl der geplanten Transportvorgänge während der Fertigung eines Los; sekundäre Entscheidungsvariable
TZ_i	Transportzeit vom Lager zur Fertigungslinie je Transportvorgang, unabhängig von der Variante; primäre Entscheidungsvariable
TZ_{Lager}	Transportzeit von der Fertigungslinie zum Lager je Transportvorgang, unabhängig von der Variante; primäre Entscheidungsvariable
$C_{FolgeTransport,I,WS}$	Folgekosten des Transports im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable
$C_{IS-Kosten,I,WS}$	Instandhaltungskosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable
RZ_{WS}	anteilige Rüstzeit je Werkstück; sekundäre Entscheidungsvariable in Abhängigkeit der primären Entscheidungsvariablen RZ_I und $x_{L,I}$
$AGIV_I$	Anzahl der geplanten Instandhaltungsvorgänge im Betrachtungsintervall; primäre Entscheidungsvariable

ISZ_v	Instandhaltungszeit je geplanter Instandhaltungsvorgang; primäre Entscheidungsvariable, welche vereinfachend als statische Größe angenommen wird
$C_{\text{Variabilität}, I, WS}$	Variabilitätskosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable
$WZ_{i, Var}$	maximale Maschinenwartezeit an einer Station der Fertigungslinie für eine Variante bei Vernachlässigung der Wartezeit während des Werkstücktransports zur Station; Basis für die Quantifizierung der Opportunitätskosten und damit sekundäre Entscheidungsvariable
$ZZ_{\text{max}, i, Var}$	maximale Zykluszeit über alle Stationen für eine Variante; sekundäre Entscheidungsvariable in Abhängigkeit der primären Entscheidungsvariable $NBZ_{i, Var}$
$ZZ_{\text{min}, i, Var}$	minimale Zykluszeit über alle Stationen für eine Variante; sekundäre Entscheidungsvariable
$C_{\text{fixMaschine}, I, WS}$	anteilige Maschinenkosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells, tertiäre Entscheidungsvariable
$C_{\text{var Maschine}, I, WS}$	variable Maschinenkosten im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells, tertiäre Entscheidungsvariable
$C_{\text{Pr odmenge}, I, WS}$	anteilige Produktionsmengenkosten im Intervall je Werkstück; abschnittsweise definiert; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable

$C_{\text{Überprod.},I,WS}$	Kosten der Überproduktion im Intervall je Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable
$Takt_{\text{Plan},WS}$	geplanter Takt, d.h. zu realisierender Produktionsrhythmus; sekundäre Entscheidungsvariable
NPZ_I	Nettoproduktionszeit im Intervall, z.B. 1 Schicht abzüglich der Pausen, Wartung und Instandhaltung; sekundäre Entscheidungsvariable
AS_I	Anzahl der Schichten im Intervall; primäre Entscheidungsvariable
PWI_{SH}	Zeit für geplante Pausen, Wartung und Instandhaltung je Schicht; primäre Entscheidungsvariable
$C_{\text{Fremdbezug},I,WS}$	Kosten des Fremdbezugs im Intervall pro Werkstück; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable
$C_{\text{var Orga.},I,WS}$	variable Kosten der Organisation im Intervall pro Werkstück für Sonderschichten; entsprechen einem Kostenbaustein der Zielfunktion des Optimierungsmodells; tertiäre Entscheidungsvariable

5.3.5 Formulierung der Zielfunktion

Die deklarierten Entscheidungsvariablen bedürfen im Zuge ihrer optimalen Bestimmung einer Zielfunktion, in welcher sie das Minimum an Kosten verursachen. Konkret sollen die Systemkosten durch den operativen Betrieb der Fertigungslinie im Intervall pro Werkstück minimiert werden, welche additiv aus den zuvor definierten Kostenfunktionen/-parametern resultieren. Ausführliche Erläuterungen zu den Zielfunktions-Komponenten finden sich weiterhin in Kapitel 5.3.1.

$$\begin{aligned}
\min c_{I,WS} = \sum (& \\
& \text{Rüstkosten} \\
& + \text{Losanlaufkosten} \\
& + \text{Bestandskosten} \\
& + \text{Folgekosten des Bestands} \\
& + \text{Transportkosten} \\
& + \text{Folgekostendes Transports} \\
& + \text{Instandhaltungskosten} \\
& + \text{Variabilitätskosten} \\
& + \text{fixe Maschinenkosten} \\
& + \text{variable Maschinenkosten} \\
& + \text{Kosten der Überproduktion} \\
& + \text{Kosten des Fremdbezugs} \\
& + \text{variable Kosten der Organisation})
\end{aligned} \tag{5-87}$$

$$\begin{aligned}
\min c_{I,WS} = \sum (& \\
& C_{Rüsten, I, WS} \\
& + C_{Losanlauf, I, WS} \\
& + C_{Bestand, I, WS} \\
& + C_{Folgebestand, I, WS} \\
& + C_{Transport, I, WS} \\
& + C_{FolgeTransport, I, WS} \\
& + C_{IS-Kosten, I, WS} \\
& + C_{Variabilität, I, WS} \\
& + C_{fixMaschine, I, WS} \\
& + C_{var Maschine, I, WS} \\
& + C_{Überprod, I, WS} \\
& + C_{Fremdbezug, I, WS} \\
& + C_{var Orga, I, WS})
\end{aligned} \tag{5-88}$$

Mit

$$C_{Rüsten, I, WS} = \left(\frac{RZ_I * f_{Maschbel} + \frac{RZ_I}{(ZZ_{\max, i, WS} + SZ_{WS})} * f_{Gewinn}}{x_{L, I}} \right) \tag{5-89}$$

Die Rüstkosten im Intervall pro Werkstück setzen sich additiv aus den Maschinenbelegungs- und Opportunitätskosten, aufgrund der verloren gegangenen Produktionszeit während des Rüstens, zusammen.

$$C_{\text{Losanlauf}, I, \text{WS}} = \left(\frac{LAZ_I}{(ZZ_{\text{max}, i, \text{WS}} + SZ_{\text{WS}})} - \frac{LAZ_I}{(ZZ_{\text{max}, i, \text{Losanlauf}, \text{WS}} + SZ_{\text{WS}})} \right) * f_{\text{Gewinn}} * x_{L, I} \quad (5-90)$$

Die Losanlaufkosten resultieren aus erhöhten Zykluszeiten an den Stationen unmittelbar nach einem Rüstvorgang und werden anhand von Opportunitäten quantifiziert.

$$C_{\text{Bestand}, I, \text{WS}} = \frac{1}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var}, I}} * \left(\frac{x_{L, I}}{2} * (f_{\text{Materialwert}} + f_{\text{HK}}) * f_{\text{kalk. Zins}} + \frac{x_{L, I}}{2} * (f_{\text{Lagerkosten, var}} + f_{\text{Lagerkosten, fix, I}}) \right) \quad (5-91)$$

Die Bestandskosten beinhalten Kapitelbindungs- sowie fixe und variable Lagerkosten, in Abhängigkeit der durchschnittlichen Lagermenge sowie der dadurch determinierten Verweildauer im Zwischenlager.

$$C_{\text{Folgebestand}, I, \text{WS}} = f1 * C_{\text{Bestand}, I, \text{WS}} \quad (5-92)$$

Die Folgekosten des Bestands ergeben sich aus Qualitätsproblemen sowie erforderlichen Änderungen an Werkstücken aufgrund zu hoher Verweilzeiten im Lager und werden empirisch aus den Bestandskosten abgeleitet.

$$C_{\text{Transport}, I, \text{WS}} = \frac{1}{x_{L, I}} * \left[\frac{x_{L, I}}{x_{T, I}} \right] * (TZ_i + TZ_{\text{Lager}}) * (f_{\text{BeMi}} + f_{\text{Per}}) \quad (5-93)$$

Die Kosten für den Transport umfassen alle Vorgänge zwischen dem Lager und einer Fertigungsstufe inkl. der erforderlichen Handlungsschritte durch das hierfür erforderliche Personal und der benötigten Betriebsmittel.

$$C_{\text{FolgeTransport}, I, \text{WS}} = f2 * C_{\text{Transport}, I, \text{WS}} \quad (5-94)$$

Analog zu den Folgekosten des Bestands, resultieren die Folgekosten des Transports aus Qualitätsproblemen und werden empirisch aus den Transportkosten abgeleitet.

$$C_{\text{IS-Kosten}, I, \text{WS}} = \frac{\sum_I SZ}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var}, I} * (ZZ_{\text{max}, i, \text{WS}} + RZ_{\text{WS}})} * f_{\text{Gewinn}} + \frac{AGIV_I * ISZ_V * f_{\text{IS-Kostensatz}}}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var}, I}} \quad (5-95)$$

Die Instandhaltungskosten setzen sich additiv aus den Aufwendungen für das Instandhaltungspersonal und der benötigten Betriebsmittel sowie der Opportunitäten aufgrund der verloren gegangenen Produktionszeit zusammen.

$$C_{\text{Variabilität}, I, WS} = \frac{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{\max, i, Var} - ZZ_{\min, i, Var}}{(ZZ_{\max, i, WS} + RZ_{WS} + SZ_{WS})} * f_{\text{Gewinn}} \quad (5-96)$$

Die Variabilitätskosten entsprechen erneut Opportunitäten aufgrund von Maschinenwartezeiten, welche bei Abweichung der Zykluszeiten zwischen den Stationen einer Fertigungslinie entstehen.

$$C_{\text{fixMaschine}, I, WS} = \frac{f_{\text{Maschine, fix}, I}}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var, I}} \quad (5-97)$$

Fixe Maschinenkosten inkludieren alle Kostenfaktoren, welche unabhängig vom Nutzungs-/Auslastungsgrad der Fertigungslinie anfallen, wie z.B. Flächenkosten.

$$C_{\text{var Maschine}, I, WS} = f_{\text{Maschine, var}, I, WS} \quad (5-98)$$

Variable Maschinenkosten entsprechen sogenannten Prozesskosten, welche ausschließlich in Abhängigkeit der Betriebsdauer/gefertigten Stückzahl anfallen, wie z.B. variable Energiekosten, jedoch die zuvor erläuterten Größen nicht inkludieren.

$$C_{\text{Pr odmenge}, I, WS} = \left\{ \begin{array}{l} C_{\text{Fremdbezug}, I, WS}; \sum_{Var=A}^Z m_{Var, I} < \sum_{Var=A}^Z KB_{Var, I} \\ 0; \sum_{Var=A}^Z m_{Var, I} = \sum_{Var=A}^Z KB_{Var, I} \\ C_{\text{Überprod}, I, WS}; \sum_{Var=A}^Z m_{Var, I} > \sum_{Var=A}^Z KB_{Var, I} \end{array} \right\} \quad (5-99)$$

Produktionsmengenkosten resultieren bei Abweichungen der Ausbringungsmenge vom Kundenbedarf. Konkret handelt es sich dabei um Fremdbezugskosten oder Überproduktionskosten, welche wiederum Bestandskosten aufgrund erhöhter Lageraufwendungen darstellen.

Mit:

$$C_{\text{Überprod.,I,WS}} = \frac{1}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var.,I}}} * \left(\left(\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var.,I}} - \sum_{\text{Var}=A}^Z KB_{\text{Var.,I}} \right) * (f_{\text{Materialwert}} + f_{\text{HK}}) * f_{\text{kalk.Zins}} \right) \quad (5-100)$$

$$+ \left(\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var.,I}} - \sum_{\text{Var}=A}^Z KB_{\text{Var.,I}} \right) * f_{\text{Lagerkosten,var}}$$

$$C_{\text{Fremdbezug.,I,WS}} = \frac{1}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var.,I}}} * \left(\sum_{\text{Var}=A}^Z KB_{\text{Var.,I}} - \sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var.,I}} \right) * f_{\text{Fremdbezug,WS}} \quad (5-101)$$

$$C_{\text{var Orga.,I,WS}} = \left\{ \begin{array}{l} 0; AS_I \leq 759 \\ \frac{AS_I * f_{\text{Zuschläge}}}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var.,I}}}; 759 < AS_I \leq 1.095 \end{array} \right\} \quad (5-102)$$

Die variablen Kosten der Organisation werden durch Zuschläge in den Personalkosten, insbesondere bei Sonderschichten an Wochenenden und Feiertagen, bedingt.

Offensichtlich liegen nicht-lineare Funktionen als Komponenten der Zielfunktion vor. Für die Lösung des Optimierungsmodells mit kommerziellen Solvern, sind daher Umformulierungen¹⁶⁵, entsprechende Linearisierungen oder vereinfachende Annahmen¹⁶⁶ erforderlich. Weitere Ausführungen hierzu finden sich in Kapitel 6.3.1.

5.3.6 Formulierung der Nebenbedingungen

In Analogie zur thematischen Unterteilung der Zielfunktion, finden sich nachfolgend die thematisch zugehörigen Restriktionen der Sub-Komponenten der Zielfunktion¹⁶⁷ wieder, wobei Überschneidungen existieren. Da es sich vielfach um Definitionen der sekundären Entscheidungsvariablen handelt, welche bei den jeweiligen Kostenfunktionen oder Lean-Metrik Deklarationen ausführlich erläutert wurden, soll nachfolgend insbesondere die Erklärung der übergreifenden Restriktionen fokussiert werden.

$$ZZ_{\text{max.,i,WS}} = \max_{\text{Var}=A}^Z \frac{\sum_{\text{Var}=A}^Z (BAZ_{i,\text{Var}} + NBZ_{i,\text{Var}}) * m_{\text{Var.,I}}}{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var.,I}}} \quad \forall \text{Var}, i \quad (5-103)$$

$$BAZ_{i,\text{Var}} = \text{konst.} \quad \forall i, \text{Var} \quad (5-104)$$

Die rein wertschöpfenden Bearbeitungszeiten an jeder Station für alle Varianten werden als konstant erachtet. Damit wird die Verlagerung einzelner Bearbeitungsschritte zu anderen Stationen der Linie im Modell nicht berücksichtigt. Auch wird eine Reduktion dieser durch erhöhte Bohr-/Fräsgeschwindigkeiten¹⁶⁸ nicht ermöglicht.

¹⁶⁵ Wie beispielsweise durch quadratische Programmierung

¹⁶⁶ Z.B. die Fixierung von Entscheidungsvariablen

¹⁶⁷ Chronologisch geordnet

¹⁶⁸ Etc.

$$SZ_{WS} = \frac{\sum I}{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}} \quad \forall Var \quad (5-105)$$

$$AGRVI = \frac{\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I}}{x_{L,I}} \quad \forall Var \quad (5-106)$$

Die Anzahl der geplanten Rüstvorgänge im Betrachtungsintervall resultieren aus der Produktionsmenge sowie der durchschnittlichen Losgröße. Für ein definiertes Fertigungsvolumen, sind damit die Anzahl der geplanten Rüstvorgänge sowie die Losgröße umgekehrt proportional.

$$ZZ_{\max,i,Losanlauf,WS} = \max ZZ_{i,Losanlauf,WS} \quad \forall i \quad (5-107)$$

$$ZZ_{\max,i,Losanlauf,WS} \geq ZZ_{\max,i,WS} \quad \forall i \quad (5-108)$$

Die erhöhte Zykluszeit während des Losanlaufs ist an der Engpassstation per Definition größer als die reguläre Zykluszeit¹⁶⁹ dieser.

$$LAZ_{WS} = \frac{LAZ_I}{x_{L,I}} \quad (5-109)$$

$$PZ_{WA,WS} = \frac{\frac{x_{L,I}}{2}}{\frac{\sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I}}{NPZ_I}} \quad \forall WA, Var \quad (5-110)$$

$$AGTV_L = \left[\frac{x_{L,I}}{x_{T,I}} \right] \quad (5-111)$$

$$RZ_{WS} = \frac{RZ_I}{x_{L,I}} \quad (5-112)$$

$$RZ_I \geq ZZ_{\max,i,WS} \quad (5-113)$$

Gemäß der Lean-Philosophie ist das Rüsten im Takt die anzustrebende Untergrenze für die durchschnittliche Rüstzeit je Rüstvorgang. Der Begriff des Takt inkludiert jedoch nicht anteilige Rüst- und Störzeiten¹⁷⁰ je Werkstück. Gemeint ist folglich die Zykluszeit der Engpassstation, wie in obiger Restriktion dargestellt.

¹⁶⁹ D.h. während des Normalbetriebs dieser

¹⁷⁰ Wie im Kontext dieser Arbeit

$$WZ_{i,Var} = ZZ_{\max,i,Var} - ZZ_{\min,i,Var} \quad \forall Var, i \quad (5-114)$$

$$ZZ_{\max,i,Var} = \max(BAZ_{i,Var} + NBZ_{i,Var}) \quad \forall Var \quad (5-115)$$

Maximale Zykluszeit für eine Variante über alle Stationen der Fertigungslinie. Für alle Varianten resultiert damit ein Vektor, gemäß obiger Formel.

$$ZZ_{\min,i,Var} = \min(BAZ_{i,Var} + NBZ_{i,Var}) \quad \forall Var \quad (5-116)$$

$$ZZ_{\max,i,Var} \geq ZZ_{\min,i,Var} \quad \forall Var \quad (5-117)$$

Die maximale Zykluszeit ist naturgemäß größer als die minimale Zykluszeit für eine Variante über alle Stationen der Fertigungslinie, ist jedoch aus Gründen der Vollständigkeit explizit zu definieren.

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,l} \leq \frac{NPZ_l}{Takt_{Plan,WS}} \quad \forall Var \quad (5-118)$$

Die kumulierte Produktionsmenge der Fertigungslinie über alle Varianten im Intervall wird durch die Schichtzeit sowie den Takt der Linie limitiert.

$$Takt_{Plan,WS} = ZZ_{\max,i,WS} + RZ_{WS} + SZ_{WS} \quad (5-119)$$

$$NPZ_l = AS_l * (BPZ_{SH} - PWI_{SH}) \quad \forall SH \quad (5-120)$$

$$f_{Fremdbezug,WS} > f_{HK} \quad (5-121)$$

Der Fremdbezugskostensatz je Werkstück übersteigt die Herstellkosten. Andernfalls müsste der betrachtete Wertschöpfungsschritt aus Wirtschaftlichkeitsgründen vollständig „outsourced“ werden.

$$AS_l \leq 1.095 \quad (5-122)$$

Theoretische Obergrenze für die Anzahl der Schichten im Betrachtungsintervall unter der Annahme von 365 Arbeitstagen und je drei Schichten pro Tag.

$$PWI_{SH} \leq 40 \quad \forall SH \quad (5-123)$$

Maximale Pausenzeit je Schicht.

$$PWI_{SH} \geq 15 \quad \forall SH \quad (5-124)$$

$$\geq 0 \quad \forall Variablen \quad (5-125)$$

Letzt genannte Restriktion entspricht der Nicht-Negativitätsbedingung für alle Entscheidungsvariablen im Optimierungsmodell.

6 Validierung und Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten der vorliegenden Arbeit, werden die erstellten Modelle auf ein Fallbeispiel angewandt sowie die dadurch generierten Ergebnisse diskutiert.

6.1 Fallbeispielbezogene Anwendung

6.1.1 Produkt und zu gestaltendes Fertigungssystem

Die Vorderachsenfertigung stellt einen, für die Automobilindustrie, wichtigen Bereich dar. In dem betrachteten System werden sogenannte Achsschenkel als Komponenten einer Vorderachse gefertigt. Die Bereitstellung der Rohlinge¹⁷¹ erfolgt durch den internen Lieferanten, die Schmiede. Die an der Linie spanend bearbeiteten Achsschenkel werden anschließend beschichtet¹⁷² und zur Achsmontage, dem internen Kunden, weitergeleitet. Die gefertigten Achsschenkel der Anlage umfassen sechs Varianten, wofür jedoch lediglich vier unterschiedliche Rohlinge benötigt werden. Dieser Sachverhalt ist einerseits auf die spiegelbildliche Bearbeitung eines linken und rechten Werkstücks innerhalb der Linie zurück zu führen. Andererseits werden auf einem Rohling¹⁷³ zwei unterschiedliche CNC¹⁷⁴-Programme ausgeführt und folglich zwei unterschiedliche Varianten erzeugt. Eine detaillierte Darstellung hinsichtlich der Verarbeitung der Rohlinge zu den jeweiligen Varianten, findet sich in der unten stehenden Tabelle:

Tabelle 6.1: Varianten und hierfür erforderliche Halbfertigfabrikate der fallbeispielbezogenen Anwendung

Variante/ Rohling	A links	A rechts	B links	B rechts	C links	C rechts
Y links	x					
Y rechts		x				
Z links			x		x	
Z rechts				x		x

Folglich wird für Variante B und C der identische Rohling Z als Eingangsgröße verwendet.

Die Fertigungslinie selbst besteht aus einer Rundtaktmaschine, welche wiederum sechs Stationen umfasst, und zwei Bearbeitungszentren. Die Zuführung der Halbfertigfabrikate erfolgt über einen automatisierten Kettenförderer, welcher manuell durch einen Mitarbeiter beladen wird. Die Teile gelangen von dort über einen Robotergreifarm zur Rundtaktmaschine. Nach deren spanender Bearbeitung¹⁷⁵ entlädt der Greifarm ein Werkstück und deponiert es in einer Zwischenablage. Von dort werden jeweils zwei rechte und zwei linke Achsschenkel durch einen Lader zu einem der beiden parallelen Bearbeitungszentren befördert. Hier werden weitere Dreh-, Fräs- und Bohrvorgänge ausgeführt. Anschließend werden die Werkstücke auf einer von drei Fertigungslinien gemeinsam verwendeten Verkettung transportiert. Diese führt durch eine Waschmaschine, in der die Werkstücke aufgrund ihrer mechanischen Bearbeitung von Rückständen befreit werden. Der letzte Bearbeitungsschritt umfasst die Endkontrolle durch Mitarbeiter, welche eine Sichtkontrolle durchführen und ggf. die Achsschenkel entgraten.

¹⁷¹ Bzw. Halbfertigfabrikate

¹⁷² Dieser Bearbeitungsvorgang findet bei einem externen Dienstleister statt.

¹⁷³ Sowohl links als auch rechts

¹⁷⁴ Computer numerical control

¹⁷⁵ Insbesondere Fräsen und Drehen

6.1.2 Ausgangssituation der fallbeispielbezogenen Anwendung

In dem betrachteten Beispielfall besteht die primäre Problematik darin, dass die kumulierte Produktionsmenge über alle Varianten der Fertigungslinie im Betrachtungsintervall¹⁷⁶, den internen Kundenbedarf unterschreitet. Eine Erfüllung der Kundennachfrage wird folglich durch einen hohen Fremdbezugsanteil gewährleistet. Weiterhin wurde die Betriebszeit der Linie¹⁷⁷ durch Sonderschichten an Wochenenden und Feiertagen ausgeweitet, um eine Erhöhung der Ausbringungsmenge zu ermöglichen. Die zuvor beschriebene Problematik der Nicht-Erfüllung des Kundenbedarfs, kann anhand folgender Tabelle quantifiziert werden:

Tabelle 6.2: interner Kundenbedarf versus Ausbringungsmenge der Fertigungslinie für alle Varianten im Betrachtungsintervall

	A	B	C	SUMME
interner Kundenbedarf im Intervall	260.378	2.921	1.941	265.240
Produktionsmenge der Fertigungslinie im Intervall	184.517	11.349	1.261	197.127
Delta	-75.861	+8.428	-680	-68.113

Offensichtlich ist die signifikante Unterdeckung des kumulierten Kundenbedarfs nicht auf alle Varianten zu transferieren. Eine Überproduktion von Variante B führt stattdessen zu zusätzlichen Lagerhaltungsaufwendungen und damit Bestandskosten. Bereinigt um diesen Sachverhalt, resultiert ein tatsächlicher Fremdbezug in Höhe von 76.541 Werkstücken der Varianten A und C.

Obige Problematik ist jedoch nicht auf eine grundlegend kapazitive Fehldimensionierung der Fertigungslinie zurück zu führen¹⁷⁸, sondern auf folgende operative Schwierigkeiten:

- Häufige und lange Maschinenstillstände in Höhe von 18% der gesamten Betriebszeit durch ungeplante Störungen; diese sind wiederum auf einen hohen Werkzeugverschleiß sowie damit einhergehende Werkzeugbrüche zurück zu führen
- Durchschnittliche Rüstzeit je Rüstvorgang¹⁷⁹ in Höhe von 5,5h bei einem Rüstzeitziel von zehn Minuten; folglich wurde im Betrachtungsintervall nur zwölf mal gerüstet, um die dadurch induzierten Stillstände zu minimieren
- Rüstzeit und Rüstfrequenz implizieren eine durchschnittliche Losgröße¹⁸⁰ von 16.400 Werkstücken
- Flexibilität auf Variationen in der Kundennachfrage¹⁸¹ kann damit ausschließlich durch hohe Bestände zur Verfügung gestellt werden
- Große Bestände führen zu entsprechend hohen Verweilzeiten im Zwischenlager der Fertigungslinie
- Durchschnittliche Durchlaufzeit eines Werkstücks durch die Fertigungslinie, inklusive der Liege-/Verweilzeiten im Zwischenlager beträgt 32 Tage

¹⁷⁶ = ein Jahr

¹⁷⁷ Neben einem „regulären“ Schichtbetrieb von 15 Schichten an fünf Tagen je Woche

¹⁷⁸ Welche folglich im Kontext der Anpassungsplanung zu lösen wäre

¹⁷⁹ Diese entspricht dem arithmetischen Mittel der Rüstzeiten aus der Rüstmatrix.

¹⁸⁰ = arithmetisches Mittel der Losgrößen je Fertigungsintervall und Variante im Betrachtungszeitraum

¹⁸¹ Sowohl hinsichtlich Menge als auch Variante

- Kumulierte, wertschöpfende Bearbeitungszeit über alle Stationen der Linie liegt hingegen bei sieben Minuten

Eine Detaillierung hinsichtlich der Verteilung¹⁸² der Bearbeitungszeiten je Station und Variante ist nachfolgender Grafik zu entnehmen¹⁸³.

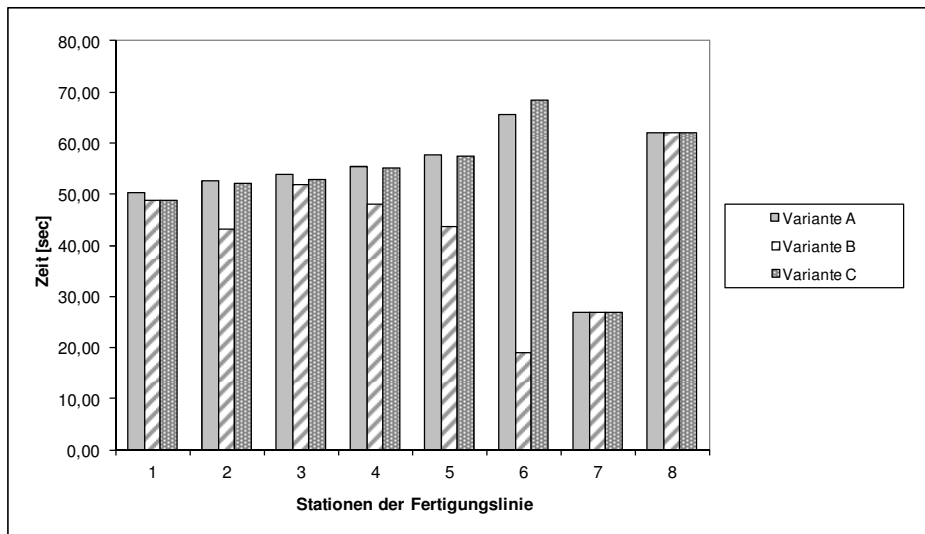


Abbildung 6.1: Verteilung der **Bearbeitungszeiten** je Station und Variante

Relevant ist in diesem Kontext auch die Verteilung der nicht-wertschöpfenden Nebenzeiten je Station und Variante, welche additiv mit den Bearbeitungszeiten in der Verteilung der Zykluszeiten je Station und Variante resultiert.

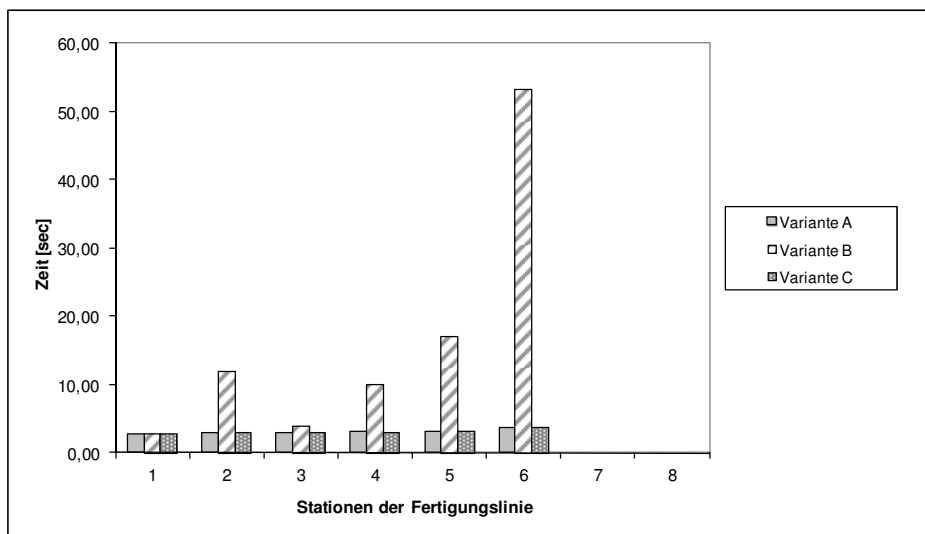


Abbildung 6.2: Verteilung der **Nebenzeiten** je Station und Variante

Die Nebenzeiten an den Stationen sieben und acht werden für alle Varianten eliminiert bzw. sind nicht existent. Konkret repräsentiert Station sieben die Waschanlage, welche keine Nebenzeiten in den Prozessen Waschen und Trocknen inkludiert. Station acht stellt hingegen die manuelle Endkontrolle dar, in welcher eine Transparenz der Nebenzeiten und damit Zykluszeiten politisch

¹⁸² Nicht im Sinne eines Histogramms

¹⁸³ Die Anzahl der Varianten wurden für den weiteren Verlauf der Arbeit um das arithmetische Mittel der spiegelbildlichen Bearbeitung bereinigt und damit auf drei reduziert. Weiterhin wurden zwei parallele Stationen zusammen gefasst, um vereinfachend von einer sequentiellen Bearbeitung der Werkstücke innerhalb der Linie ausgehen zu können.

nicht gewünscht wird. Der Fokus der weiteren Betrachtung liegt folglich auf den Stationen eins bis sechs. Aus Vollständigkeitsgründen wurden obige Aspekte jedoch in die Analyse der Ausgangssituation mit aufgenommen.

Aus den Zykluszeiten der starr verketteten Multi-Model-Linie ergeben sich die Wartezeiten je Werkstück, für jede Variante berechnet, vor allen Stationen der Fertigungslinie wie folgt¹⁸⁴:

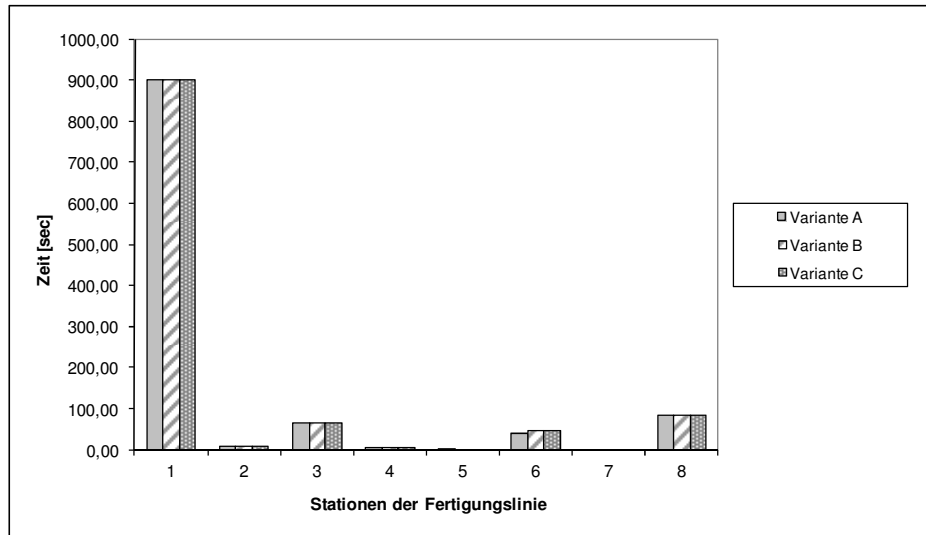


Abbildung 6.3: Verteilung der **Wartezeiten** vor den Stationen je Variante

Offensichtlich besteht keine gleichmäßige Auslastung bei den jeweiligen Komponenten der Fertigungslinie. Dies wird anhand der quantifizierten Verteilungen der Zyklus- und Wartezeiten eines Werkstücks an/vor den Stationen transparent.

Neben den beschriebenen operativen Defiziten, sind weiterhin die dadurch verursachten Folgekosten zu beleuchten. Die aktuelle Ausprägung der technologischen und organisatorischen Systemparameter führt zu zusätzlichen Betriebskosten, wie bspw. Instandhaltungsaufwendungen, Fremdbezugskosten, Rüst- und Lagerkosten etc. Es gilt jedoch bzgl. der notwendigen Optimierungen folgende beispielhafte Fragestellungen abzuwägen¹⁸⁵:

- Soll eine Steigerung der Ausbringungsmenge durch eine weitere Ausweitung der Betriebszeiten und damit kostenintensive Sonderschichten an Wochenenden und Feiertagen ermöglicht werden, oder ist ein entsprechender Fremdbezug kostengünstiger?
- Kann eine Reduktion der Linien-Taktzeit, als weiteren Stückzahlstellhebel, durch Auslastungsglättung¹⁸⁶, Rüst- oder Störzeitminimierungen herbei geführt werden?
- Soll die bei einer Rüstzeitminimierung „gewonnene Zeit“ verwendet werden, um die Rüstfrequenz zu erhöhen oder zusätzliche Produktionszeit zu erhalten?
- In erst genanntem Fall gilt es, reduzierte Lagerkosten erhöhten Rüstaufwendungen gegenüber zu stellen.
- Bei letzt genanntem ist fraglich, inwiefern die erhöhten Rüstkosten die minimierten Fremdbezugskosten kompensieren?

¹⁸⁴ Der Ausreißer vor Station eins lässt sich durch die Wartezeiten eines Werkstücks auf dem Zuführband erklären.

¹⁸⁵ Nachfolgende Auflistung umfasst daher nicht alle konträren Wirkmechanismen der Betriebskosten sowie der damit einhergehenden Dimensionierung der technologischen und organisatorischen Systemparameter. Der Autorin ist es vielmehr ein Anliegen, an dieser Stelle Beispiele operativer Defizite zu veranschaulichen. Eine vollständige Behandlung aller Fragestellungen wird hingegen durch das Optimierungsmodell gewährleistet.

¹⁸⁶ Im Sinne einer Stationsaustaktung und damit Reduzierung der aktuell taktgebenden Engpass-Zykluszeit

Zusammengefasst sind obige Fragestellungen¹⁸⁷ durch die Anwendung der entwickelten Methodik zu beantworten. Die Ergebnisse des Evaluationsmodells diskutieren auf Basis der Lean-Metriken folglich, inwiefern das Fertigungssystem die Prinzipien der schlanken Produktion auf Basis der aktuellen Ausprägung der technologischen und organisatorischen Systemparameter erfüllt. Im Rahmen des Optimierungsmodells sind hingegen die Systemparameter im Rahmen ihrer Restriktionen zu dimensionieren, um einen kostengünstigeren¹⁸⁸ Betrieb der Fertigungslinie zu ermöglichen.

6.2 Ergebnisse des Evaluationsmodells

Der oben beschriebene Bereich wurde zunächst einer Bewertung durch das Evaluationsmodell unterzogen. Die in diesem Zusammenhang benötigten Eingangsdaten werden durch eine webbasierte Datenbank erfasst, welche auf den Aufzeichnungen des CNC-Programms und der speicherprogrammierbaren Steuerung¹⁸⁹ basiert. Manuelle Zeiterfassungen durch die Arbeitswirtschaft dienen der Verifikation sowie Plausibilisierung der im System generierten Daten.

Auf Basis der Rohdaten¹⁹⁰, erfolgt in Excel die jeweilige Berechnung der Tertiärfaktoren sowie die Ableitung der Lean-Metriken, deren Ergebnis den jeweils nachfolgenden Tabellen zu entnehmen ist.

Tabelle 6.3: Ableitung der Lean-Metrik Fluss

Systemparameter	Wert [sec]	Tertiärfaktor	Wert [sec]	Lean-Metrik	Wert
Bearbeitungszeit	419,75	Zykluszeit	442,92	Fluss	0,01%
Nebenzeit	23,17				
Rüstzeit	1,21				
Transportzeit	757,32				
Störzeit	20,56				
Wartezeit	1.107,02	Liegezeit	2.807.842,86		
Verweilzeit	2.806.715,28				
		Durchlaufzeit	2.809.044,31		

Das Ergebnis des Flussfaktors in Höhe von 0,01% ist auf das Verhältnis einer kumulierten, wertschöpfenden Bearbeitungszeit über alle Stationen von ca. sieben Minuten, zu einer Durchlaufzeit von 32 Tagen je Werkstück durch das Fertigungssystem zurück zu führen. Dies bedeutet, dass lediglich 0,01% der Durchlaufzeit zur tatsächlichen Wertsteigerung am Produkt beitragen. Während die anteiligen Nebenzeiten, Transport-, Rüst-, Stör- und Wartezeiten nur zu einer marginalen Erhöhung der Durchlaufzeit führen, beträgt die Verweil- bzw. Liegezeit im Warenein- und Ausgangslager kumuliert 31 Tage.

Tabelle 6.4: Ableitung der Lean-Metrik Takt

Systemparameter	Wert [sec]	Tertiärfaktor	Wert [sec]	Lean-Metrik	Wert
Zykluszeit max	69,45	Takt Linie	91,22	Takt	90,51%
Rüstzeit	1,21				
Störzeit	20,56				
Bruttoprod.zeit	24.475.500,00	Takt Kunde	83,31		
Pausen	2.377.500,00				
Nettoprod.zeit	22.098.000,00				

¹⁸⁷ Und weitere

¹⁸⁸ Im Sinne von kostenminimiert

¹⁸⁹ SPS

¹⁹⁰ Diese repräsentieren die werkstückbezogene Ausprägungen der technologischen und organisatorischen Systemparameter. Weiterhin entsprechen sie der untersten Ebene der Lean-Kennzahlenpyramide und folglich den Quartärfaktoren.

Eine wesentlich höhere prozentuale Ausprägung in Höhe von 90,51% findet sich in der Lean-Metrik Takt wieder. Konkret drückt sich dies in einem Linientakt von 91,22 Sekunden versus eines Kundentakt von 83,31 Sekunden aus. Durchschnittlich¹⁹¹ fordert die Achsmontage¹⁹² damit ein Werkstück alle 83 Sekunden. Die Linie fertigt jedoch nur alle 91 Sekunden ein weiteres Werkstück. Diese Aussage ist damit konform zu der bereits in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Problematik der nicht-Erfüllung des Kundenbedarfs. Das Delta zwischen Linien- und Kundentakt, bezogen auf ihre jeweils absoluten Werte, resultiert, gemäß der zugrunde gelegten Formel, in einer Abweichung von 9,5%. Während die Lean-Metrik Fluss die prozentuale Wertschöpfungszeit an der gesamten Durchlaufzeit wieder spiegelt, liegt der Aussagefokus der Metrik Takt auf der Überprüfung der Erfüllung der Kundenanforderungen. Erst genannte Metrik beschreibt folglich **wie** der Fertigungsprozess unter den Aspekten der schlanken Produktion erfolgt, letzter genannte hingegen das **Resultat**. Da das Resultat durch das „wie“ maßgeblich determiniert wird, sind in beiden Metriken die Teilmengen der Systemparameter Zyklus-, Rüst- und Störzeiten identisch inkludiert. Abweichungen finden sich hingegen bzgl. der Systemparameter Transport-, Warte- und Verweilzeiten, welche nicht in den Takt einfließen.

Tabelle 6.5: Ableitung der Lean-Metrik Volumenflexibilität

Systemparameter	Wert [sec/St.]	Tertiärfaktor	Wert [St.]	Lean-Metrik	Wert
Bruttoprod.zeit	24.475.500,00			Volumenflexibilität	60,96%
Pausen	2.377.500,00				
Nettoprod.zeit	22.098.000,00				
Takt Linie	91,22	Prod.volumen	242.257,00		
Kundenbedarf	265.240,00				
Nettoprod.zeit max	29.565.000,00				
Takt Linie min	91,22	Prod.volumen max	324.117,00		

Eine Erweiterung der Metrik Takt stellt die Volumenflexibilität dar. Zusätzlich zu der anforderungsbezogenen Überprüfung der Ausbringungsmenge, wird der Aspekt der zusätzlich¹⁹³ verfügbaren Stückzahlkapazität integriert. Das Ergebnis lässt sich mit 60,96% beziffern, d.h. aktuell ist die Linie zu rund 61% volumenflexibel. Handlungsbedarf zeigt sich ebenfalls im Bereich der Variantenflexibilität. Aufgrund einer durchschnittlichen Rüstzeit von 5,5 Stunden sowie einer durchschnittlichen Losgröße von ca. 16.400 Werkstücken, ist die Anzahl der durchführbaren Rüstvorgänge im Betrachtungsintervall auf zwölf limitiert. Damit ist die Fähigkeit der Linie zur Fertigung in Losgröße eins¹⁹⁴ aktuell nicht gegeben, wodurch eine Variantenflexibilität in Höhe von 0,32% resultiert.

Tabelle 6.6: Ableitung der Lean-Metrik Variantenflexibilität

Systemparameter	Wert [St./sec]	Tertiärfaktor	Wert [-]	Lean-Metrik	Wert
Losgröße	16.428,00	Rüstvorgänge	12,00	Variantenflexibilität	0,32%
Anzahl Varianten	3,00				
Zyklus Losgröße 1	10.902,96				
Zyklus Prod.volumen	13.689.762,59	Rüstvorgänge ideal	3.766,00		

¹⁹¹ Über alle Varianten

¹⁹² Als interner Kunde

¹⁹³ theoretisch

¹⁹⁴ Diese repräsentiert den Idealfall einer zu 100% variantenflexiblen Linie.

Tabelle 6.7: Ableitung der Lean-Metrik stationäre Stabilität

Systemparameter	Wert [sec]	Tertiärfaktor	Wert [-]	Lean-Metrik	Wert
Zykluszeit max (A)	69,26			stationäre Stabilität	38,88%
Zykluszeit min (A)	27,00	Stabilität (A)	0,39		
Zykluszeit max (B)	72,14				
Zykluszeit min (B)	27,00	Stabilität (B)	0,37		
Zykluszeit max (C)	72,14				
Zykluszeit min (C)	27,00	Stabilität (C)	0,37		

Im Kontext der stationären Stabilität, d.h. der Abweichungen der Zykluszeiten **zwischen** den **Stationen** bei der Fertigung **eines Werkstückes**, liegen entsprechend hohe Differenzen vor¹⁹⁵. Konkret beträgt die prozentuale Ausprägung der Metrik 38,88%. Dies bedeutet, dass aufgrund der unterschiedlichen Bearbeitungsumfänge an den jeweiligen Stationen, sowie die damit einhergehenden Zykluszeiten, eine Stabilität¹⁹⁶ von lediglich 39% gegeben ist. Zykluszeit-Schwankungen, welche durch die Abweichung der Bauteilgeometrie **zwischen** den **Varianten** innerhalb **einer Station** induziert werden, liegen hingegen in einem solch geringen Bereich, dass eine variantenspezifische Stabilität von 98,71% resultiert.

Tabelle 6.8: Ableitung der variantenspezifischen Stabilität

Systemparameter	Wert [sec]	Tertiärfaktor	Wert [-]	Lean-Metrik	Wert
Zykluszeit max (1)	53,05			Variantenstabilität	98,71%
Zykluszeit min (1)	51,45	Stabilität (1)	0,97		
Zykluszeit max (2)	55,45				
Zykluszeit min (2)	55,10	Stabilität (2)	0,99		
Zykluszeit max (3)	56,75				
Zykluszeit min (3)	55,75	Stabilität (3)	0,98		
Zykluszeit max (4)	58,50				
Zykluszeit min (4)	58,15	Stabilität (4)	0,99		
Zykluszeit max (5)	60,95				
Zykluszeit min (5)	60,75	Stabilität (5)	1,00		
Zykluszeit max (6)	72,14				
Zykluszeit min (6)	69,26	Stabilität (6)	0,96		

Unterstützend dient weiterhin die Visualisierung der singulären Ausprägungen der Lean-Metriken im Spinnennetzdiagramm:

¹⁹⁵ Vgl. hierzu auch Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6

¹⁹⁶ Im Sinne einer gleichmäßigen Auslastung

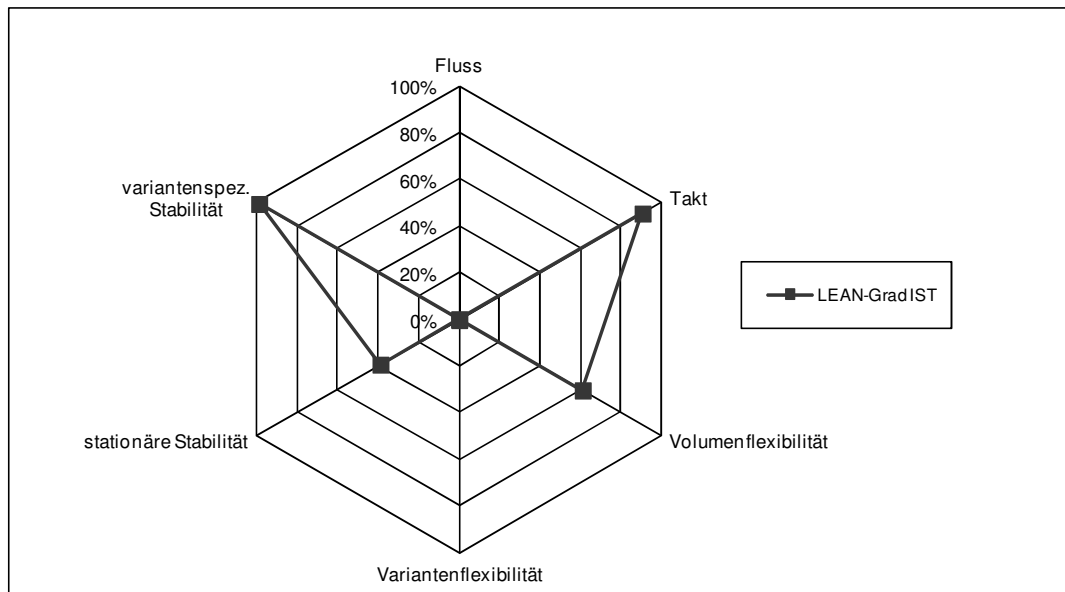


Abbildung 6.4: Visualisierung der singulären Lean-Metriken (IST) im Spinnennetzdiagramm

Auf Basis der logistischen Wachstumstransformation und Berechnung des arithmetischen Mittels, wurde im ersten Anwendungsfall ein Lean-Grad in Höhe von 49,61% berechnet. Das Fertigungssystem erfüllt damit, zusammenfassend, zu rund 50% die Prinzipien der schlanken Produktion.

Tabelle 6.9: Ergebnisse der Lean-Metrik Berechnungen, deren Transformation sowie Aggregation zum Lean-Grad

Lean-Metrik	IST	Transformation -	
		logistisches Wachstum	prozentuale Ausprägung
Fluss	0,01%	0,0180	1,80%
Takt	90,51%	0,9624	96,24%
Volumenflexibilität	60,96%	0,7062	70,62%
Variantenflexibilität	0,32%	0,0184	1,84%
stationäre Stabilität	38,88%	0,2912	29,12%
variantenspez. Stabilität	98,71%	0,9801	98,01%
Lean-Grad:	49,61%		
arithmetisches Mittel der Transformation			

Bzgl. der Werte-Transformation gemäß der logistischen Wachstumsfunktion ist Folgendes zu beachten:

$$\lim_{x \rightarrow 0} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{g}{2} * \operatorname{tanhyp}(k * (x - w) + 1) = 0,017 \quad \text{für } x \rightarrow 0 \quad (6-1)$$

Mit

$$g = 1$$

$$k = 4$$

$$w = 0,5$$

Folglich werden Metrik-Ausprägungen¹⁹⁷ $\leq 0,01799$ auf diesen Wert transformiert, d.h. anstelle einer regulären Minimierung des Wertes¹⁹⁸, folgt dessen Erhöhung auf 0,018. Damit beinhaltet obige Transformation einen Bruch in der zugrunde gelegten Logik. Diese Unschärfe gilt es zu erwähnen, dennoch wird diese im Zuge der Harmonisierung der singulären Lean-Metriken als akzeptabel erachtet.

Auf Basis des Evaluationsmodells sollen nun adäquate Anreize gesetzt werden, um eine Optimierung der technologischen und organisatorischen Systemparameter und folglich eine Minimierung der Betriebskosten herbei zu führen.

6.3 Ergebnisse des Optimierungsmodells

6.3.1 Nichtlineare Struktur des Optimierungsmodells und Lösungsgenerierung

Das in Kapitel 5.3 entwickelte Optimierungsmodell beinhaltet nichtlineare Kostenfunktionen als Komponenten der Zielfunktion. Beispielhaft kann hierfür die Rüstkostenfunktion angeführt werden:

$$\min c_{Rüsten,I,WS} = \left(\frac{RZ_I * f_{Maschbel} + \frac{RZ_I}{(ZZ_{\max,i,WS} + SZ_{WS})} * f_{Gewinn}}{x_{L,I}} \right) \quad (6-2)$$

Diese lässt sich wiederum anhand der Entscheidungsvariablen a, b, c, d und e sowie der Konstanten K1, K2 und K3 wie folgt abstrahieren:

$$\min c_{Rüsten,I,WS} = \left(\frac{a * K1 + \frac{a}{(K2 + b + c + d)} * K3}{e} \right) \quad (6-3)$$

Der dadurch generierte „Grad an Nichtlinearität“ des Modells verhindert jedoch dessen automatisiertes Lösen mit bis dato vorhandenen Lösungsalgorithmen¹⁹⁹. Vor diesem Hintergrund umfasst das weitere methodische Vorgehen im Zuge der Lösungsgenerierung folgende Schritte:

- Transformation der Stückkostenfunktionen zu Gesamtkostenfunktionen, wodurch insbesondere Hyperbelfunktionen linearisiert werden.
- Anwendung des „quadratic programming“, d.h. mathematische Umformulierungen zur Generierung quadratischer Funktionen, welche durch vorhandene Algorithmen automatisiert gelöst werden können. Konkret gestaltet sich die Umformulierung bzw. Substitution der nicht-linearen Funktion $a * b$ wie folgt:

$$a * b = c^2 - d^2 \quad (6-4)$$

¹⁹⁷ Hiervon sind im konkreten Fall die Lean-Metriken Fluss und Variantenflexibilität betroffen.

¹⁹⁸ Welche aufgrund ihrer Ausprägung $\leq 0,5$ und damit unterhalb des Wendepunktes gefordert wird.

¹⁹⁹ Bzw. Solvern

Mit

$$c = \frac{a+b}{2} \quad (6-5)$$

$$d = \frac{a-b}{2} \quad (6-6)$$

- Weiterhin müssen vereinfachende Annahmen, durch die sogenannte Fixierung primärer Entscheidungsvariablen, getroffen werden. Diese werden im weiteren Verlauf als konstante Eingangsgrößen des Optimierungsmodells erfasst:

$AGR V_I$	Anzahl der geplanten Rüstvorgänge im Betrachtungsintervall
$x_{T,I}$	durchschnittliche Transportlosgröße im Intervall
TZ_i	Transportzeit vom Lager zur Fertigungslinie je Transportvorgang
TZ_{Lager}	Transportzeit von der Fertigungslinie zum Lager je Transportvorgang
PWI_{SH}	Zeit für geplante Pausen, Wartung und Instandhaltung je Schicht

Damit resultiert ein lineares, gemischt-ganzzahliges Optimierungsmodell, welches mit Unterstützung des sogenannten Simplex-Algorithmus gelöst werden kann²⁰⁰.

Im Zuge der Lösungsgenerierung wurde weiterhin ein Softwareprototyp entwickelt, welcher auf der Optimierungssoftware *IBM ILOG OPL Studio 6.3* sowie *Microsoft Excel* basiert. Dieser lässt sich prinzipiell in zwei voneinander abhängigen Modulen beschreiben. Ein Modul bildet die Bewertung, welche die erforderlichen Rohdaten in Excel beinhaltet. Das zweite Modul besteht hingegen aus dem Kosten-/Optimierungsmodell. Im Bewertungsmodul werden die Daten gemäß der in Abschnitt 6.2 erläuterten Herangehensweise, zur Berechnung der Lean-Metriken heran gezogen und zum Lean-Grad aggregiert. Das Optimierungsmodul greift wiederum auf die Eingangsparameter der Excel-Datei zurück und erzeugt die Optimierungsergebnisse mit Hilfe von OPL Studio²⁰¹. Nachfolgende Abbildung veranschaulicht diese Funktionsweise erneut:

²⁰⁰ Auf eine erneute detaillierte Darstellung der Eingangsgrößen, Entscheidungsvariablen, Zielfunktion und Nebenbedingungen soll an dieser Stelle verzichtet werden. Diesbzgl. wird auf den Anhang verwiesen. Vielmehr soll der Fokus in diesem Abschnitt auf der Problematik der nicht-linearen Struktur sowie potentieller Lösungsoptionen für die weitere Validierung liegen.

²⁰¹ OPL Studio liest die für die Optimierung erforderlichen Daten aus und schreibt diese wieder in Excel, wodurch eine erneue Bewertung und damit Ableitung des Lean-Grad erfolgen kann.

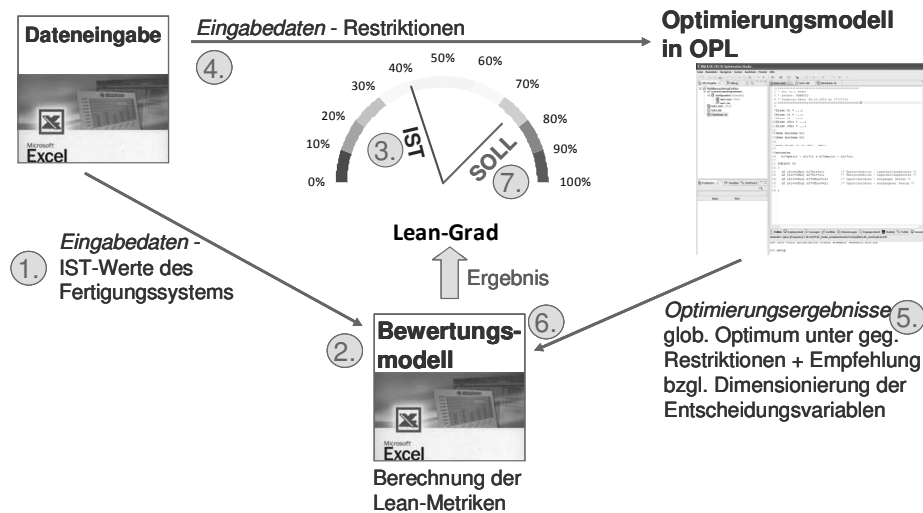


Abbildung 6.5: Prototypische Implementierung - Visualisierung und softwaretechnische Realisierung des Gesamtkonzepts

Das Optimierungsmodell selbst wird durch die Modellierungssprache OPL in entsprechender Syntax formalisiert. OPL Studio beinhaltet weiterhin die Ausführungskonfiguration des Solvers (Cplex), sowie die Modell- und Datendatei.

6.3.2 Ergebnisse aus der Kostenoptimierung

Für die Ableitung der Betriebskosten, sowohl für den aktuellen Systemzustand der Fertigungslinie als auch nach deren Optimierung, wird nachfolgend eine Übersicht der erforderlichen Kostensätze²⁰² gegeben.

Der *Maschinenbelegungskostensatz* wird mit 40 €/h veranschlagt. Dieser ist als Teilmenge des Maschinenstundensatzes zu interpretieren und inkludiert diejenigen Fertigungsgemeinkosten, welche während eines Rüstvorgangs der Maschine anfallen²⁰³. Für die Berechnung von Opportunitätskosten wird weiterhin ein *Gewinnsatz* je Werkstück benötigt. Wenn das Werkstück, unmittelbar nach dessen Bearbeitung in der Fertigungslinie, an einen externen Marktteilnehmer verkauft wird, muss der dadurch erzielbare Gewinn zugrunde gelegt werden. Da es sich im Anwendungsfall um einen internen Kunden handelt, werden hierfür wiederum *interne Verrechnungspreise*²⁰⁴ benötigt. Bereinigt um die *Herstellkosten* je Werkstück, resultiert der dadurch erzielbare Gewinn in Höhe von 10,64 €/Werkstück. Für den Kontext der Bestandskosten wird ein *kalkulatorischer Zinssatz*²⁰⁵ von acht % angenommen. Der reine *Materialwert* eines Werkstücks²⁰⁶ wird mit 6,50 €/Werkstück veranschlagt. Der *variable Lagerkostensatz* für den tatsächlichen Flächenbedarf und das Handling, wird mit 0,03 €/Werkstück beziffert. Unter der Annahme, dass alle Transportvorgänge vom Wareneingangslager zur Fertigungslinie und zurück zum Warenausgangslager durch einen externen Dienstleister getätigt werden, resultieren ausschließlich variable Kosten für Personal und Betriebsmittel in Abhängigkeit der Inanspruchnahme. Konkret wird ein *Transport-Betriebsmittelkostensatz* von 25 €/h und ein *Transport-Personalkostensatz* in Höhe von 50 €/h angenommen. Der *Instandhaltungskostensatz* für unterstützendes Personal und Betriebsmittel einer anderen Kostenstelle beträgt weiterhin 75 €/h. Im Kontext des Fremdbezugs wird ein *Fremdbezugskostensatz* von 54 €/Werkstück zugrunde gelegt. Dieser beinhaltet auch die

²⁰² Gemäß den in Kapitel 5.3.1 definierten Kostenfunktionen

²⁰³ Z.B. Energie- und Werkzeugkosten

²⁰⁴ Im Sinne fiktiver „Markt-Verkaufspreise“

²⁰⁵ Auf das im Lager gebundene Kapital

²⁰⁶ Dieser entspricht dem Rohmaterialwert vor dem Eingang in die Fertigungslinie und damit dem Verrechnungspreis des internen Lieferanten.

Kosten für Logistik, Disposition und Qualitätssicherung, welche in diesem Zusammenhang separat anfallen. Vereinfachend wird obiger Fremdbezugskostensatz, unabhängig von der tatsächlichen Fremdbezugsmenge, als konstant erachtet²⁰⁷. Die *Zuschläge* für Spät-, Nacht- und Sonderschichten an Wochenenden und Feiertagen variieren zwischen 30% und 200%. Es wird davon ausgegangen, dass zunächst in 15 Schichten an fünf Wochentagen gearbeitet wird, bevor eine Ausweitung der Betriebszeit auf das Wochenende erfolgt. Die damit einhergehenden Zuschläge sind entsprechend dieser Logik im Modell verankert.

Auf dieser Basis werden nun die Betriebskosten im Betrachtungsintervall, entsprechend der aktuellen Dimensionierung der technologischen und organisatorischen Systemparameter, berechnet. Eine Gegenüberstellung dieser mit den Ergebnissen des (vereinfachten) Optimierungsmodells findet sich in der nachfolgenden Tabelle.

Tabelle 6.10: Vergleich der Betriebskosten vor (IST) und nach der Optimierung (SOLL)

Kostenparameter	IST		SOLL	
	€/WS	€	€/WS	€
Rüstkosten	0,22	42.833,06	0,12	31.123,00
Bestandskosten	0,14	28.563,64	0,13	34.975,00
Folgekosten des Bestands	0,04	8.569,09	0,04	10.493,00
Transportkosten	0,04	7.800,00	0,04	10.360,00
Folgekosten des Transports	0,01	1.560,00	0,01	2.071,10
Instandhaltungskosten	3,47	684.810,16	2,17	575.150,00
Variabilitätskosten	3,24	639.254,37	0,00	2,56
fixe Maschinenkosten	5,74	1.132.325,50	4,27	1.132.325,50
variable Maschinenkosten	1,20	235.594,82	1,20	318.270,00
Produktionsmengenkosten	18,66	3.678.102,00	0,00	864,00
Überproduktionskosten	0,00	0,00	0,00	0,00
Fremdbezugskosten	18,66	3.678.102,00	0,00	864,00
variable Kosten der Organisation	0,18	34.560,00	0,01	3.456,00
Gesamtkosten		6.493.972,64		2.119.090,16
Stückkosten (€/WS)	32,94		7,99	

Prinzipiell umfasst die Ergebnisdarstellung sowohl kumulierte Stückkosten als auch Gesamtkosten, welche sich jeweils additiv aus den singulären Kostenparametern ergeben. Der Zusammenhang zwischen den Stück- und Gesamtkosten ist, abhängig von der Produktionsmenge der Fertigungslinie, linearisiert dargestellt²⁰⁸. So steigen bspw. die Gesamtkosten des Bestands nach der Optimierung²⁰⁹, bzgl. der Stückkosten ist jedoch eine Reduktion zu verzeichnen. Folglich werden die erhöhten Gesamtkosten durch eine gesteigerte Ausbringungsmenge kompensiert. Als maßgeblich sind daher die Gesamtkosten²¹⁰ definiert. Die werkstückbezogene Ausprägung der Betriebskosten dient daher lediglich der Veranschaulichung der Ergebnisse.

²⁰⁷ Tatsächlich variiert dieser in Abhängigkeit der Abnahmemenge bzw. aufgrund von Skaleneffekten. Die dadurch entstehende Komplexität erzeugt jedoch einen weiteren Schwierigkeitsgrad (nicht-Linearität) im Optimierungsmodell, welcher nicht weiter fokussiert werden soll.

²⁰⁸ So können auch die fixen Maschinenkosten im Zuge des Optimierungsmodells nicht minimiert werden und sind für beide Systemzustände identisch aufgeführt. Diese Annahme ist aufgrund der in der Realität zu berücksichtigender Skaleneffekte nicht belastbar.

²⁰⁹ Eine ausführliche Erläuterung auf Basis der neu dimensionierten Systemparameter findet sich im weiteren Verlauf des Abschnitts.

²¹⁰ Wie bereits in Kapitel 6.3.1 ausführlich erläutert

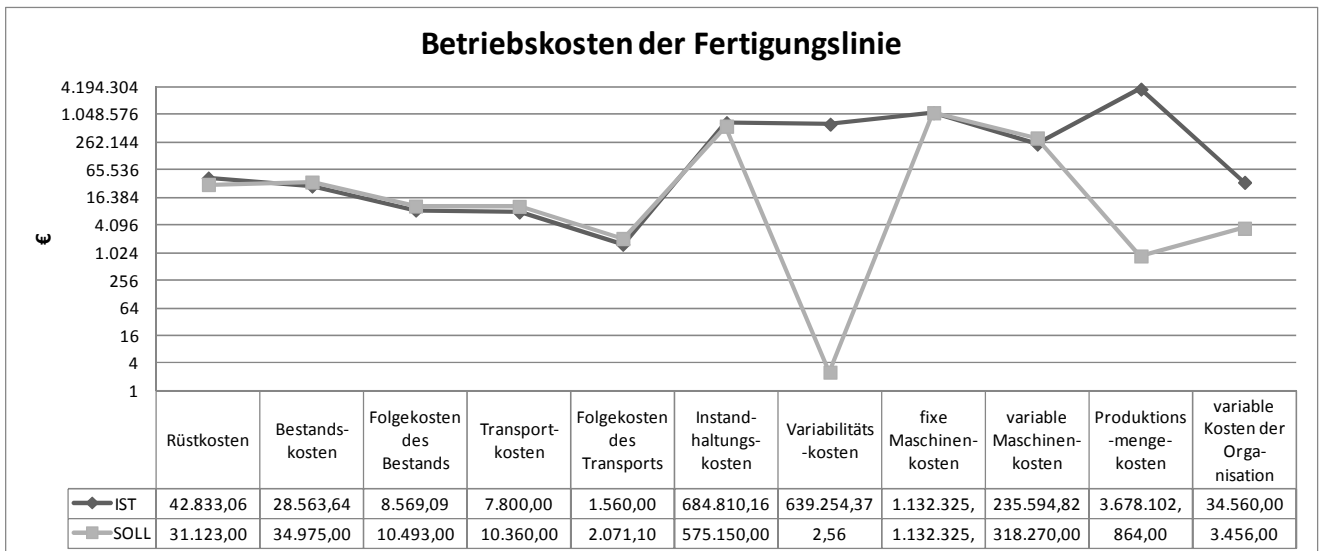


Abbildung 6.6: alternative (grafisch visualisierte) Darstellung der Ergebnisse des Optimierungsmodells im Vergleich zu den aktuellen Betriebskosten

Die signifikante Reduktion der Gesamtkosten wird grundsätzlich durch die Vereinfachung des Optimierungsmodells ermöglicht. Aufgrund der Reduktion der Anzahl an Entscheidungsvariablen sowie der damit einhergehenden Fixierung²¹¹ einer Teilmenge dieser, können die kostenrelevanten Auswirkungen auf die Optimierung folgender technologischer und organisatorischer Systemparameter reduziert werden:

- Die **Rüstkosten** werden durch die Reduktion der Rüstzeit je Rüstvorgang minimiert. Da die Anzahl der Rüstvorgänge jedoch konstant bleibt, wird die dadurch gewonnene Zeit als zusätzlich verfügbare Produktionszeit verwendet.
- Die damit induzierte Erhöhung der Ausbringungsmenge führt bei einer Konstanz der Anzahl an Rüstvorgängen wiederum zu einer Steigerung der Losgröße. Diese impliziert eine Erhöhung des durchschnittlichen Lagerbestands und damit erhöhte **Bestandskosten**.
- Die **Folgekosten des Bestands** wurden als empirischer Faktor der Bestandskosten ermittelt, weshalb eine analoge Steigerung zu beobachten ist.
- Die Maximierung der Ausbringungsmenge (und Losgröße) führt zu erhöhten Transportaufwendungen, welche sich entsprechend in den **Transportkosten** niederschlagen.
- Bzgl. der **Folgekosten des Transports** gilt dieselbe Logik, welche bereits im Rahmen der Folgekosten des Bestands erläutert wurde.
- Die Maschinenstillstandzeiten²¹² und folglich die **Instandhaltungskosten** werden auf eine reale Untergrenze minimiert, welche aus entsprechenden Linien-/Anlagenvergleichen resultiert²¹³. Präventive bzw. geplante Instandhaltungsintervalle werden jedoch nicht reduziert. Eine Minimierung wird insbesondere durch folgende Maßnahmen erzielt:
 - ➔ Erhöhung der Werkzeugstandzeiten durch eine verbesserte Werkzeug-Wechselstrategie
 - ➔ Optimierte Späneabfuhr und damit Vermeidung von Werkzeugbrüchen

²¹¹ Im Sinne konstanter Eingangsgrößen

²¹² Bzw. Instandhaltungszeiten

²¹³ Analog wurde im Zusammenhang der Rüstzeitreduzierung verfahren.

- Die Minimierung der Rüst- und Instandhaltungsaufwendungen sowie die dadurch erhöhte Maschinenverfügbarkeit, werden für eine ausschließliche Steigerung der Ausbringungsmenge verwendet.
- Eine signifikante Reduktion ist im Kontext der **Variabilitätskosten** zu beobachten. Durch die Minimierung nicht wertschöpfender Nebenzeiten²¹⁴, wird bei konstanten Bearbeitungszeiten, ein angleichen der Zykluszeiten zwischen den Stationen ermöglicht. Dadurch erfolgt eine Austaktung mit dem Ziel der Auslastungsglättung, ohne jedoch Prozessschritte zwischen den Stationen zu verschieben²¹⁵. Konkrete Maßnahmen umfassen hierbei die Minimierung der Anzahl an Werkzeugwechseln durch eine entsprechende Änderung der Bearbeitungsreihenfolge²¹⁶ sowie optimierte Verfahrenwege der Spindel.
- Weiterhin führt die Reduktion der Zykluszeit an der Engpassstation zu einem erneuten Stellhebel für eine Steigerung der Ausbringungsmenge.
- Die **variablen Maschinenkosten** sind in Abhängigkeit der gefertigten Stückzahl per Definition erhöht.
- Die zuvor angeführten Stellhebel der Stückzahlsteigerung²¹⁷ führen zu einer drastischen Reduktion des erforderlichen Fremdbezugs und einer fast vollständigen Eliminierung der **Fremdbezugskosten**.
- Damit kann auch auf teure Sonderschichten an Wochenenden und Feiertagen verzichtet werden, weshalb die korrelierenden **variablen Kosten der Organisation** entsprechend minimiert werden.

Zusammenfassend wird die Gesamt-Kostenerhöhung einiger Parameter durch die signifikante Reduktion anderer kompensiert, so dass eine deutliche Minimierung der Betriebskosten im Vergleich zum aktuellen Systemzustand erzielt werden kann. Aus technologischer Sicht sind hierfür die Systemparameter Rüst-, Stör- und Zykluszeiten relevant. Organisatorisch sind hingegen die Losgröße sowie die Anzahl der Schichten und Pausenzeiten maßgebend²¹⁸. Konkrete Maßnahmen verifizieren weiterhin die optimierte Dimensionierung der Entscheidungsvariablen.

6.3.3 Transformation der Ergebnisse auf das Evaluationsmodell

Werden die optimal dimensionierten Entscheidungsvariablen in das Evaluationsmodell exportiert, resultiert ein optimierter Lean-Grad, wie nachfolgender Tabelle zu entnehmen ist:

²¹⁴ Insbesondere mit dem Fokus auf der aktuellen Engpassstation

²¹⁵ Diese Vorgehensweise grenzt sich damit zur konventionellen Austaktung ab, welche die Verschiebung von Prozessschritten fokussiert.

²¹⁶ Der aktuelle Systemzustand beinhaltet bspw. die Bearbeitungsvorgänge Fräsen mit Werkzeug A, Bohren mit Werkzeug B und ein erneutes Fräsen mit Werkzeug A. Der optimierte Zustand gruppiert alle Bearbeitungsvorgänge eines Werkzeuges (sofern sie mit dem Vorranggraphen konform sind), wodurch zeitaufwendige Werkzeugwechselzeiten vermieden/minimiert werden.

²¹⁷ Rüst- und Störzeitreduktion sowie Zykluszeitminimierung an der Engpassstation

²¹⁸ Weitere Details hinsichtlich der konkreten Ausprägung der technologischen und organisatorischen Systemparameter nach deren Optimierung finden sich in Kapitel 6.4.

Tabelle 6.11: Vergleich der Ergebnisse des Evaluationsmodells vor und nach der Optimierung

Lean-Metrik	IST	Transformation - logistisches Wachstum	OPTIMIERT	Transformation - logistisches Wachstum
Fluss	0,01%	0,0180	0,02%	0,0180
Takt	90,51%	0,9624	97,33%	0,9778
Volumenflexibilität	60,96%	0,7062	99,99%	0,9820
Variantenflexibilität	0,32%	0,0184	0,24%	0,0183
stationäre Stabilität	38,88%	0,2912	41,26%	0,3320
variantenspez. Stabilität	98,71%	0,9801	94,86%	0,9731
Lean-Grad: arithmetisches Mittel der Transformation	49,61%		55,02%	

Nachfolgende Abbildung dient der visuellen Darstellung der entsprechenden Veränderungen.

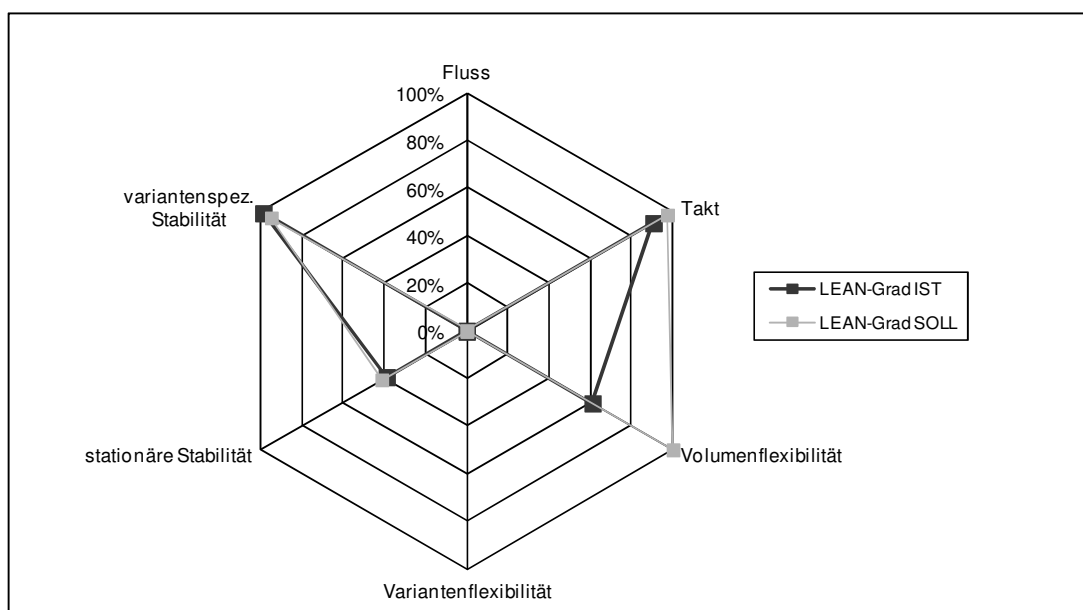


Abbildung 6.7: Visualisierung der Ausprägung der Lean-Metriken vor und nach der Optimierung

Auf eine erneute detaillierte Ableitung der Lean-Metriken²¹⁹ wird an dieser Stelle verzichtet. Folgende verbale Ausführungen werden hierfür als ausreichend erachtet.

Hinsichtlich des **Fluss-Faktors** ist eine minimale Steigerung auf 0,02%-Punkte zu beobachten. Diese ist im Wesentlichen auf eine reduzierte Verweildauer im Warenausgangslager zurück zu führen. Zwar erhöht sich der Bestand dort aufgrund einer Steigerung der durchschnittlichen Losgröße, die Reduktion der Nettoproduktionszeit im Intervall bewirkt jedoch eine Verringerung des Kundentaktes und kompensiert die Nachteile der Losgrößensteigerung. Die positive Korrelation zwischen den Lean-Metriken **Takt** und **Volumenflexibilität** bestätigt sich erneut in einer Erhöhung beider prozentualer Ausprägungen. Durch die Reduktion der Zykluszeit an der Engpassstation sowie der anteiligen Rüst- und Störzeiten, nähert sich der Linientakt dem Kundentakt an. Weiterhin impliziert die signifikante Steigerung der Ausbringungsmenge auf die Höhe des Kundenbedarfs, eine ausgeprägte Volumenflexibilität der Linie. Die **Variatenflexibilität** erfährt hingegen eine Reduktion auf 0,24%-Punkte. Da die Anzahl der Rüstvorgänge vereinfachend fixiert wurden, sich die Anzahl der optimalen Rüstvorgänge aufgrund einer Steigerung der Ausbringungsmenge erhöhen, resultiert eine reduzierte

²¹⁹ Wie in Kapitel 6.2

Verhältniskennzahl. Die **stationäre Stabilität** ist durch die Minimierung von Nebenzeiten²²⁰ und folglich durch die Glättung der Zykluszeiten zwischen den Stationen erhöht. Dieser Sachverhalt geht jedoch zu Lasten der Zykluszeit-Abweichungen zwischen den Varianten innerhalb einer Station²²¹, weshalb eine reduzierte **variantenspezifische Stabilität** in Höhe von 94,7% resultiert.

Die neutralen, synergetischen aber auch konträren Zielwirkungen der Entscheidungsvariablen spiegeln sich, wie oben angeführt, in den Ergebnissen der Lean-Metrik-Ausprägungen wieder. Dennoch führen die optimierten technologischen und organisatorischen Systemparameter zu einem erhöhten Lean-Grad, d.h. zu einer verbesserten Erfüllung der Prinzipien der schlanken Produktion durch das Fertigungssystem. Analog zu den Ergebnissen des Kostenmodells, korreliert die Optimierung des Lean-Grad nicht mit einer erhöhten Ausprägung aller Sub-Kennzahlen²²². Damit entspricht auch die Summe des Gesamtoptimums nicht der Summe der Einzeloptima. Grundsätzlich wurde jedoch die positive Korrelation zwischen minimierten Betriebskosten und einem erhöhten Lean-Grad verifiziert.

6.3.4 Sensitivitätsanalyse

Aufgrund der Notwendigkeit zu Fixierung von Entscheidungsvariablen im vereinfachten Optimierungsmodell, wurde abschließend eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in welcher die fixierten Variablen manuell minimiert oder maximiert wurden²²³. Die Ergebnisse hierfür sind nachfolgender Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 6.12: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse im Vergleich zu den ersten Optimierungsergebnissen²²⁴

dvar	original	AGRVI		xTI		TZi/TZLager		PWISH
		min	max	min	max	min	max	min
cRuestenl	31.123,00	15.561,00	62.245,00	31.123,00	31.123,00	31.123,00	31.123,00	31.123,00
cBestandl	34.975,00	59.954,00	22.489,00	34.975,00	34.975,00	34.975,00	34.975,00	34.978,00
cFolgeBestandl	10.493,00	17.986,00	6.746,60	10.493,00	10.493,00	10.493,00	10.493,00	10.493,00
cTransportl	10.360,00	10.361,00	10.361,00	20.721,00	5.180,20	7.770,20	15.540,00	10.361,00
cFolgeTransportl	2.071,10	2.072,20	2.072,30	4.144,10	1.036,00	1.554,00	3.108,10	2.072,30
cISKostenl	575.150,00	572.900,00	581.140,00	575.150,00	575.150,00	575.150,00	575.150,00	575.380,00
cfixMaschinel	1.132.325,50	1.132.325,50	1.132.325,50	1.132.325,50	1.132.325,50	1.132.325,50	1.132.325,50	1.132.325,50
cvarMaschinel	318.270,00	318.290,00	318.300,00	318.270,00	318.270,00	318.270,00	318.270,00	318.300,00
cProdmenge	864,00	4,52	18,08	864,00	864,00	864,00	864,00	18,08
cvarOrgal	3.456,00	2.304,00	6.528,00	3.456,00	3.456,00	3.456,00	3.456,00	0,00
cVariabilitaetl	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56	2,56
RZI	14.400,00	14.400,00	14.400,00	14.400,00	14.400,00	14.400,00	14.400,00	14.400,00
xLI	22.102,00	44.207,00	11.052,00	22.102,00	22.102,00	22.102,00	22.102,00	22.104,00
SummeSZI	3.403.300,00	3.390.000,00	3.438.800,00	3.403.300,00	3.403.300,00	3.403.300,00	3.403.300,00	3.404.700,00
SummemVarl	265.224,00	265.242,00	265.248,00	265.224,00	265.224,00	265.224,00	265.224,00	265.248,00
NPZI	20.275.200,00	20.196.000,00	20.486.400,00	20.275.200,00	20.275.200,00	20.275.200,00	20.275.200,00	20.283.300,00
ASI	768,00	765,00	776,00	768,00	768,00	768,00	768,00	727,00
Gesamtkosten	2.119.090,16	2.131.760,78	2.142.228,04	2.131.524,16	2.112.875,26	2.115.983,26	2.125.307,16	2.115.053,44
Stückkosten (€/WS)	7,99	8,04	8,08	8,04	7,97	7,98	8,01	7,97
Lean-Grad	55,02%	55,02%	55,03%	55,02%	55,02%	55,02%	55,02%	55,02%

In der linken Spalte sind zunächst die primären, d.h. technologischen und organisatorischen Systemparameter²²⁵, sowie sekundären Entscheidungsvariablen²²⁶, d.h. Kostenparameter²²⁷,

²²⁰ Insbesondere an der Engpassstation

²²¹ Vgl. auch Kapitel 5.3.1

²²² Diese entsprechen im Kontext des Kostenmodells den singulären Kostenparametern.

²²³ Konkret wurden diese im Vergleich zu den angenommenen Werten im ursprünglichen Modell, bei der Minimierung halbiert und für die Maximierung verdoppelt.

²²⁴ Sog. „Originalmodell“

²²⁵ RZI = Rüstzeit je Rüstvorgang im Intervall; xLI = Losgröße im Intervall; SummeSZI = kumulierte Störzeit im Intervall; SummemVarl = kumulierte Produktionsmenge über alle Varianten im Intervall; NPZI = Nettoproduktionszeit im Intervall; ASI = Anzahl der Schichten im Intervall

²²⁶ Englisch: decision variable (dvar)

dargestellt. Die Wertausprägungen in der nächsten Spalte repräsentieren die Ergebnisse des ersten Modelldurchlaufs und damit Kosten in € im Betrachtungsintervall, Zeiten in Sekunden oder Stückzahlen. Durch die *Minimierung* der Anzahl an geplanten Rüstvorgängen im Betrachtungsintervall (**AGRVI**) werden die Gesamt- bzw. Stückkosten erhöht, der Lean-Grad verhält sich hingegen indifferent. Das Kostenergebnis lässt sich wiederum anhand folgender Faktoren erläutern: Die durch das Rüsten gewonnene Zeit wird ausschließlich produktiv verwendet, um eine erneute Stückzahlsteigerung zu erzielen. Gleichzeitig bedingt diese bei einer reduzierten Anzahl an Rüstvorgängen, eine Verdopplung der Losgröße. Die damit erhöhten Bestandskosten (inkl. der Folgekosten dieser) können nicht durch minimierte Rüst- und Fremdbezugskosten sowie variable Kosten der Organisation kompensiert werden. Hinsichtlich des Lean-Grad führt eine Reduktion der Rüstvorgänge, bei einer parallelen Steigerung der Anzahl optimaler Rüstvorgänge, zur Minimierung der Variantenflexibilität. Diese schlägt sich jedoch nicht in der Aggregation nieder. Ein konträrer Verlauf bzgl. der Betriebskosten und des Lean-Grad ist hingegen bei der *Maximierung* der AGRVI zu beobachten. Verglichen mit den Ergebnissen des ersten Modelldurchlaufs, ist für diesen Fall die größte Kostensteigerung bei einem parallelen Anstieg des Lean-Grad zu verzeichnen. Interessant ist auch die erneute Stückzahlsteigerung, welche durch zusätzliche Schichten erzeugt wird. Die in diesem Zusammenhang weiteren relevanten Faktoren, lassen sich analog zu obiger Argumentation ableiten, jedoch verhalten sich die Kennzahlenausprägungen umgekehrt²²⁸. Die Maximierung der Variantenflexibilität findet sich nun in der Aggregation wieder, d.h. in einem minimal erhöhten Lean-Grad in Höhe von 55,03%.

Im Zuge der Transportlosgrößenvariation (**xTI**), verhält sich der Lean-Grad durchweg indifferent. Auch bzgl. der Kostenparameter tangiert diese Entscheidungsvariable lediglich die Transportkosten inkl. der damit verbundenen Folgekosten. So führt eine Reduktion der Transportlosgröße, anhand kleinerer Ladungsträger, zu einer Erhöhung der Anzahl an Transportvorgängen und damit den Transportkosten. Die höchste Gesamtkostenreduktion kann hingegen durch vergrößerte Ladungsträger erzielt werden. Eine Variation der Transportzeit²²⁹ vom Wareneingangslager zur Fertigungslinie (**TZi**) und zurück zum Warenausgangslager (**TZLager**), führt zu analogen Ergebnissen hinsichtlich der Transport- und Gesamtkosten.

Eine weitere Gesamtkostenminimierung (bei unverändertem Lean-Grad) kann anhand der Reduktion von Pausenzeiten in jeder Schicht (**PWI SH**) erreicht werden. Konkret wird hierfür während weiteren 25 Minuten pro Schicht gearbeitet. Diese zusätzlich produktive Zeit resultiert in erneuten Stückzahlsteigerungen, wodurch im Gegenzug auf Sonderschichten an Wochenenden und Feiertagen verzichtet werden kann. Zusammenfassend kompensieren die eliminierten variablen Kosten der Organisation sowie entfallene Fremdbezugskosten, marginal erhöhte Bestands- und Transportkosten aufgrund der Stückzahlerhöhung. Anzumerken ist jedoch, dass die Reduktion von Pausenzeiten lediglich einen temporären Stellhebel für Stückzahlsteigerungen bietet, welcher insbesondere kurzfristig und in wenigen Ausnahmen einzusetzen ist.

Obige Sensitivitätsanalyse bietet damit die Möglichkeit, das vereinfachte Optimierungsmodell zu erweitern und die zugrunde gelegte Hypothese zu diskutieren. Die positive Korrelation zwischen minimierten Betriebskosten und einem maximierten Lean-Grad, im Vergleich zum aktuellen

²²⁷ $c_{RuestenI}$ = Rüstkosten; $c_{BestandI}$ = Bestandskosten; $c_{FolgeBestandI}$ = Folgekosten des Bestands; $c_{TransportI}$ = Transportkosten; $c_{FolgeTransportI}$ = Folgekosten des Transports; $c_{ISKostenI}$ = Instandhaltungskosten; $c_{fixMaschineI}$ = fixe Maschinenkosten; $c_{varMaschineI}$ = variable Maschinenkosten; $c_{ProdMengeI}$ = Produktionsmengenkosten (Fremdbezugs- oder Überproduktionskosten); $c_{varOrgI}$ = variable Kosten der Organisation; $c_{VariabilitaetI}$ = Variabilitätskosten

²²⁸ So entspricht bspw. eine Kostensteigerung im vorigen Fall, nun einer Kostenreduzierung (siehe u.a. Bestandskosten).

²²⁹ Z.B. durch veränderte Routen

Systemzustand, wurde in allen Analysen bestätigt. Offensichtlich erzeugt das vereinfachte Optimierungsmodell jedoch ein lokales Kostenminimum, welches durch die Variation fixierter Entscheidungsvariablen weiter minimiert werden kann. Als kritisch wird auch die Indifferenz des Lean-Grad in fast allen Fällen der Sensitivitätsanalyse erachtet. Dessen minimale Steigerung auf 55,03% (durch die Erhöhung der Anzahl an geplanten Rüstvorgängen im Betrachtungsintervall) korreliert hingegen mit erhöhten Kosten. Damit liegt ein Indiz vor, dass die maximale Erfüllung der Prinzipien der schlanken Produktion nicht zum globalen Kostenminimum konform ist.

Dennoch bietet die entwickelte Methodik eine **objektive Entscheidungsunterstützung** bei der Betrachtung von **Problemfeldern der operativen Ebene**. So dient die Bewertung der Schaffung von Transparenz hinsichtlich der Erfüllung der Prinzipien der schlanken Produktion, als auch dem Vergleich verschiedener Fertigungssysteme. Für die Optimierung der technologischen und organisatorischen Systemparameter bzw. Minimierung der Betriebskosten, sind entsprechende Maßnahmen zu hinterlegen und priorisieren. Damit wird die **Gestaltung** einer Fertigungslinie **nach den Prinzipien der schlanken Produktion anhand der operationalisierten technologischen und organisatorischen Systemparameter²³⁰** gewährleistet.

²³⁰ Wie in Kapitel 2.3 gefordert

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik zur technologischen und organisatorischen Systembewertung und -gestaltung spanender Fertigungslinien nach den Prinzipien der schlanken Produktion entwickelt. Die damit implizierte, operative Detailplanung von Fertigungssystemen, umfasst zwei Bestandteile: Anhand des Evaluationsmodells werden die zugrunde liegenden Prinzipien der schlanken Produktion zunächst operationalisiert. Für den Kontext der Verschwendung, Flexibilität und Variabilität werden sogenannte Lean-Metriken abgeleitet, welche sich wiederum in technologische und organisatorische Systemparameter dekomponieren. Während die technologischen Systemparameter durch die auf der Fertigungslinie und im Lager ausgeführten Prozessschritte (z.B. Rüsten, Transportieren, Bearbeiten etc.) determiniert werden, umfassen letzt genannte Parameter die aus organisatorischer Perspektive zu dimensionierenden Stellhebel, wie bspw. Betriebszeiten, Produktions- und Transportlosgrößen etc. Anhand der aktuellen Ausprägungen der Systemparameter erfolgt umgekehrt deren Aggregation zum sogenannten Lean-Grad. Dieser dient als Erstindikator der zusammenfassenden Überprüfung der prozentualen Erfüllung der Prinzipien der schlanken Produktion. Somit werden auch unterschiedliche Fertigungssysteme hinsichtlich ihres „Grad an Leanität“ vergleichbar.

Der zweite Bestandteil der Methodik bildet das Optimierungsmodell, welches die Betriebskosten der Fertigungslinie durch eine optimierte Dimensionierung der technologischen und organisatorischen Systemparameter minimiert. Da diese wiederum den operationalisierten Prinzipien der schlanken Produktion entsprechen, wird damit zugleich die verbesserte Erfüllung der lean-Prinzipien gewährleistet. Hierfür werden die aus dem Evaluationsmodell resultierenden Systemparameter zu Kostenfunktionen transformiert. Konkret werden die korrespondierenden technologischen und organisatorischen Parameter der Prozessschritte anhand von Personen-, Maschinen- und Materialsätzen monetär bewertet. Additiv resultieren die singulären Kostenfunktionen in den Gesamtkosten für den operativen Betrieb der Fertigungslinie. Diese entsprechen wiederum der Zielfunktion des Optimierungsmodells, welche unter der Berücksichtigung von Restriktionen und Nebenbedingungen mathematisch minimiert wird.

Das Fundament der Gesamtmethodik bilden folglich die operationalisierten Prinzipien der schlanken Produktion in Form von technologischen und organisatorischen Systemparametern. Die Ergebnisse des Anwendungsfalls zeigen, dass eine signifikante Reduktion der Betriebskosten, insbesondere durch eine gleichmäßige Stationsauslastung sowie die Vermeidung von Fremdbezug und Sonderschichten an Wochenenden und Feiertagen zu erzielen ist. Der Fokus operativer Optimierungen sollte daher auf einer Erhöhung der Maschinen-/Linienverfügbarkeit, durch eine Reduktion der Rüst- und Störzeiten, liegen. Weiterhin wird eine Minimierung von nicht wertschöpfenden Nebenzeiten empfohlen, um ein Angleichen der Zykluszeiten zwischen den Stationen zu ermöglichen. All diese Stellhebel führen letztlich zu einer entsprechenden Linienstabilität²³¹ und folglich zu einer Stückzahlsteigerung. Erst nach der Stabilisierungsphase eignen sich weitere Maßnahmen, wie bspw. die Reduktion von Losgrößen, zur weiteren Minimierung der Betriebskosten und Steigerung des Lean-Grad. Die Verifikation der Hypothese „lean ist wirtschaftlich“ konnte damit ebenfalls gezeigt werden.

Auf Basis der entwickelten Methodik werden weitere Forschungsarbeiten bzgl. folgender Themenfelder als sinnvoll erachtet: Der Fokus der Arbeit liegt auf spanenden Fertigungslinien, welche lediglich einen Baustein in der gesamten Wertschöpfungskette der Produktherstellung repräsentieren. Aufgrund der hohen Interdependenzen zwischen den einzelnen Bausteinen der Wertschöpfungskette, bildet die Methodik für die singuläre Optimierung der Fertigungslinie eine notwendige und hinreichende Basis, im Sinne einer Insellösung erscheint diese Optimierung jedoch nur bedingt sinnvoll. Daher gilt es im nächsten Schritt, die Methodik auf weitere Elemente anzuwenden und diese insbesondere adäquat zu verbinden. Folglich würde diese Erweiterung

²³¹ Im Sinne der Vermeidung ungeplanter Produktionsunterbrechungen

dazu beitragen, die Betriebskosten der gesamten Wertschöpfungskette eines Produktes zu minimieren. Weiterhin wurden im Rahmen der Arbeit deterministische Modelle zugrunde gelegt. Die im operativen Betrieb existierenden stochastischen Schwankungen der Zykluszeiten, Instandhaltungszeiten, Rüstzeiten etc. wurden vereinfachend ausgeschlossen. Nach Kuhn führt dieses sogenannte „bowl phenomenon“ jedoch dazu, dass die unter deterministischen Annahmen ermittelte Produktionsleistung in der Regel nicht erreicht werden kann [Kuhn98, S.9]. Dieses Defizit ist folglich in weiterführenden Arbeiten²³² zu beheben. Unter Einbezug aller relevanten technologischen und organisatorischen Systemparameter sowie der daraus ableitbaren Kostenfunktionen, ist die Struktur des entwickelten Optimierungsmodells nicht-linear. Für die Generierung einer exakten Lösung, welche die bis dato ermittelte Näherungslösung des linearisierten Modells substituieren soll, ist die Entwicklung eines entsprechenden Lösungsalgorithmus zwingend erforderlich. Weiterhin bedingt die Modellkomplexität eine softwaretechnische Implementierung des Algorithmus. Erst dadurch wird eine vollumfängliche, objektive Entscheidungsunterstützung, unter Berücksichtigung aller Entscheidungsvariablen, gewährleistet. Alternativ hierzu kann auch die prinzipielle Fragestellung des Outsourcings modelliert werden. Durch die Gegenüberstellung von Fremdbezugskosten und Rüstaufwendungen sowie der damit jeweils einhergehenden Folgekosten, sind die Modelle und Algorithmen dahingehend zu modifizieren, dass Empfehlungen zur Fertigung einer Variante x auf einer Fertigungslinie a resultieren. Eine entsprechende Dimensionierung der Systemparameter wird dadurch jedoch ausgeschlossen. Abschließend ist ein Transfer der Methodik auf die taktische Planungsphase zu überprüfen. Im Rahmen der System- und Strukturplanung kann die entwickelte Methodik in ein hierarchisches, iteratives Planungsvorgehen integriert werden. Die betrachteten Stellhebel der Optimierung im Serienbetrieb, welche eine entsprechende Ausprägung der technologischen und organisatorischen Systemparameter implizieren, können bereits bei der Anlagengestaltung im Pflichten-/Lastenheft und von Seiten des Maschinenherstellers berücksichtigt werden. Dies würde eine präventive Systemgestaltung in der taktischen Planungsphase nach den Prinzipien der schlanken Produktion ermöglichen und damit höhere Potentiale generieren, als es vergleichsweise in Serie je möglich wäre.

²³² Z.B. durch integrierte Warteschlangenmodelle

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Dimensionen der Variabilität – variable Zykluszeiten je Variante und Station in Sekunden	10
Abbildung 2.2:	stochastische Variabilität - Verlauf der Ist-Zykluszeiten der Variante A an Station fünf mit signifikanten Ausreißern sowie Darstellung des arithmetischen Mittels der Zykluszeit	11
Abbildung 2.3:	Das fokussierte System der vorliegenden Arbeit entspricht einem Subsystem der gesamten Wertschöpfungskette.	15
Abbildung 5.1:	Bestandteile der Durchlaufzeit in Anlehnung an [Cors04, S.482]	37
Abbildung 5.2:	Herleitung und Definition der Metrik Fluss	38
Abbildung 5.3:	zeitlicher Verlauf des Lagerbestandes bei stetigem, konstantem Lagerabgang und sofortigem Lagerzugang	41
Abbildung 5.4:	zeitlicher Verlauf des Lagerbestandes bei stetiger, konstanter Zu- und Abgangsrate	42
Abbildung 5.5:	Bestandsverlauf einer Variante (absolute Stückzahl) im Warenausgang der Fertigungslinie für das Jahr 2010	43
Abbildung 5.6:	Ausprägungen der Betragsfunktion des Takt	45
Abbildung 5.7:	Beschreibungsgrößen der Volumenflexibilität – grafische Darstellung in Anlehnung an [Toni07, S.5]	47
Abbildung 5.8:	stationäre Stabilität – exemplarisch für Variante A über alle Stationen der Fertigungslinie dargestellt	55
Abbildung 5.9:	variantenspezifische Stabilität – exemplarische Darstellung der schwankenden Zykluszeiten an Station fünf über alle drei Varianten	56
Abbildung 5.10:	Grafische Darstellung der variantenspezifischen Stabilität innerhalb einer Bearbeitungsstation	58
Abbildung 5.11:	Ebenen der Lean-Kennzahlenpyramide	59
Abbildung 5.12:	Visualisierung der prozentualen Ausprägungen der Lean-Metriken	61
Abbildung 5.13:	Transformation der linearen Werte in die logistische Wachstumskurve	62
Abbildung 5.14:	von der Losgröße unabhängige, durchschnittliche Rüstzeit je Rüstvorgang nach [Koeh88, S.44]	64
Abbildung 5.15:	Verlauf der Zykluszeit in Abhängigkeit der Ausbringungsmenge/Losgröße nach einem Rüstvorgang	67
Abbildung 5.16:	Sprungfixe Funktion der Transportvorgänge je Produktionslos in Abhängigkeit der durchschnittlichen Losgröße	73
Abbildung 5.17:	Verlauf der Stückkostenfunktion für den Transport in Abhängigkeit der Losgröße	75
Abbildung 5.18:	Verlauf der Kostenfunktion in Abhängigkeit der Abweichung der Produktionsmenge vom Kundenbedarf	82
Abbildung 6.1:	Verteilung der Bearbeitungszeiten je Station und Variante	117
Abbildung 6.2:	Verteilung der Nebenzeiten je Station und Variante	117
Abbildung 6.3:	Verteilung der Wartezeiten vor den Stationen je Variante	118
Abbildung 6.4:	Visualisierung der singulären Lean-Metriken (IST) im Spinnennetzdiagramm	122
Abbildung 6.5:	Prototypische Implementierung - Visualisierung und softwaretechnische Realisierung des Gesamtkonzepts	125
Abbildung 6.6:	alternative (grafisch visualisierte) Darstellung der Ergebnisse des Optimierungsmodells im Vergleich zu den aktuellen Betriebskosten	127
Abbildung 6.7:	Visualisierung der Ausprägung der Lean-Metriken vor und nach der Optimierung	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Klassifikation von Verschwendung anhand der Gestaltungsrichtlinien des Wertstromdesigns	6
Tabelle 4.1: Teil eins - Kriterienkatalog zur qualitativen Gegenüberstellung der Ansätze aus der Literatur	33
Tabelle 4.2: Teil zwei – Kriterienkatalog zur qualitativen Gegenüberstellung der Ansätze aus der Literatur	34
Tabelle 4.3: Teil drei – Kriterienkatalog zur qualitativen Gegenüberstellung der Ansätze aus der Literatur	35
Tabelle 4.4: Teil vier – Kriterienkatalog zur qualitativen Gegenüberstellung der Ansätze aus der Literatur	35
Tabelle 5.1: formalisierte Darstellung der technologischen und organisatorischen Systemparameter, resultierend aus der Operationalisierung der Prinzipien der schlanken Produktion - Teil eins	60
Tabelle 5.2: formalisierte Darstellung der technologischen und organisatorischen Systemparameter, resultierend aus der Operationalisierung der Prinzipien der schlanken Produktion - Teil zwei	60
Tabelle 5.3: formalisierte Darstellung der technologischen und organisatorischen Systemparameter, resultierend aus der Operationalisierung der Prinzipien der schlanken Produktion - Teil drei	60
Tabelle 5.4: Transformation der Lean-Metriken und Berechnung des Lean-Grad durch das arithmetische Mittel der Transformationswerte	62
Tabelle 5.5: Anzahl der Arbeitstage und damit Schichten, rückblickend für das Jahr 2010	86
Tabelle 5.6: Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil eins	87
Tabelle 5.7: Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil zwei	87
Tabelle 5.8: Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil drei	87
Tabelle 5.9: Kostenparameter-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil vier	88
Tabelle 5.10: Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil eins	96
Tabelle 5.11: Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil zwei	96
Tabelle 5.12: Lean-Metriken-Entscheidungsvariablen Matrix - Teil drei	96
Tabelle 5.13: Kostenparameter-Lean-Metriken Matrix	97
Tabelle 6.1: Varianten und hierfür erforderliche Halbfertigfabrikate der fallbeispielbezogenen Anwendung	115
Tabelle 6.2: interner Kundenbedarf versus Ausbringungsmenge der Fertigungslinie für alle Varianten im Betrachtungsintervall	116
Tabelle 6.3: Ableitung der Lean-Metrik Fluss	119
Tabelle 6.4: Ableitung der Lean-Metrik Takt	119
Tabelle 6.5: Ableitung der Lean-Metrik Volumenflexibilität	120
Tabelle 6.6: Ableitung der Lean-Metrik Variantenflexibilität	120
Tabelle 6.7: Ableitung der Lean-Metrik stationäre Stabilität	121
Tabelle 6.8: Ableitung der variantenspezifischen Stabilität	121
Tabelle 6.9: Ergebnisse der Lean-Metrik Berechnungen, deren Transformation sowie Aggregation zum Lean-Grad	122
Tabelle 6.10: Vergleich der Betriebskosten vor (IST) und nach der Optimierung (SOLL)	126
Tabelle 6.11: Vergleich der Ergebnisse des Evaluationsmodells vor und nach der Optimierung	129
Tabelle 6.12: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse im Vergleich zu den ersten Optimierungsergebnissen	130

Literaturverzeichnis

- [Abel08] Abele, E.; Kuhn, S.; Hueske, B.: Overall Equipment Flexibility – Entwicklung einer Methodik zur Messung der Gesamtanlagenflexibilität für die spanende Fertigung. ZWF Jahrg. 103 (2008) 5, 322-327
- [Abel10] Abele, E.; Hueske, B.; Kuske, P.: Optimierte Werkzeugwechselstrategien in der Großserienfertigung - Steigerung der Linienverfügbarkeit bei gleichzeitiger Gesamtkostensenkung. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 100 (2010) H.7/8, 572-577
- [Abel11] Abele, E.; Brungs, F.; Wolff, M.: Simulationsgestützte Fertigungssystemgestaltung – Werkzeugmaschinenhersteller optimieren den Materialfluss ihrer Kunden. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 101 (2011) H.10, 706-711
- [Abel11a] Abele, E.; Rumpel, G.; Meudt, T.: Schlanke Montage von Werkzeugmaschinen – Ein typenorientierter Gestaltungsansatz für Lean Production. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 101 (2011) H.9, 585-590
- [Abel11b] Abele, E.; Wolff, M.; Brungs, F.; Kreis, M.: Werkzeugmaschinen-Intralogistik-Systeme gestalten. PRODUCTIVITY Management 16 (2011) 4, 46-49
- [BeMo92] Bernardo, J.J.; Mohamed, Z.: The measurement and use of operational flexibility in the loading of Flexible Manufacturing Systems. European Journal of Operational Research 60 (1992), 144-155
- [Beck06] Becker, H.: Phänomen Toyota – Erfolgsfaktor Ethik. Heidelberg, Springer-Verlag, 2006
- [BoLW05] Bornhäuser, M.; Lickefett, M.; Westkämper, E.: Taktorientiert Fertigungssteuerung – Ein Verfahren zur Fertigungssteuerung einer kundenauftragsbezogenen Werkstattfertigung. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 95 (2005) H.5, 396-404
- [Chry96] Chryssolouris, G.: Flexibility and Its Measurement. Annals of the CIRP Vol. 45/2/1996, 581-587
- [Cors04] Corsten, H.: Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement. München, Wien, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2004
- [Cott11] Cottyn, J.; Van Landeghem, H.; Stockman, K.; Derammelaere, S.: A method to align a manufacturing execution system with Lean objectives. International Journal of Production Research Vol. 49, No. 14, 4397-4413
- [Dang09] Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und –steuerung – Im Sommer keine Kirschpralinen? Heidelberg, Springer-Verlag, 2009
- [DeTo98] De Toni, A.; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility: a literature review. International Journal of Production Research, 1998, Vol. 36, No. 6, 1587-1617
- [DrMR05] Drew, J.; McCallum, B.; Roggenhofer, S.: Unternehmen Lean. Frankfurt/Main, New York, Campus Verlag, 2005
- [DuCa07] Duque, D.F.M.; Cadavid, L.R.: Lean Manufacturing Measurement: The Relationship between Lean Activities and Lean Metrics. Estudios Gerenciales, octubre-diciembre, vol.23, número 105, 69-83

- [Erla07] Erlach, K.: Wertstromdesign – Der Weg zur schlanken Fabrik. Heidelberg, Springer-Verlag, 2007
- [EvAl07] Evans, G. W.; Alexander, S. M.: Using multi-criteria modeling and simulation to achieve lean goals. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, 1615-1623
- [FaFS09] Fandel, G.; Fistek, A.; Stütz, S.: Produktionsmanagement. Heidelberg, Springer-Verlag, 2009
- [Foga92] Fogarty, D.W.: Work in progress: performance measures. International Journal of Production Economics, 26 (1992), 169-172
- [Frit07] Fritz, J.U.: Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik. Dissertation, Universität des Saarlandes, 2007
- [Gans08] Gans, J.E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage. Dissertation, Universität Paderborn, 2008
- [GiKa07] Gienke, H.; Kämpf, R.: Handbuch Produktion - Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling. München, Carl Hanser Verlag, 2007
- [Goho09] Gohout, W.: Operations Research – Einige ausgewählte Gebiete der linearen und nichtlinearen Optimierung. München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009
- [Grun09] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung: Planungssystematik – Methoden – Anwendungen. München, Carl Hanser Verlag, 2009
- [GuRa09] Gurumurthy, A.; Rambabu, K.: Application of benchmarking for assessing the lean manufacturing implementation. Benchmarking: An International Journal Vol. 16 No. 2, 274-308
- [Helm11] Helmdach, M.: Hierarchisches Planungsmodell zur Bestimmung der Herstellkosten von variantenreichen Serienprodukten in Produktion und Logistik bei unterschiedlichen Gleichteilestrategien. Dissertation, Universität Paderborn, 2011
- [Herr10] Herrmann, F.: Automatisierte Durchführung von Bestandsmanagement-Projekten. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 100 (2010) H.10, 819-824
- [HeSB11] Herrmann, K.; Schneider, S.; Bertagnolli, F.; Höfer, S.; Dangelmaier, W.: Objektive Entscheidungsunterstützung für Produktionsplaner – OMNI LEAN – eine quantitative Bewertungsmethodik für Verschwendung. ZWF Jahrg. 106 (2011) 6, 408-412
- [KaAh96] Karlsson, C.; Ahlström, P.: Assessing changes towards lean production. International Journal of Operations & Production Management, Vol. 16 No. 2, 24-41
- [Klev07] Klevers, T.: Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design - Verschwendung erkennen - Wertschöpfung steigern. Landsberg am Lech, mi-Fachverlag, 2007
- [KINy09] Klemke, T.; Nyhuis, P.: Lean Changeability – Evaluation and Design of Lean and Transformable Factories. World Academy of Science, Engineering and Technology 53, 2009, 653-660
- [Koeh88] Köhler, A.: Beitrag zur Verbesserung der Fertigungskostentransparenz bei Großserienfertigung mit Produktvielfalt. Dissertation, Universität Stuttgart, 1988

- [KoKa04] Kojima, S.; Kaplinsky, R.: The use of a lean production index in explaining the transition to global competitiveness: the auto component sector in South Africa. *Technovation* 24 (2004), 199-206
- [Krop09] Kropik, M.: *Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung*. Heidelberg, Springer-Verlag, 2009
- [Kuma87] Kumar, V.: Entropic measures of manufacturing flexibility. *International Journal of Production Research*, 1987, Vol.25, No.7, 957-966
- [Kuhn98] Kuhn, H.: *Fließproduktionssysteme – Leistungsbewertung, Konfigurations- und Instandhaltungsplanung*. Heidelberg, Physica-Verlag, 1998
- [Lanz10] Lanza, G.; Peter, K.; Peters, S.: Ganzheitliche Modellierung von Produktionssystemen – Ein stochastisches, ganzheitliches Modell zur Lebenszyklusberechnung. *ZWF Jahrg.* 105 (2010) 5, 478-482
- [Lanz10a] Lanza, G.; Rühl, J.; Peters, S.: Monetäre Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen - Stochastische Simulation von Leistungskennzahlen und monetäre Größen zur Flexibilitätsquantifizierung. *wt Werkstattstechnik online Jahrgang* 100 (2010) H.6, 530-534
- [Lanz11] Lanza, G.; Peters, S.: Effizienzsteigerung von Produktionssystemen – Ein Ansatz auf Basis stochastisch dynamischer Optimierung. *ZWF Jahrg.* 106 (2011) 6, 418-422
- [Laqu10] Laqua, I.: Zahlen – Daten – Fakten für eine moderne Produktion. *ZWF Jahrg.* 105 (2010) 9, 812-814
- [Lay08] Lay, G.: *Von Modernisierungsinselfen zu integrierten Produktionssystemen – Ein Leitfadens für die strategieorientierte Verknüpfung betrieblicher Modernisierungsmaßnahmen in kleinen und mittleren Unternehmen*. Frankfurt, VMDA Verlag, 2008
- [Like06] Liker, J.K.: *Der Toyota Weg – 14 Managementprinzipien des weltweit erfolgreichsten Automobilkonzerns*. München, FinanzBuch Verlag, 2006
- [Lore11] Lorentzen, K.; Maschek, T.; Richter, R.; Deuse, J.: Entwicklung einer Variabilitätstypologie – Grundlage für einen zielgerichteten, kontinuierlichen Verbesserungsprozess. *ZWF Jahrg.* 106 (2011) 4, 214-218
- [Moel08] Möller, N.: *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*. Dissertation, Technische Universität München, 2008
- [Muel62] Müller-Merbach, H.: *Die Bestimmung der optimalen Losgröße bei Mehrproduktfertigung – Die Modifizierung optimaler Einzellosgrößen in Mehrproduktbetrieben mit Hilfe operationsanalytischer Methoden*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1962
- [MuSN11] Münzberg, B.; Schmidt, M.; Nyhuis, P.: Dimensionierung von Fertigungslosgrößen – Diskussion wirtschaftlich orientierter Ansätze vor dem Hintergrund logistischer Zielgrößen. *Industrie Management* 27 (2011) 5, 22-26
- [Nach09] Nachtwey, A.; Schwarz, S.; Riedel, R.; Schopp, M.: Entwicklung einer Methode zur Ableitung von Flexibilitätsklassen in der Produktion. *ZWF Jahrg.* 104 (2009) 4, 224-228
- [Nad10] Nad, T.: Systematisches Lean Management – Six Sigma-Methoden ergänzen das Lean Production-System. *ZWF Jahrg.* 105 (2010) 4, 299-302

- [Nara00] Narain, R.; Yadav, R.C.; Sarkis, J.; Cordeiro, J.J.: The strategic implications of flexibility in manufacturing systems. *International Journal of Agile Management Systems* 2/3 (2000), 202-213
- [NyRA08] Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E.: *Wandlungsfähige Produktionssysteme – Heute die Industrie von morgen gestalten*. Garbsen, PZH-Verlag, 2008
- [Oelt00] Oeltjenbruns, H.: *Organisation der Produktion nach dem Vorbild Toyotas – Analyse, Vorteile und detaillierte Voraussetzungen sowie die Vorgehensweise zur erfolgreichen Einführung am Beispiel eines globalen Automobilkonzerns*. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2000
- [Ohno09] Ohno, T.: *Das Toyota-Produktionssystem*. Frankfurt, Campus Verlag, 2009
- [Opit04] Opitz, O.: *Mathematik - Lehrbuch für Ökonomen*. München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2004
- [Opit08] Opitz, A.: *Methodik zur Planung ganzheitlich prozesseffizienter Fertigungssysteme*. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, 2008
- [Pete61] Peters, B.: *Die Bestimmung der optimalen Losgröße – Eine Anwendung der Nichtlinearen Programmierung*. Dissertation, Universität Göttingen, 1961
- [RaRo04] Rajaram, K.; Robotis, A.: Analyzing variability in continuous processes. *European Journal of Operational Research* 156 (2004), 312-325
- [Ray06] Ray, C.D.; Zuo, X.; Michael, J.H.; Wiedenbeck, J.K.: The Lean Index: Operational “Lean” Metrics for the wood products industry. *Wood and Fiber Science*, 38(2), 238-255
- [Roga09] Rogalski, S.: *Entwicklung einer Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen – Messung von Mengen-, Mix- und Erweiterungsflexibilität zur Bewältigung von Planungsunsicherheiten in der Produktion*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2009
- [Rosc07] Roscher, J.: *Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007
- [RoSh04] Rother, M.; Shook, J.: *Sehen Lernen - mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen*. Aachen, Lean Management Institut, 2004
- [Schl58] Schlüter, H.: *Untersuchungen zum Problem der optimalen Losgröße*. Dissertation, Universität Frankfurt am Main, 1958
- [ScGW04] Schuh, G.; Gulden, A.; Wemhöner, N.; Kampker, A.: Bewertung der Flexibilität von Produktionssystemen – Kennzahlen zur Bewertung der Stückzahl-, Varianten- und Produktänderungsflexibilität auf Linienebene. *wt Werkstattstechnik online* Jahrgang 94 (2004) H.6, 299-304
- [ScWi04] Schenk, M.; Wirth, S.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb – Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*. Heidelberg, Springer-Verlag, 2004
- [ScKN09] Schulze, C.P.; Klemke, T.; Nyhuis, P.: Leanbefähiger – Ein Ansatz für die Gestaltung ressourceneffizienter Fabriken. *wt Werkstattstechnik online* Jahrgang 99 (2009) H.9, 684-688
- [Schu11] Schuhmacher, J.: Die Bausteine einer perfekten Produktion. *PRODUCTIVITY Management* 16 (2011) 1, 37-40
- [SeSe90] Sethi, A.K.; Sethi, S.P.: Flexibility in Manufacturing: A Survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2 (1990), 289-328

- [Slac83] Slack, N.: Flexibility as a Manufacturing Objective. *International Journal of Operations and Production Management* 2 (1983) 3, 4-13
- [SoFo02] Soriano-Meier, H.; Forrester, P.L.: A model for evaluating the degree of leanness of manufacturing firms. *Integrated Manufacturing Systems*, 13/2 (2002), 104-109
- [Spat03] Spath, D.: *Ganzheitlich produzieren - Innovative Organisation und Führung*. Stuttgart, LOG_X Verlag, 2003
- [SuMe09] Suhl, L.; Mellouli, T.: *Optimierungssysteme – Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. Heidelberg, Springer-Verlag, 2009
- [Sysk06] Syska, A.: *Produktionsmanagement - Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. Wiesbaden, GWV Fachverlage, 2006
- [Take04] Takeda, H.: *Das synchrone Produktionssystem - Just-in-time für das ganze Unternehmen*. Landsberg am Lech, mi-Fachverlag, 2004
- [Toni07] Tonigold, C.: *Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten*. Dissertation, Universität Paderborn, 2007
- [Vahr08] Vahrenkamp, R.: *Produktionsmanagement*. München, Oldenbourg Verlag, 2008
- [ViCh11] Vinodh, S.; Chintha, S.K.: Leanness assessment using multi-grade fuzzy approach. *International Journal of Production Research* Vol. 49, No. 2, 431-445
- [VoSc04] Vollmer, L.; Schlörke, S.: Variantenwertströme als Navigator für die Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik online Jahrgang 94 (2004) H.4*, 128-131
- [WaSZ11] Walter, M.; Sommer-Dittrich, T.; Zimmermann, J.: Evaluating volume flexibility instruments by design-of-experiments methods. *International Journal of Production Research* Vol. 49, No.6, 1731-1752
- [WaCh08] Wan, H.-D.; Chen, F.F.: A leanness measure of manufacturing systems for quantifying impacts of lean initiatives. *International Journal of Production Research* Vol. 46, No. 23, 6567-6584
- [Wemh05] Wemhöner, N.: *Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau*. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 2005
- [WoDo02] Wöhe, G.; Döring, U.: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. München, Vahlen Verlag, 2002
- [WoJR90] Womack, J.P.; Jones, D.T.; Roos, D.: *The Machine that Changed the World*. New York, Rawson Associates, 1990
- [WoJR92] Womack, J.P.; Jones, D.T.; Roos, D.: *Die zweite Revolution in der Autoindustrie – Konsequenzen aus der weltweiten Studie aus dem Massachusetts Institute of Technology*. Frankfurt, Campus Verlag, 1992
- [YaLu10] Yang, T.; Lu, J.-C.: The use of a multiple attribute decision-making method and value stream mapping in solving the pacemaker location problem. *International Journal of Production Research* Vol.49, No.10, 2793-2817
- [Zaeh06] Zäh, M.F.; von Bredow, M.; Möller, N.; Müssig, B.: Methoden zur Bewertung von Flexibilität in der Produktion. *Industrie Management* 22 (2006) 4, 29-32

Anhang

A.1 Linearisiertes Optimierungsmodell

Da sich die Eingangsgrößen des vereinfachten Optimierungsmodells hinsichtlich der verwendeten Indizes und Kostenparameter (für die Gewichtung der Entscheidungsvariablen) nicht vom „Originalmodell“ unterscheiden, wird auf deren Ausführung nachfolgend verzichtet. Die fixierten Entscheidungsvariablen, welche nun konstante Eingangsparameter repräsentieren, wurden bereits in Kapitel 6.3.1 erläutert. Eine signifikante Unterscheidung stellen jedoch die linearisierten Zielfunktionskomponenten dar, weshalb diese nachfolgend fokussiert werden²³³.

Formulierung der Zielfunktion

Die deklarierten Entscheidungsvariablen bedürfen im Zuge ihrer optimalen Bestimmung einer Zielfunktion, in welcher sie das Minimum an Kosten verursachen. Konkret sollen die Gesamtkosten durch den operativen Betrieb der Fertigungslinie im Intervall minimiert werden, welche additiv aus den linearisierten Kostenfunktionen resultieren.

$$\min c_{I,WS} = \sum ($$

- Rüstkosten
- + Losanlaufkosten
- + Bestandskosten
- + Folgekosten des Bestands
- + Transportkosten
- + Folgekosten des Transports
- + Instandhaltungskosten
- + Variabilitätskosten
- + fixe Maschinenkosten
- + variable Maschinenkosten
- + Kosten der Überproduktion
- + Kosten des Fremdbezugs
- + variable Kosten der Organisation)

(A.1 - 1)

²³³ Anzumerken ist jedoch, dass sich der qualitative Aussagegehalt der Zielfunktionskomponenten durch den Transfer der Stückkosten zu Gesamtkosten nicht verändert.

$$\begin{aligned} \min c_{I,WS} = \sum (& \\ & c_{R\u00fcsten,I} \\ & + c_{Losanlauf,I} \\ & + c_{Bestand,I} \\ & + c_{Folgebestand,I} \\ & + c_{Transport,I} \\ & + c_{FolgeTransport,I} \\ & + c_{IS-Kosten,I} \\ & + c_{Variabilit\u00e4t,I} \\ & + c_{fixMaschine,I} \\ & + c_{varMaschine,I} \\ & + c_{\u00dcberprod,I} \\ & + c_{Fremdbezug,I} \\ & + c_{varOrga,I}) \end{aligned} \quad (A.1 - 2)$$

Mit

$$c_{R\u00fcsten,I} = AGRV_I * (RZ_I * f_{Maschbel} + \frac{RZ_I}{BAZ_{\max,i,WS}} * f_{Gewinn}) \quad (A.1 - 3)$$

Die R\u00fcstkosten im Intervall setzen sich additiv aus den Maschinenbelegungs- und Opportunit\u00e4tskosten, aufgrund der verloren gegangenen Produktionszeit w\u00e4hrend des R\u00fcstens, zusammen.

$$c_{Bestand,I} = \left(\frac{x_{L,I}}{2} * (f_{Materialwert} + f_{HK}) * f_{kalk.Zins} + \frac{x_{L,I}}{2} * f_{Lagerkosten,var} + f_{Lagerkosten,fix,I} \right) \quad (A.1 - 4)$$

Die Bestandskosten beinhalten Kapitelbindungs- sowie fixe und variable Lagerkosten, in Abh\u00e4ngigkeit der durchschnittlichen Lagermenge sowie der dadurch determinierten Verweildauer im Zwischenlager.

$$c_{Folgebestand,I} = f1 * c_{Bestand,I,WS} \quad (A.1 - 5)$$

Die Folgekosten des Bestands ergeben sich aus Qualit\u00e4tsproblemen sowie erforderlichen \u00c4nderungen an Werkst\u00fccken aufgrund zu hoher Verweilzeiten im Lager und werden empirisch aus den Bestandskosten abgeleitet.

$$c_{Transport,I} = AGRV_I * \frac{x_{L,I}}{x_{T,I}} * (TZ_i + TZ_{Lager}) * (f_{BeMi} + f_{Per}) \quad (A.1 - 6)$$

Die Kosten f\u00fcr den Transport umfassen alle Vorg\u00e4nge zwischen dem Lager und einer Fertigungsstufe inkl. der erforderlichen Handlungsschritte durch das hierf\u00fcr erforderliche Personal/Betriebsmittel.

$$c_{FolgeTransport,I} = f2 * c_{Transport,I,WS} \quad (A.1 - 7)$$

Analog zu den Folgekosten des Bestands, resultieren die Folgekosten des Transports aus Qualit\u00e4tsproblemen und werden empirisch aus den Transportkosten abgeleitet.

$$C_{IS-Kosten,I} = \frac{\sum SZ}{BAZ_{\max,i,WS}} * f_{Gewinn} \quad (A.1 - 8)$$

Die vereinfachten Instandhaltungskosten setzen sich ausschließlich aus den Opportunitäten aufgrund der verloren gegangenen Produktionszeit zusammen.

$$C_{Variabilität,I} = \frac{\sum_{Var=A}^Z ZZ_{\max,i,Var} - ZZ_{\min,i,Var}}{BAZ_{\max,i,WS}} * f_{Gewinn} * \sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \quad (A.1 - 9)$$

Die Variabilitätskosten entsprechen wiederum Opportunitäten aufgrund von Maschinenwartezeiten, welche bei Abweichung der Zykluszeiten zwischen den Stationen einer Fertigungslinie entstehen.

$$C_{fixMaschine,I} = f_{Maschine,fix,I} \quad (A.1 - 10)$$

Die fixen Maschinenkosten inkludieren alle Kostenfaktoren, welche unabhängig vom Nutzungs-/Auslastungsgrad der Fertigungslinie anfallen, wie z.B. Flächenkosten und sind bzgl. der Gesamtkosten konstant.

$$C_{varMaschine,I} = \sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} * f_{Maschine var,I,WS} \quad (A.1 - 11)$$

Variable Maschinenkosten entsprechen sogenannten Prozesskosten, welche ausschließlich in Abhängigkeit der Betriebsdauer/gefertigten Stückzahl anfallen, wie z.B. variable Energiekosten.

$$C_{Pr odmenge,I} = \left\{ \begin{array}{l} C_{Fremdbezug,I}; \sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} < \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \\ 0; \sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} = \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \\ C_{Überprod,I}; \sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} > \sum_{Var=A}^Z KB_{Var,I} \end{array} \right\} \quad (A.1 - 12)$$

Produktionsmengenkosten resultieren bei Abweichungen der Ausbringungsmenge vom Kundenbedarf. Konkret handelt es sich dabei um Fremdbezugskosten oder Überproduktionskosten, welche wiederum Bestandskosten aufgrund erhöhter Lageraufwendungen darstellen.

Mit:

$$C_{\text{Überprod},I} = \left(\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} - \sum_{\text{Var}=A}^Z KB_{\text{Var},I} \right) * (f_{\text{Materialwert}} + f_{\text{HK}}) * f_{\text{kalk.Zins}} \quad (\text{A.1 - 13})$$

$$+ \left(\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} - \sum_{\text{Var}=A}^Z KB_{\text{Var},I} \right) * f_{\text{Lagerkosten,var}}$$

$$C_{\text{Fremdbezug},I} = \left(\sum_{\text{Var}=A}^Z KB_{\text{Var},I} - \sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I} \right) * f_{\text{Fremdbezug,WS}} \quad (\text{A.1 - 14})$$

$$C_{\text{var Orga},I} = \left\{ \begin{array}{l} 0; AS_I \leq 759 \\ AS_I * f_{\text{Zuschläge}}; 759 < AS_I \leq 1.095 \end{array} \right\} \quad (\text{A.1 - 15})$$

Die variablen Kosten der Organisation werden durch Zuschläge in den Personalkosten, insbesondere bei Sonderschichten an Wochenenden und Feiertagen, bedingt.

Formulierung der Nebenbedingungen

In Analogie zur thematischen Unterteilung der Zielfunktion, finden sich nachfolgend die thematisch zugehörigen Restriktionen der Sub-Komponenten der Zielfunktion wieder, wobei Überschneidungen existieren. Da es sich vielfach um Definitionen der sekundären Entscheidungsvariablen handelt, welche bei den jeweiligen Kostenfunktionen ausführlich erläutert wurden, soll nachfolgend insbesondere die Erklärung der übergreifenden Restriktionen fokussiert werden.

$$BAZ_{i,Var} = konst. \quad \forall i, Var \quad (\text{A.1 - 16})$$

Die rein wertschöpfenden Bearbeitungszeiten an jeder Station für alle Varianten werden als konstant erachtet. Damit wird die Verlagerung einzelner Bearbeitungsschritte zu anderen Stationen der Linie im Modell nicht berücksichtigt. Auch wird eine Reduktion dieser durch erhöhte Bohr-/Fräsgeschwindigkeiten nicht ermöglicht.

$$AGRV_I = \frac{\sum_{\text{Var}=A}^Z m_{\text{Var},I}}{x_{L,I}} \quad \forall Var \quad (\text{A.1 - 17})$$

Die Anzahl der geplanten Rüstvorgänge im Betrachtungsintervall resultieren aus der Produktionsmenge sowie der durchschnittlichen Losgröße. Für ein definiertes Fertigungsvolumen, sind damit die Anzahl der geplanten Rüstvorgänge sowie die Losgröße umgekehrt proportional.

$$RZ_I \geq BAZ_{\text{max},i,WS} \quad (\text{A.1 - 18})$$

Gemäß der Lean-Philosophie ist das Rüsten im Takt die anzustrebende Untergrenze für die durchschnittliche Rüstzeit je Rüstvorgang. Der Begriff des Takts inkludiert jedoch nicht anteilige Rüst- und Störzeiten²³⁴ je Werkstück. Vereinfachend ist folglich die konstante Bearbeitungszeit an der Engpassstation als Untergrenze zu hinterlegen.

$$ZZ_{\text{max},i,Var} = \max(BAZ_{i,Var} + NBZ_{i,Var}) \quad \forall Var \quad (\text{A.1 - 19})$$

Maximale Zykluszeit für eine Variante über alle Stationen der Fertigungslinie. Für alle Varianten resultiert damit ein Vektor, gemäß obiger Formel.

²³⁴ Wie im Kontext dieser Arbeit

$$ZZ_{\min,i,Var} = \min(BAZ_{i,Var} + NBZ_{i,Var}) \quad \forall Var \quad (A.1 - 20)$$

$$ZZ_{\max,i,Var} \geq ZZ_{\min,i,Var} \quad \forall Var \quad (A.1 - 21)$$

Die maximale Zykluszeit ist naturgemäß größer als die minimale Zykluszeit für eine Variante über alle Stationen der Fertigungslinie, ist jedoch aus Gründen der Vollständigkeit explizit zu definieren.

$$\sum_{Var=A}^Z m_{Var,I} \leq \frac{(NPZ_I - \sum_I SZ) - AGRV_I * RZ_I}{BAZ_{\max,i,WS}} \quad \forall Var \quad (A.1 - 22)$$

Die kumulierte Produktionsmenge der Fertigungslinie über alle Varianten im Intervall wird durch die verfügbare Produktionszeit sowie die Bearbeitungszeit an der Engpassstation der Linie limitiert.

$$NPZ_I = AS_I * (BPZ_{SH} - PWI_{SH}) \quad \forall SH \quad (A.1 - 23)$$

$$f_{Fremdbezug,WS} > f_{HK} \quad (A.1 - 24)$$

Der Fremdbezugskostensatz je Werkstück übersteigt die Herstellkosten. Andernfalls müsste der betrachtete Wertschöpfungsschritt aus Wirtschaftlichkeitsgründen vollständig „outgesourct“ werden.

$$AS_I \leq 1.095 \quad (A.1 - 25)$$

Theoretische Obergrenze für die Anzahl der Schichten im Betrachtungsintervall unter der Annahme von 365 Arbeitstagen und je drei Schichten pro Tag.

$$PWI_{SH} \leq 40 \quad \forall SH \quad (A.1 - 26)$$

Maximale Pausenzeit je Schicht.

$$PWI_{SH} \geq 15 \quad \forall SH \quad (A.1 - 27)$$

$$\geq 0 \quad \forall Variablen \quad (A.1 - 28)$$

Letzt genannte Restriktion entspricht der Nicht-Negativitätsbedingung für alle Entscheidungsvariablen im Optimierungsmodell.

A.2 Syntax des Optimierungsmodells aus der Daten- und Modelldatei in OPL Studio

.mod

```
//Parameter
int n = 6;
int A = 1;
int Z = 3;
float BAZiVar[1..n][A..Z] =...;
float BAZmaxiWS = 62.96;
int SummeKBVar = 265240;
float f1 = 0.3;
float f2 = 0.2;
int BPZSH = 28800;
int PWISH = 40 * 60;
int AGRVI = 12;
int xTI = 320;
float TZi = 300;
float TZLager = 300;
int Var = 3;

//Kostenparameter
float fMaschbel = 40/3600;
float fintVerrechnungspreis = 28.64;
float fHK = 18;
float fGewinn = fintVerrechnungspreis - fHK;
float fMaterialwert = 6.5;
float fkalkZins = 0.08;
float fLagerkostenvar = 0.3;
float fLagerkostenfix = 10000;
float fBeMi = 25/3600;
float fPer = 50/3600;
float fMaschinefixI = 1132325.5;
float fMaschinevarIWS = 1.2;
float fFremdbezugWS = 54;
float fZuschlaege = 384;

//Entscheidungsvariablen
dvar float cRuestenI;
dvar float RZI;
dvar float NBZiVar[1..n][A..Z];

dvar float cBestandI;
dvar int xLI;

dvar float cFolgeBestandI;

dvar float cTransportI;

dvar float cFolgeTransportI;

dvar float cISKostenI;
dvar float SummeSZI;

float cfixMaschineI = fMaschinefixI;

dvar float cvarMaschineI;
dvar int SummemVarI;

dvar int NPZI;
```

```

dvar int ASI;

dvar float cProdmengeI;

dvar float cvarOrgaI;

dvar float cVariabilitaetI;
dvar float ZZiVar[1..n][A..Z];
dvar float ZZmaxiVar[A..Z];
dvar float ZZminiVar[A..Z];

//Zielfunktion
minimize
  cRuestenI
  + cBestandI
  + cFolgeBestandI
  + cTransportI
  + cFolgeTransportI
  + cISKostenI
  + cfixMaschineI
  + cvarMaschineI
  + cProdmengeI
  + cvarOrgaI
  + cVariabilitaetI;

//Restriktionen
subject to {
  cRuestenI == AGRVI * (RZI * fMaschbel + (RZI / (BAZmaxiWS) * fGewinn));

  cBestandI == (xLI / 2 * (fMaterialwert + fHK) * fkalkZins
    + xLI / 2 * fLagerkostenvar
    + fLagerkostenfix);

  cFolgeBestandI == f1 * cBestandI;

  cTransportI == AGRVI * (xLI / xTI) * (TZi + TZLager) * (fBeMi + fPer);

  cFolgeTransportI == f2 * cTransportI;

  cISKostenI == (SummeSZI / BAZmaxiWS) * fGewinn;

  cvarMaschineI == fMaschinevarIWS * SummemVarI;

  cProdmengeI == piecewise {-fFremdbezugWS -> SummeKBVar; ((fMaterialwert +
    fHK) * fkalkZins + fLagerkostenvar)} (0,14322960) SummemVarI;

  SummemVarI <= (NPZI - SummeSZI - AGRVI * RZI) / BAZmaxiWS;

  NPZI == ASI * (BPZSH - PWISH);

  ASI <= 1095;

  AGRVI * xLI == SummemVarI;

  SummeSZI >= NPZI * 3 / (7 * 24) + NPZI * 0.15;

  RZI >= 4 * 3600;

  cvarOrgaI == piecewise {0 -> 759; fZuschlaege} (0,0) ASI;

  cVariabilitaetI == (sum (Var in A..Z) (ZZmaxiVar[Var] - ZZminiVar[Var]) /
    Var) / BAZmaxiWS * fGewinn;

```

```
forall (i in 1..n)
forall (Var in A..Z)
ZZiVar[i][Var] == BAZiVar[i][Var] + NBZiVar[i][Var];

forall (Var in A..Z)
ZZmaxiVar[Var] == max (i in 1..n) ZZiVar[i][Var];

forall (Var in A..Z)
ZZminiVar[Var] == min (i in 1..n) ZZiVar[i][Var];

cRuestenI >= 0;
RZI >= 0;
forall (i in 1..n)
forall (Var in A..Z)
NBZiVar[i][Var] >= 0;
NBZiVar[1][1] <= 5.56;
NBZiVar[1][2] <= 5.4;
NBZiVar[1][3] <= 5.4;
NBZiVar[2][1] <= 5.82;
NBZiVar[2][2] >= 6;
NBZiVar[2][3] <= 5.78;
NBZiVar[3][1] <= 5.94;
NBZiVar[3][2] >= 2;
NBZiVar[3][3] <= 5.84;
NBZiVar[4][1] <= 6.14;
NBZiVar[4][2] >= 5;
NBZiVar[4][3] <= 6.1;
NBZiVar[5][1] <= 6.38;
NBZiVar[5][2] >= 8.5;
NBZiVar[5][3] <= 6.36;
NBZiVar[6][1] <= 7.26;
NBZiVar[6][2] >= 26.6;
NBZiVar[6][3] >= 1.89;
SummemVarI >= 0;
SummeSZI >= 0;
xLI >= 0;
cBestandI >= 0;
cTransportI >= 0;
cFolgeBestandI >= 0;
cFolgeTransportI >= 0;
cISKostenI >= 0;
cfixMaschineI >= 0;
cvarMaschineI >= 0;
NPZI >= 0;
ASI >= 0;
cProdmengeI >= 0;
cvarOrgaI >= 0;
cVariabilitaetI >= 0;
forall (i in 1..n)
forall (Var in A..Z)
ZZiVar[i][Var] >= 0;
forall (Var in A..Z)
ZZmaxiVar[Var] >= 0;
forall (Var in A..Z)
ZZminiVar[Var] >= 0;
}
```

.dat

```
//Datenquelle und Zielverzeichnis
/* .dat file */
SheetConnection sheet("test.xls");

//Eingangsgrößen
BAZiVar from SheetRead(sheet, "Tabelle1!B7:D12");
```