

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Methode zur Steigerung der  
Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen**

**Georg Albin Josef Götz**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Die Dissertation wurde am 26.06.2017 an der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 20.11.2017 angenommen.



# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Projektgruppe Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) sowie der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem geschäftsführenden Leiter des IGCV sowie dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM), für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Volk, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der TUM, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats, die aufmerksame Durchsicht sowie für die angeregte Diskussion recht herzlich bedanken. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler, dem Leiter des Lehrstuhls für Carbon Composites der TUM. Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr. Steve T. Newman und seiner Forschungsgruppe des Innovative Manufacturing Research Centers der Universität Bath für die Gastfreundschaft und die wissenschaftlichen Freiheiten im Rahmen meines dreimonatigen Forschungsaufenthaltes danken.

Zudem bedanke ich mich recht herzlich bei allen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere der Abteilung Anlagen- und Steuerungstechnik, sowie allen Studierenden, die mich während meiner Zeit begleitet und bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt Lucas Kiefer, Dr.-Ing. Peter Stich und Dr.-Ing. Marcel Wagner für die fachlichen Diskussionen, die kritische Begutachtung meines Manuskriptes und die wertvollen Anregungen.

Besonders danken möchte ich meiner Familie für den Rückhalt, den sie mir in allen Lebenssituationen gibt, und für ihre Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Insbesondere danke ich meinen Eltern, Klemens und Irmgard Götz, die mir meine akademische Ausbildung ermöglicht haben. Mein größter und herzlichster Dank gilt allerdings meiner Partnerin Andrea. Sie hat mir durch ihre immerwährende Unterstützung den Rücken freigehalten, für die notwendigen Freiräume gesorgt sowie durch ihre Geduld wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Augsburg, im Januar 2018

*Georg Albin Josef Götz*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation und Motivation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	3
1.3 Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2 Grundlagen der Verpackungstechnik und der Veränderungsfähigkeit .....</b>	<b>5</b>
2.1 Überblick.....	5
2.2 Verpackungstechnik.....	5
2.2.1 Verpackungsprozess und Verarbeitungsvorgänge .....	5
2.2.2 Verpackungsmaschinen und -anlagen.....	7
2.3 Veränderungsfähigkeit .....	9
2.3.1 Flexibilität und Umrüstbarkeit .....	10
2.3.2 Wandlungsfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit.....	13
2.4 Formatflexibilität .....	15
2.4.1 Begriffsdefinition .....	15
2.4.2 Charakterisierung der Formatflexibilität.....	15
2.4.3 Befähiger für eine Steigerung der Formatflexibilität.....	18

<b>3</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>21</b>
3.1	Überblick .....	21
3.2	Wissenschaftliche und methodische Arbeiten für eine Steigerung der Flexibilität von Produktionsmaschinen .....	21
3.2.1	Ansätze zur Rüstprozessoptimierung .....	21
3.2.2	Flexibilitätssteigerung durch eine verbesserte Umrüstbarkeit.....	26
3.2.3	Fazit .....	31
3.3	Technische Ansätze zur Flexibilitätssteigerung .....	31
3.3.1	Technische Ansätze im Werkzeugmaschinenbau.....	32
3.3.2	Technische Ansätze im Verpackungsmaschinenbau .....	34
3.3.3	Fazit .....	36
3.4	Darstellung der Handlungsfelder .....	37
<b>4</b>	<b>Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen .....</b>	<b>41</b>
4.1	Überblick .....	41
4.2	Spezifizierung des Untersuchungsbereichs .....	41
4.3	Anforderungen an das Vorgehen .....	42
4.4	Vorgehen zur Steigerung der Formatflexibilität .....	43
4.5	Methodenbaustein Szenario-Steckbrief .....	46
4.5.1	Grundannahmen und Gesamtstruktur .....	47
4.5.2	Detaillierung des Wirtschaftlichkeits- und des Vorgehensmodells .....	52
4.5.3	Zusammenfassung und Integration in das Gesamtkonzept .....	57
4.6	Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs .....	57
4.6.1	Grundannahmen und Gesamtstruktur .....	58
4.6.2	Detaillierung des Vorgehensmodells .....	61

4.6.3	Zusammenfassung und Integration in das Gesamtkonzept.....	68
4.7	Methodenbaustein Funktionspool.....	68
4.7.1	Grundannahmen und Gesamtstruktur .....	70
4.7.2	Detaillierung des Vorgehensmodells .....	73
4.7.3	Zusammenfassung und Integration in das Gesamtkonzept.....	76
4.8	Methodenbaustein Gestaltungspool.....	77
4.8.1	Grundannahmen und Gesamtstruktur .....	78
4.8.2	Detaillierung des Vorgehensmodells .....	79
4.8.3	Zusammenfassung und Integration in das Gesamtkonzept.....	88

**5 Entwicklung formatt flexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool ..... 89**

5.1	Überblick.....	89
5.2	Verschließen – Thermoformverpackungsmaschinen.....	92
5.2.1	Schritt 1: Initialisierung .....	92
5.2.2	Schritt 2: Ideengenerierung und -bewertung.....	95
5.2.3	Schritt 3: Technologiebasisstudie .....	97
5.2.4	Schritt 4: Erweiterte Technologiestudie – Impuls- und Laserstrahlsiegeln.....	103
5.2.5	Schritt 5: Transfer .....	126
5.3	Aufrichten – Faltschachtel-Aufrichtemaschinen .....	127
5.3.1	Schritt 1: Initialisierung .....	127
5.3.2	Schritt 2: Ideengenerierung und -bewertung.....	129
5.3.3	Schritt 3: Technologiebasisstudie .....	134
5.3.4	Schritt 4: Erweiterte Technologiestudie – Differenzbandverfahren .....	135
5.3.5	Schritt 5: Transfer .....	137

5.4 Fazit .....	138
<b>6 Anwendung und Bewertung.....</b>	<b>139</b>
6.1 Überblick .....	139
6.2 Szenario-Steckbrief.....	139
6.2.1 Fallbeispiel Thermoformverpackungsmaschine .....	139
6.2.2 Fazit .....	145
6.3 Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs.....	147
6.3.1 Fallbeispiel Thermoformverpackungsmaschine .....	147
6.3.2 Fazit .....	151
6.4 Gestaltungspool .....	151
6.4.1 Fallbeispiel Faltschachtel-Aufrichtemaschine .....	151
6.4.2 Fazit .....	155
6.5 Bewertung .....	155
6.5.1 Beurteilung des Gesamtkonzepts und der Methodenbausteine ..	155
6.5.2 Aufwand und Nutzen .....	157
<b>7 Schlussbetrachtung .....</b>	<b>159</b>
7.1 Zusammenfassung .....	159
7.2 Ausblick .....	160
<b>8 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>163</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>191</b>
9.1 Eingabewerte des Wirtschaftlichkeitsmodells .....	191
9.2 Berechnungsgrundlage des Wirtschaftlichkeitsmodells .....	193



**10 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten ..... 197**



## Abkürzungsverzeichnis

µm	Mikrometer
al.	lat.: alii für dt. andere
BAZ	Bearbeitungszentrum
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	engl.: Computer Aided Design für dt.: Computer-unterstütztes Design
CAM	engl.: Computer Aided Manufacturing für dt.: Computer-unterstützte Fertigung
Cermet	engl.: ceramic metals für dt.: Keramik Metall. Cermets sind Verbundwerkstoffe, bestehend aus keramischen Werkstoffen mit einer metallischen Matrix.
CIRUS	engl.: Cermet-Integrated-Resistive-Ultrafast-Sensorless-Heaters für dt. Cermet-integrierter und sensorfreier Hochgeschwindigkeitswiderstandsheizler.
dt.	deutsch
DIN	Deutsches Institut für Normung
DFC	engl.: Design for Changeover für dt.: rüstooptimiertes Design
DfX	engl.: Design for X für dt.: Design fokussiert auf einen bestimmten Aspekt X
DoF	engl.: Degrees of Freedom für dt.: Freiheitsgrade
EKUV	Eliminieren, Kombinieren, Umstellen und Verbessern
engl.	englisch
et	und
EVOH	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

f.	folgende [Seite]
ff.	folgende [Seiten]
FEFCO	franz.: Fédération Européenne des Fabricants de Carton Ondulé für dt.: Europäische Vereinigung der Wellpapperhersteller
franz.	französisch
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFS	Flexible Fertigungssysteme
FFZ	Flexible Fertigungszelle
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
h	lat.: hora für Stunde
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
lat.	lateinisch
LLDPE	engl.: Linear Low Density Polyethylene für dt.: lineares Polyethylen niederer Dichte
MKISW	Multi-Kontur-Impulssiegelwerkzeug
MTM	engl.: methods-time measurement für dt.: Arbeitsablauf-Zeitanalyse
N	Newton
NiCr	Nickel-Chrom
nm	Nanometer
OEE	engl.: Overall Equipment Effectiveness für dt.: Gesamtanlageneffektivität
o. g.	oben genannt
PA	Polyamid

PDCA	engl.: Plan-Do-Check-Act für dt.: Planen-Umsetzen-Überprüfen-Handeln
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PPR-Modell	Produkt-Prozess-Ressourcen-Modell
PS	Polystyrol
RE	Ressourceneinheit
S.	Seite
SMED	engl.: Single-Minute Exchange of Die für dt.: Werkzeugwechsel im einstelligen Minutenbereich
sog.	sogenannt(en)(es)
Stk.	Stück
u. a.	unter anderem
UAS	Universelles Analysiersystem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel

## Verzeichnis der Formelzeichen

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$A$	-	<i>Verfügbarkeit</i>
$A_t$	€	<i>Jährliche Auszahlung</i>
$B_{MA}$	1	<i>Anzahl der Bedienmitarbeiter</i>
$B_{RMA}$	1	<i>Anzahl der Rüstmitarbeiter</i>
$e_t$	€	<i>Erlös pro Stück</i>
$E_t$	€	<i>Jährliche Einzahlung</i>
$I_{DA}$	%	<i>Rüstaktivitätenindex</i>
$I_{DE}$	%	<i>Designeffizienzindex</i>
$i$	%	<i>Zinssatz</i>
$K_B$	€/h	<i>Stundensatz des Bedienpersonals</i>
$K_R$	€/h	<i>Stundensatz des Rüstpersonals</i>
$K_{\text{Betrieb},t}$	€	<i>Jährliche weitere Betriebskosten</i>
$K_{B\text{Personal},t}$	€	<i>Jährliche Personalkosten für das Bedienpersonal</i>
$K_{\text{Werkzeug},t}$	€	<i>Formatwerkzeugkosten</i>
$K_{\text{Invest},t}$	€	<i>Maschinenkosten</i>
$K_{\text{Personal},t}$	€	<i>Jährliche Personalkosten</i>
$K_{R\text{Personal},t}$	€	<i>Jährliche Personalkosten für das Rüstpersonal</i>
$n$	$a$	<i>Nutzungsdauer einer Investition</i>
$NPV$	€	<i>Kapitalwert</i>
$OEE$	-	<i>Gesamtanlageneffektivität</i>
$P$	-	<i>Leistungsgrad</i>

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$p_{N,R}(t)$	Stk./h	Nachlaufleistung
$p_S$	Stk./h	Einstellausbringung
$p_{V,R}(t)$	Stk./h	Vorlaufleistung
$Q$	-	Qualitätsgrad
$q_{LP,R}$	Stk.	Verlustmenge aufgrund der verminderten Ausbringung je Formatwechsel
$q_{LP,t}$	Stk.	Jährliche Verlustmenge infolge einer verminderten Ausbringung
$q_{LQ,t}$	Stk.	Jährliche Ausschussmenge
$q_{M,t}$	Stk.	Jährliche Produktionsmenge
$q_{N,R}$	Stk.	Verluste der Nachlaufphase je Formatwechsel
$q_{N,R}(t)$	Stk./h	Nachlaufleistung
$q_{O,t}$	Stk.	Jährlich geplante Produktionsmenge
$q_{Q,t}$	Stk.	Jährliche Qualitätsmenge
$q_{V,R}$	Stk.	Verluste der Vorlaufphase je Formatwechsel
$q_{V,R}(t)$	Stk./h	Vorlaufleistung
$R$	-	Anzahl der Formatwechsel
$t$	a	Zeitperiode
$t_D$	h	Geplante Stillstandszeit
$t_{D,t}$	h	Jährlich geplante Stillstandszeit
$t_I$	h	Ungenutzte Zeit
$t_{LP}$	h	Verlustzeit infolge verminderter Ausbringung
$t_{Nachlauf}$	h	Nachlaufzeit
$t_O$	h	Betriebszeit
$t_{O,t}$	h	Jährliche Betriebszeit
$t_R$	h	Laufzeit

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$t_s$	$h$	<i>Dauer eines Rüstvorganges</i>
$t_T$	$h$	<i>Theoretisch nutzbare Zeit</i>
$t_{\text{Vorlauf}}$	$h$	<i>Vorlaufzeit</i>
$t_w$	$h$	<i>Maschinenarbeitszeit</i>
$t_{w,t}$	$h$	<i>Jährliche Maschinenarbeitszeit</i>



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die steigende Nachfrage nach individuelleren Produkten induziert eine zunehmende Variantenvielfalt, kleinere Losgrößen sowie kürzere Entwicklungszeiten und daher „(...) muss die Produktionstechnik auch weiterhin produktiver, zuverlässiger und flexibler (...)“ werden (NEUGEBAUER 2012, S. 8). Eine flexible Produktion ermöglicht es, auf kurzfristige Schwankungen der Nachfrage reagieren zu können (ERLACH 2010, S. 14). Die gesättigten Märkte erfordern eine Produktdiversifizierung, die eine Vielzahl von Branchen betrifft (RUDOLF 2006, S. 151). Die Erfüllung von individuellen Bedürfnissen der Kunden, z. B. in der Konsumgüterindustrie, steht hierbei im Vordergrund (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 124). Trotzdem sind individualisierte Produkte zu niedrigen Preisen anzubieten (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 124). Beispielsweise stieg im Zeitraum von 1997 bis 2012 in der Konsumgüterindustrie die Variantenanzahl um 62 % bei einer gleichzeitigen Verkürzung des Produktlebenszyklus um 46 % (ROLAND BERGER 2012). Somit werden die Produktionszielgrößen Herstellkosten und Qualität ihre Bedeutung beibehalten, allerdings die Faktoren Geschwindigkeit und Anpassbarkeit die Produktionsgestaltung maßgeblich beeinflussen (ABELE & REINHART 2011, S. 34). Infolge des Zukunftsprojektes der deutschen Bundesregierung Industrie 4.0 wird diese Entwicklung an Dynamik gewinnen. Für die Realisierung einer dezentral vernetzten Industrie ist die Veränderungsfähigkeit und Anpassbarkeit von Produktionssystemen und Betriebsmitteln ein entscheidender Befähiger (KAGERMANN ET AL. 2013, S. 35).

Auch die verpackende Industrie versucht durch eine steigende Produktdiversifikation den Kundennutzen der heterogenen Käufergruppen zu steigern und damit dem Markttrend zu folgen (JONAS 2005). Aus diesem Grund steigt auch in dieser Industrie der Bedarf an Flexibilität (BEUTNER & KLAUS 2012). Aus Kundensicht ist das Kaufobjekt die Packung, welche die Einheit aus Produkt und Verpackung ist (JÄGER 2004, S. 184). Daher wirkt sich die zunehmende Variantenvielfalt im entscheidenden Maße auf die Verpackung aus. Insbesondere bei den Produkten des täglichen Bedarfs ist die Wirkung der Packung im Verkaufsregal bedeutend, da sich der Kunde innerhalb weniger Sekunden für ein Produkt eines umfangreichen Sortimentes entscheidet. Die Verpackung hat somit aufgrund ihrer Kommunikationsfunktion einen entscheidenden Anteil am Verkaufserfolg.

## 1 Einleitung

---

Die Vielfalt bei Konsumgütern und insbesondere bei Lebensmitteln und Getränken wird zusätzlich durch weitere Veränderungstreiber beschleunigt, z. B. die Zunahme von Ein- und Zwei-Personen-Haushalten (PACKAGING VALLEY GERMANY & PACKAGING EXCELLENCE CENTER 2012, S. 119) und die Nachfrage nach Convenience-Produkten (BEUTNER & KLAUS 2012). Allerdings bleibt weiterhin der Preis für 79 % der Konsumenten ein entscheidender Faktor im Hinblick auf die Produktzufriedenheit (LEBENSMITTEL ZEITUNG 2014). Im Jahr 2014 betrug der Anteil des Verpackungsabsatzes in der Konsumgüterindustrie für die Segmente Nahrungsmittel und Getränke zusammen 72 % (CLAUS 2015). Gesetzliche Veränderungen der Fertigpackungsverordnung aus dem Jahre 2009 ermöglichen zudem eine Variation der Packungsgrößen und Füllmengen (RODER 2009). Eine weitere Beschleunigung dieser Entwicklungen kann der Online-Lebensmittelhandel bewirken. Im Jahr 2014 wurden in Deutschland nur 0,3 % der Umsätze online getätigt, wobei in Großbritannien der Anteil auf 5 % beziffert wird (ERNST & YOUNG 2014). Allerdings wird für Deutschland im Jahr 2020 mit einem Marktanteil von 10 % gerechnet (ERNST & YOUNG 2014). Die zunehmende Anzahl an neuen Marktteilnehmern in diesem Segment verdeutlicht die Dynamik, z. B. Lebensmittel.de oder Amazonfresh.

Zukünftig sind daher noch mehr unterschiedliche Packungen mit den eingesetzten Verpackungsmaschinen herzustellen. Verfahren der Reihenfolgenoptimierung und der Zusammenfassung zu Produktionslosen sind in der Lebensmittelherstellung und -verpackung, aufgrund der Mindesthaltbarkeit und des möglichen Produktverderbs, nicht möglich (MAHALIK & NAMBIAR 2010; RÖMISCH & WEIß 2014, S. 330). Die schrumpfenden Losgrößen verursachen häufigere Produktwechsel und die notwendigen Umrüstvorgänge erfordern „(...) einen so hohen Zeit- und Personalaufwand, dass keine kostendeckende Produktion möglich ist“ (HENNIG 2011, S. 198). Die Summe der Produktwechsel, die mit einem Umrüstvorgang umgesetzt werden müssen, führen zu einer Reduktion der Anlagenverfügbarkeit, bspw. bewertet mit der OEE-Kennzahl (engl. Overall Equipment Effectiveness) (MCINTOSH ET AL. 2001, S. 30; AIOE 2012). In NYHUIS ET AL. (2008b, S. 125) wird dies mit der Abhängigkeit „*Flexibilität = Auslastung = Profitabilität*“ beschrieben.

In Summe ist die Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen die notwendige Maßnahme, um die dargestellten Herausforderungen, u. a. einer großen Produktvielfalt und einer Reduktion der Losgrößen, wirtschaftlich meistern zu können (BÜCKLE & HUBER 2005, S. 11; WILKE 2011; PACKAGING VALLEY GERMANY & PACKAGING EXCELLENCE CENTER 2012, S. 222; CLAUS 2015).

### 1.2 Zielsetzung

Diese Arbeit hat das übergeordnete Ziel die Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen zu steigern. Dies stellt ein geeignetes Mittel dar, um die Zunahme der Variantenvielfalt, die sinkenden Losgrößen und die steigende Anzahl an Formatwechseln zu bewältigen. Diese Zielsetzung ist bereits in der Entwicklung von Verpackungsmaschinen zu berücksichtigen, damit die dortigen Potenziale und Freiheitsgrade ausgeschöpft werden können. Der steigende Bedarf an Formatflexibilität ist für den mittelständisch geprägten Verpackungsmaschinenbau eine zusätzliche Zielgröße an die zu entwickelnden Maschinen. Das Anbieten eines formatflexiblen Systems für das Verpacken kann das ausschlaggebende Differenzierungsmerkmal für einen Erfolg am Markt sein, wie dies bspw. von EICHHORN (2012, S. 53) für Werkzeugmaschinen gesehen wird. Für das Erreichen dieser Zielgröße im Rahmen des Entwicklungsprozesses von Verpackungsmaschinen existiert bisher keine durchgängige Betrachtung. Daher ist im Rahmen dieser Arbeit ein Vorgehen zu entwickeln, welches eine zielgerichtete und effiziente Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen unterstützt. Dieses Vorgehen soll die Schritte eines Entwicklungsprozesses fokussieren, welche einen entscheidenden Einfluss auf die Formatflexibilität der zu entwickelnden Verpackungsmaschinen haben. Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit stellt die Entwicklung von Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität dar. Die Integration dieser Verfahren in Verpackungsmaschinen führt zu einer Steigerung der Formatflexibilität. Die Anwendung des Vorgehens soll den praktischen Nutzung und die vorhandenen Potenziale aufzeigen.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit ist in insgesamt sieben Kapitel untergliedert, vgl. Abbildung 1. Nachdem in *Kapitel 1* die Ausgangssituation und Motivation sowie die Zielsetzung dargelegt sind, werden in *Kapitel 2* die Grundlagen für diese Arbeit behandelt. Das zweite Kapitel beinhaltet die Themen Verpackungstechnik sowie die Veränderungsfähigkeit als das Potenzial von Systemen, sich an geänderte Einflussfaktoren anpassen zu können. Auf dieser Basis wird der Begriff Formatflexibilität definiert und charakterisiert. In *Kapitel 3* wird der Stand der Erkenntnisse aufgezeigt. Hierfür werden wissenschaftliche und methodische Arbeiten diskutiert, die zu einer Flexibilitätssteigerung führen sollen. Ferner werden technische Lösungen der industriellen Praxis des Werkzeug- und Verpackungsmaschinenbaus dargelegt und die resultierenden Handlungsfelder abgeleitet.

# 1 Einleitung

---

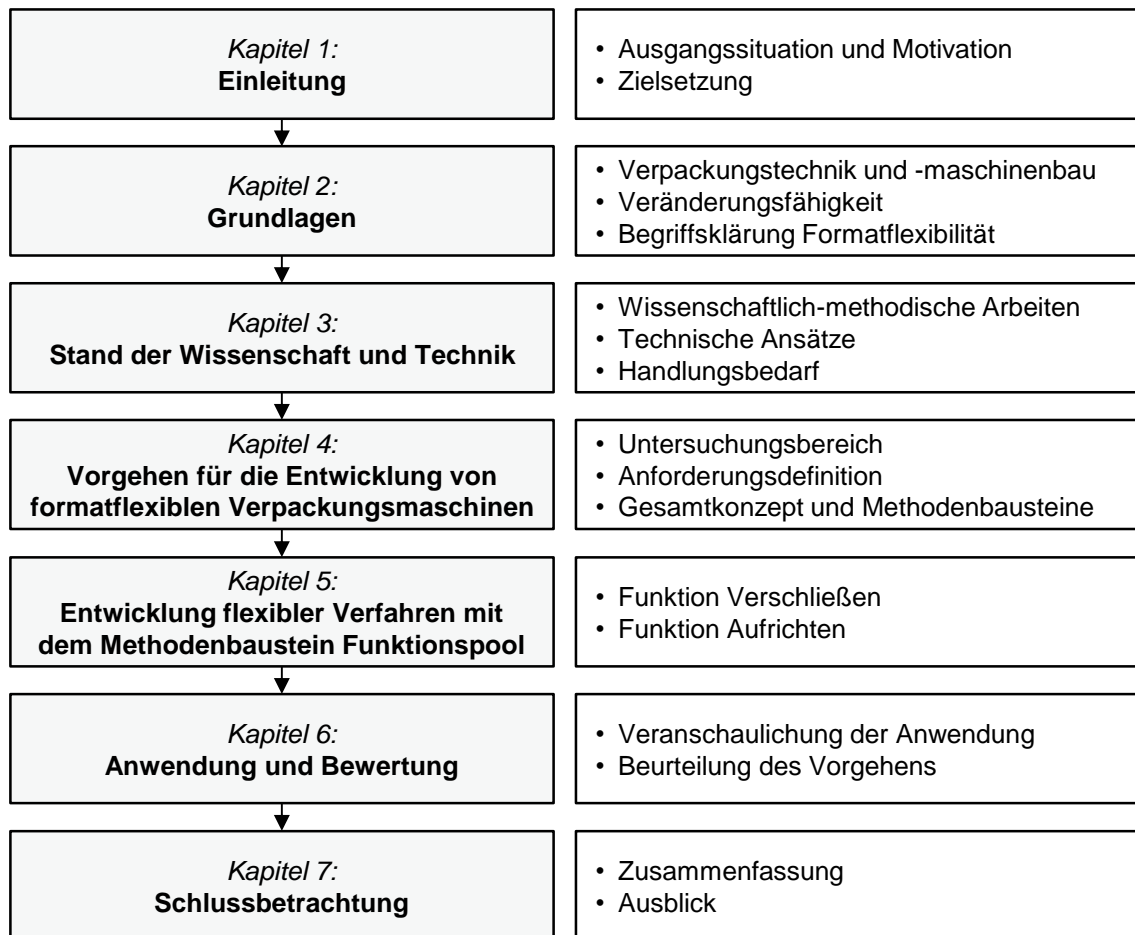


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Für die Erarbeitung des Vorgehens werden in *Kapitel 4* der Untersuchungsbereich und der damit verbundene Betrachtungsfokus spezifiziert sowie die Anforderungen beschrieben. Auf dieser Basis wird das Gesamtkonzept eingeführt. Die Konzeption und Entwicklung der vier Methodenbausteine Szenario-Steckbrief, Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs, Funktionspool und Gestaltungspool erfolgt ebenfalls in diesem Kapitel. In *Kapitel 5* werden mithilfe des Methodenbausteins Funktionspool Verfahren entwickelt, die zu einer Steigerung der Formatflexibilität der Funktionen Verschließen bei Thermoformverpackungsmaschinen und Aufrichten bei Faltschachtel-Aufrichtemaschinen führen sollen. Anhand von Fallbeispielen wird die Anwendung der anderen drei Methodenbausteine in *Kapitel 6* veranschaulicht. Anschließend werden das Gesamtkonzept und die Methodenbausteine bewertet. Die Schlussbetrachtung dieser Ausarbeitung in Form einer Zusammenfassung und eines Ausblicks folgt in *Kapitel 7*.

# 2 Grundlagen der Verpackungstechnik und der Veränderungsfähigkeit

## 2.1 Überblick

Das Ziel dieses Kapitels ist es, für die Ausführungen dieser Arbeit ein einheitliches Verständnis zu schaffen. Dies ist insbesondere für die Bereiche Verpackungstechnik (Abschnitt 2.2) und Veränderungsfähigkeit (Abschnitt 2.3) entscheidend. Abschließend wird in Abschnitt 2.4 die Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen definiert und anhand von Ausprägungen charakterisiert.

## 2.2 Verpackungstechnik

### 2.2.1 Verpackungsprozess und Verarbeitungsvorgänge

Das *Verpacken* ist der „(...) Vorgang des Verpackungsprozesses, der Packgut mit Packmittel und Packhilfsmittel (der Verpackung) (...) mithilfe von Verpackungsmaschinen (...) oder manuell zu einer Packung vereinigt“ (BLEISCH ET AL. 2014, S. 543). Synonym verwendete Begriffe für das Verpacken sind das Ein- oder das Abpacken (BLEISCH ET AL. 2014, S. 543). Die Packung stellt das Kaufobjekt dar (JÄGER 2004, S. 184). Daher ist die Verpackung ein integraler Bestandteil des Objektes, welches der Kunde käuflich erwirbt und teilweise der einzige Bestandteil des Kaufobjektes, welcher für den Kunden visuell oder haptisch erfahrbar ist. Die Verpackung hat oftmals eine deutlich kürzere Lebensdauer als das Packgut. Aus den Verpackungskomponenten Packmittel und Packhilfsmittel setzt sich wiederum die Verpackung zusammen, vgl. Abbildung 2. Die Verarbeitung der Packmittel und der Packhilfsmittel sind abhängig vom jeweiligen Vorfertigungsgrad auch Teil des Verpackungsprozesses, welcher durch das Betriebsmittel Verpackungsmaschine ausgeführt wird.

Die eingesetzten Verpackungsmaterialien sind vielfältig. Hinsichtlich der Werkstoffe der Pack- und Packhilfsmittel werden folgende maßgeblichen Gruppen unterschieden (BERNDT & SELLSCHOPF 2011, S. 19 ff.): Kunststoffe (Anteil 2013: 42,5 %), Papier/Pappe/Karton (33,2 %), Metalle (16,6 %) sowie Glas (7,8 %)¹.

---

¹ Die in Klammern dargestellten Anteile sind Angaben des Gemeinschaftsausschuss deutscher Verpackungshersteller (GADV 2016).

## 2 Grundlagen der Verpackungstechnik und der Veränderungsfähigkeit

---

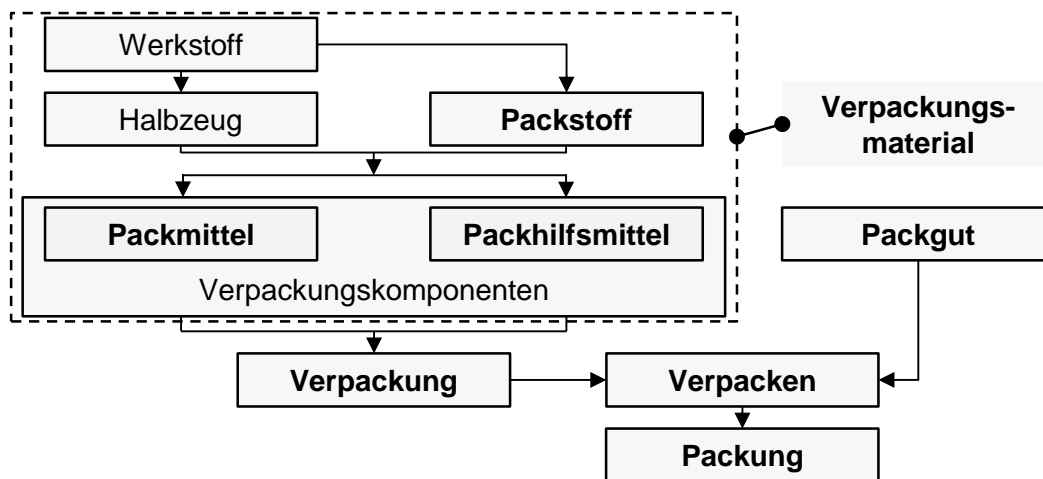


Abbildung 2: Verknüpfung der verpackungstechnischen Grundbegriffe nach BLEISCH ET AL. (2011, S. 10)

Packmittel werden hinsichtlich des Vorfertigungsgrades in drei Gruppen eingeteilt. Dies sind Packmittel mit einem hohen, z. B. Flaschen, sowie mit einem mittleren, z. B. Faltschachteln, und mit einem geringen Vorfertigungsgrad (BLEISCH ET AL. 2014, S. 579 f.). Packmittel mit einem geringen Vorfertigungsgrad werden erst im Verpackungsprozess geformt, z. B. Kunststofffolien für thermogeformte Schalen oder Becher (BLEISCH ET AL. 2014, S. 579 f.).

Das zielgerichtete Einwirken auf die Verarbeitungsgüter Packgut, Packmittel oder Packhilfsmittel für die Herstellung einer qualitätsgerechten Packung ist ein Verpackungsvorgang (BLEISCH ET AL. 2011, S. 171). Die Summe der Verpackungsvorgänge bilden den gesamten Verpackungsprozess ab (BLEISCH ET AL. 2011, S. 171). Unter einem Verpackungsverfahren wird „(...) die Folge von technischen Einwirkungen auf das Packgut, das Packmittel und das Packhilfsmittel (verstanden), die unter vorgegebenen Bedingungen sicherstellen, dass die Verpackungsaufgabe in dem jeweiligen Abschnitt des Verpackungsprozess (...) gelöst wird“ (HENNIG 2013, G1 S. 1). Somit wird der gesamte Verpackungsprozess durch einzelne Verpackungsvorgänge abgebildet. Eine bestimmte technologische Folge von Verpackungsvorgängen kann als Verpackungsverfahren zusammengefasst werden. Bei den Verpackungsvorgängen wird zwischen Haupt- und Nebenvorgängen unterschieden (BLEISCH ET AL. 2011, S. 171). Die unterschiedlichen Hauptvorgänge sind das Formen des Packmittels, das Füllen einer bestimmten Menge des Packgutes in das Packmittel sowie das Verschließen des Packmittels, wobei diese Reihenfolge den Ablauf des Verpackungsprozesses widerspiegelt (BLEISCH ET AL. 2014, S. 568 f.). Beispiele für Nebenvorgänge sind das Dosieren und das Kennzeichnen (BLEISCH ET AL. 2011, S. 172).

Der gesamte Verpackungsprozess kann in einzelne Stufen gegliedert werden, wobei eine Packung das Packgut der nachfolgenden Verpackungsstufe darstellt (DIN 55405). Hieraus resultiert eine Einteilung der Verpackungen gemäß der jeweiligen Verpackungsstufe, u. a. Primär-, Sekundär-, Tertiär- und Transportverpackung (DIN 55405). Im Hinblick auf eine funktionelle Betrachtung werden Verpackungsvorgänge durch Verarbeitungsvorgänge ausgeführt (BLEISCH ET AL. 2011, S. 172). Die Vielzahl an Verarbeitungsvorgängen kann anhand von sieben Vorganggruppen strukturiert werden, u. a. Trennen, Fügen, Formen und Fördern (MAJSCHAK 2014, S. F 40). Beispiele für den Verarbeitungsvorgang Formen sind das Schlauchformen und das Aufrichten (BLEISCH ET AL. 2014, S. 192). In Analogie zu dem Begriff der Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580 können Verarbeitungsvorgänge auch als Verarbeitungsverfahren bezeichnet werden.

In einer verarbeitungstechnischen Betrachtung stellen die Komponenten einer Packung die Verarbeitungsgüter dar. Es werden die folgenden sieben Gutvarianten unterschieden: Strang- und Fadenformgut, Flachformgut, Stückgut, Schüttgut, pastöses Gut, flüssiges Gut sowie gasförmiges Gut (BLEISCH ET AL. 2014, S. 534; RÖMISCH & WEIß 2014, S. 47). Die kleinste funktionale Einheit eines Verarbeitungssystems stellt die Wirkpaarung dar (BLEISCH ET AL. 2011, S. 190). Ein Verarbeitungsprozess kann somit auch mehrere Wirkpaarungen umfassen (RÖMISCH & WEIß 2014, S. 10). Die Wirkpaarung beschreibt die Wechselwirkung zwischen dem Arbeitsorgan und dem Verarbeitungsgut sowie die damit verbundenen Relationen, welche die Funktionserfüllung des stoffverarbeitenden Systems generieren (BLEISCH ET AL. 2011, S. 191). Unter einem Arbeitsorgan kann auch ein Werkzeug verstanden werden. Das Arbeitsorgan bzw. Werkzeug ist der Funktionsträger und realisiert die für den Verarbeitungsprozess entscheidende Eigenschaftsänderung des Verarbeitungsgutes (MAJSCHAK 1996, S. 48).

### 2.2.2 Verpackungsmaschinen und -anlagen

BLEISCH ET AL. (2011, S. 235) definieren *Verpackungsmaschinen* als „ (...) Maschinen, die zum Herstellen von Packungen einen oder mehrere zum Verpacken gehörende Hauptvorgänge oder vor- und nachgeschaltete Vorgänge ausführen.“ Durch eine Mechanisierung und Automatisierung des Verpackungsprozesses wird die Ausbringung gesteigert, die Kosten gesenkt und eine definierte Packungsqualität sichergestellt (BLEISCH ET AL. 2014, S. 554). Verpackungsmaschinen werden der Klasse der Verarbeitungsmaschinen zugeordnet, da die Verpackungsvorgänge durch Vorgänge und Verfahren der Verarbeitungstechnik realisiert werden (BLEISCH ET AL. 2014, S. 555 & S. 566).

## 2 Grundlagen der Verpackungstechnik und der Veränderungsfähigkeit

---

Da die Definition von Verpackungsmaschinen an die Umsetzung des Verpackungsprozesses gebunden ist, werden bspw. Formmaschinen für Verpackungskomponenten, welche nicht innerhalb eines Verpackungsprozesses eingesetzt werden, den Packmittelherstellmaschinen zugeordnet (BLEISCH ET AL. 2003, S. 450). Eine Systematisierung nach funktionellen Gesichtspunkten untergliedert Verpackungsmaschinen in die folgenden Gruppen: Formmaschinen, Füllmaschinen, Verschließmaschinen, Form- und Füllmaschinen, Füll- und Verschließmaschinen, Form-, Füll- und Verschließmaschinen sowie Einschlagmaschinen (BLEISCH ET AL. 2011, S. 241 f.; HENNIG 2011, S. 217). Die technologische Spezifizierung erfolgt durch die Ergänzung der Maschinenbezeichnung mit dem Packmittel, z. B. Becherformmaschine, Schlauchbeutel-Form-, Füll- und Verschließmaschine (BLEISCH ET AL. 2011, S. 242). Trotz dieses Benennungsschemas sind oftmals alternative Bezeichnungen, z. B. Thermoformverpackungsmaschine, oder vereinfachte Bezeichnungen, z. B. Sammelpackmaschine, verbreitet.

Verpackungsmaschinen werden aufgrund ihrer Hauptaufgabe den Stoff verarbeitenden Maschinen zugeordnet (HENNIG 2011, S. 201). Eine Verarbeitungs- und somit auch eine Verpackungsmaschine kann im Allgemeinen in vier Teilsysteme gegliedert werden (HENNIG 2011, S. 201; MAJSCHAK 2014, S. F 40). Diese Teilsysteme sind das Verarbeitungs-, das Antriebs- bzw. Energiebereitstellungs-, das Steuerungs- sowie das Stütz- und Hüllsystem, vgl. Abbildung 3. Diese Gliederung orientiert sich an der Beschreibung von technischen Systemen anhand ihrer Stoff-, Energie- und Informationsflüsse (BLEISCH ET AL. 2011, S. 250).

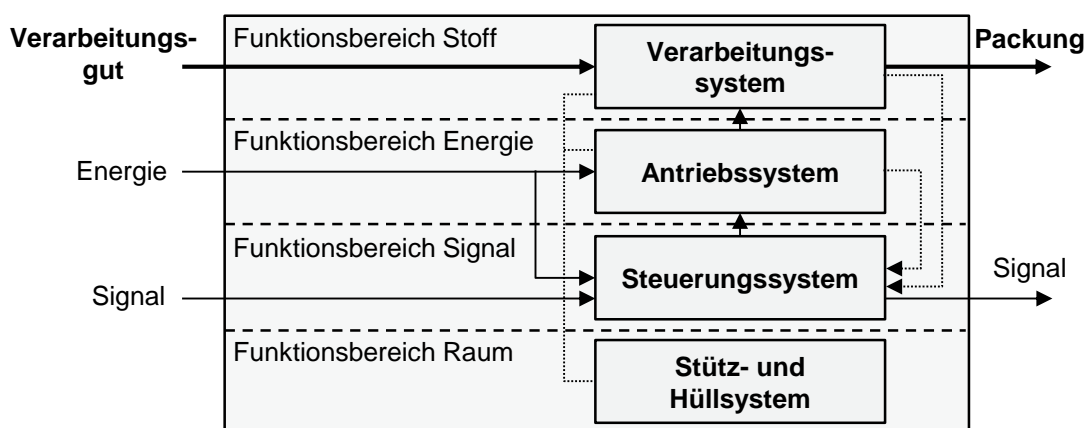


Abbildung 3: Teilsysteme einer Verpackungsmaschine in Anlehnung an HENNIG (2011, S. 201) und MAJSCHAK (2014, S. F 40)

Eine beispielhafte und vereinfachte Zuordnung dieser vier Teilsysteme einer Thermoformverpackungsmaschine ist in Abbildung 4 dargestellt.



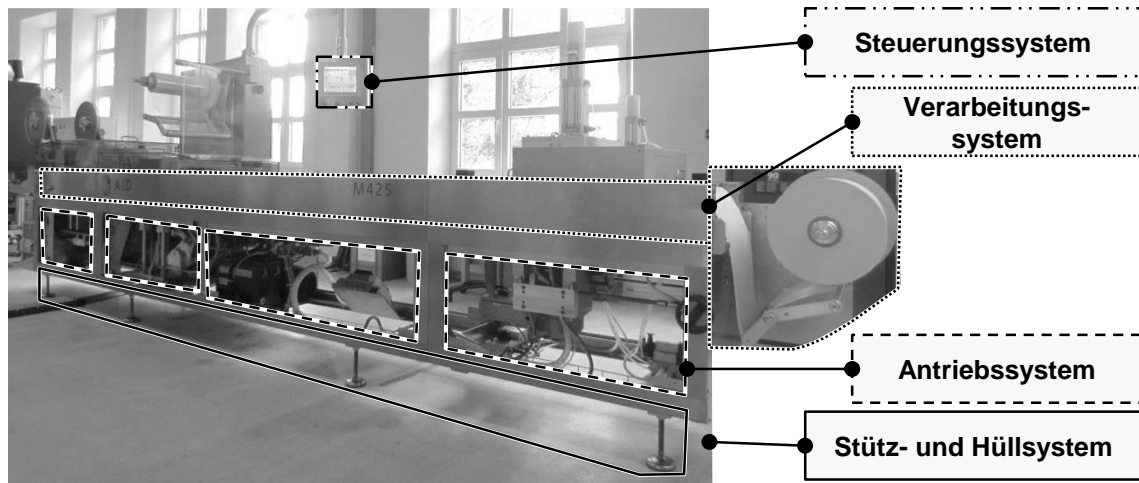


Abbildung 4: *Thermofomverpackungsmaschine mit vereinfachter Zuordnung der vier Teilsysteme einer Verpackungsmaschine*

Die Kernelemente von Verpackungsanlagen sind Verpackungsmaschinen (HENNIG 2013, G1 S. 2). Somit setzen sich Verpackungsanlagen u. a. aus verbundenen Verpackungsmaschinen und -einrichtungen sowie Verkettungseinrichtungen zusammen (HENNIG 2013, G1 S. 2). Weitere synonyme Begriffe sind Verpackungssysteme oder Verpackungslinien (HENNIG 2013, G1 S. 1). Allerdings versteht BLEISCH ET AL. (2011, S. 29) unter Verpackungssystemen die Betrachtung der Verpackungskomponenten von der Primärverpackung bis hin zur Ladeinheit. Für BOECKLE (1994, S. 3) ist unter einem Verpackungssystem die „(...) Einheit aller (...) Elemente zu verstehen, die den Lebensweg von Verpackungen von der Konzeption, der Herstellung, der Verwendung bis zur Entsorgung kennzeichnen.“ Der Automatisierungsgrad von Verpackungsanlagen wird zunehmend gesteigert, um u. a. Personalkosten zu reduzieren (HENNIG 2013, G1 S. 5).

### 2.3 Veränderungsfähigkeit

Aufgrund der aktuellen Herausforderungen wird die situationsgerechte Anpassung an externen und internen Turbulenzen zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen (ABELE & REINHART 2011, S. 72 ff.). Ein externer Veränderungsbedarf wird durch Veränderungen bzw. Unsicherheiten außerhalb des produzierenden Unternehmens hervorgerufen, z. B. auf den Distributionsmärkten (KALUZA 2007). Eine Produktneueinführung ist ein Beispiel für einen internen Veränderungstreiber (KLEMKE 2014, S. 15). Der Veränderungsbedarf wird durch diese Treiber injiziert und wirkt sich in Form von Veränderungsdimensionen, z. B. Variantenanzahl, auf die Produktion aus (KLEMKE 2014, S. 15).

## **2 Grundlagen der Verpackungstechnik und der Veränderungsfähigkeit**

---

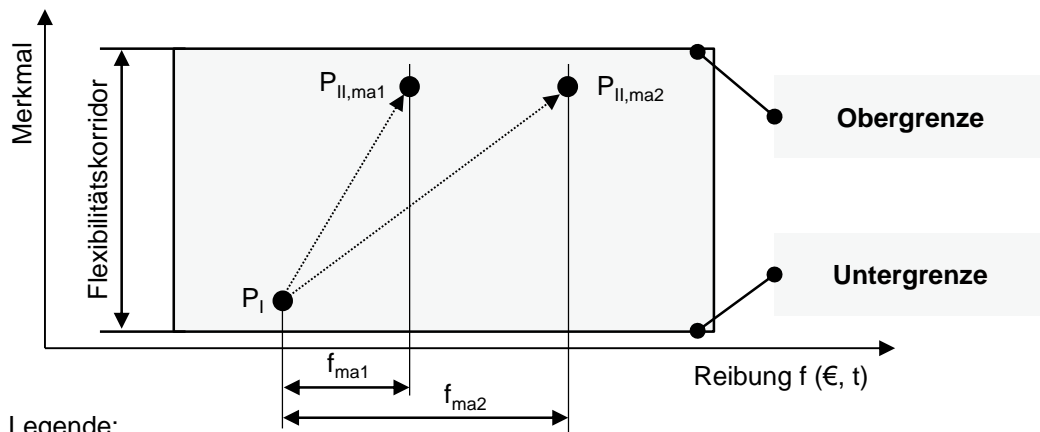
Allgemein wird die Fähigkeit, diese Anpassungen durchführen zu können, unter dem Begriff Veränderungsfähigkeit zusammengefasst (WIENDAHL ET AL. 2009, S. 115). Aufgrund der Vielfalt an Turbulenzen und Unsicherheiten sind unterschiedliche Ausprägungen der Veränderungsfähigkeit entstanden (SALEH ET AL. 2009). In der Produktionstechnik wurden in den letzten zwei Jahrzehnten die Begrifflichkeiten im Kontext der Veränderungsfähigkeit häufig definiert und vielschichtig interpretiert (u. a. SETHI & SETHI 1990, SALEH ET AL. 2009, WIENDAHL 2009). Die eingeführten Definitionen weisen teilweise begriffliche Überschneidungen sowie definitorische Unschärfen auf. Daher wird in den nachfolgenden Abschnitten das für diese Arbeit grundlegende Verständnis der Begriffe Flexibilität und Umrüstbarkeit sowie Wandlungsfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit in Bezug auf das Untersuchungsobjekt Verpackungsmaschine vermittelt. Ausführliche Darstellungen und Diskussionen sowie die Abgrenzungen weiterer Begrifflichkeiten können der einschlägigen Literatur entnommen werden (z. B. SLACK 1983, GERWIN 1987, SETHI & SETHI 1990, DE TONI & TONCHIA 1998, SHEWCHUK & MOODIE 1998, NARAIN ET AL. 2000, WIENDAHL 2002, NYHUIS ET AL. 2008a, NYHUIS ET AL. 2008b, SALEH ET AL. 2009, WIENDAHL 2009).

### **2.3.1 Flexibilität und Umrüstbarkeit**

Die *Flexibilität* ist der am häufigsten eingesetzte Begriff im Umfeld der Veränderungsfähigkeit, da unter diesem zumeist alle Anpassungsmöglichkeiten subsumiert werden (LORENZER 2010, S. 7). Dies ist sicherlich auch darin begründet, dass in der englischsprachigen Literatur allgemein der Begriff „flexibility“ verwendet wird. Da der Begriff Flexibilität auch im allgemeinen Sprachgebrauch sehr häufig Einsatz findet und daher keinen fach- oder disziplinspezifischen Terminus darstellt, ist ein undifferenziertes Verständnis weit verbreitet (DÜRRSCHMIDT 2001, S. 22). Für WIENDAHL (2009) ist die Flexibilität eine Klasse der Veränderungsfähigkeit. Die Vielschichtigkeit und Vielseitigkeit verdeutlicht WIENDAHL (2002) wie folgt: „Die Flexibilität kann sich (...) zum einen auf die gesamte Wertschöpfungskette vom Lieferanten bis zum Kunden beziehen (...), zum anderen kann sie unterschiedliche Ebenen der Produktion vom einzelnen Arbeitsplatz (...) bis hin zu einem Produktionsnetzwerk betreffen (...).“

Die Flexibilität eines Produktionssystems definiert ABELE ET AL. (2006) als die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und mit sehr geringem Aufwand an geänderte Einflussfaktoren anzupassen. Für die Realisierung dieser Anpassungen eines Produktionssystems sind sowohl eine reale bzw. physische als auch eine dispositive Flexibilität vorzuhalten (KALUZA 2007). Für KALUZA

(2007) sind Betriebsmittel und die menschliche Arbeitsleistung die Träger der realen Flexibilität. Mithilfe der drei Dimensionen Zeit, Kosten und Zustand ist die Flexibilität beschreibbar (SLACK 1983). Die Zustandsdimension, z. B. Produktionsmenge, spannt einen Flexibilitätskorridor auf. Dieser Flexibilitätskorridor hat definitionsgemäß eine Ober- und eine Untergrenze, vgl. Abbildung 5. Für SLACK (1983) sind die Dimensionen Zeit und Kosten die Reibung eines flexiblen Systems, wobei diese beiden Faktoren große Abhängigkeiten voneinander aufweisen. Beispielphaft kann der in Abbildung 5 dargestellte Betriebspunkt  $P_{II}$  von Maschine  $ma1$  mit weniger Reibung  $f$  als von Maschine  $ma2$  erreicht werden.



Legende:

$P_i$  bzw.  $P_{ij}$ : Betriebspunkte       $ma_i$ : Maschine  $i$  (1, 2, ... n)       $\cdots \rightarrow$  Zustandswechsel

Abbildung 5: Flexibilitätsdimensionen in Anlehnung an SLACK (1983) und Zäh et al. (2005)

Für die Anpassung der jeweiligen Veränderungsdimension an den Bedarf sind Zustandsänderungen in Form von Maßnahmen durchzuführen (GRABL 2015, S. 22). Je nach Ausprägung der Flexibilität stehen organisatorische, personelle, strukturelle sowie technische Maßnahmen zur Verfügung (vgl. u. a. WIENDAHL ET AL. 2009, S. 117). Ferner werden unterschiedliche Flexibilitätstypen differenziert (vgl. u. a. SLACK 1983, SETHI & SETHI 1990, WIENDAHL 2002). GOTTSCHALK (2005, S. 9) unterscheidet z. B. zwischen ressourcen- und zweckorientierten Flexibilitätstypen. Beispiele für ressourcenorientierte Flexibilitätstypen sind Maschinen-, Personal- und Materialflussflexibilität. Liefertermin-, Volumen- sowie die Materialflexibilität sind Beispiele für zweckorientierte Flexibilitätstypen. Eine Möglichkeit, um zwischen zwei Zuständen eines Betriebsmittels, z. B. Produktionsmaschine, zu wechseln, ist die operative Tätigkeit des *Rüstens*. Hierbei wird der aktuelle Zustand in der jeweiligen Ausprägungsdimension, z. B. Produktvariante, an den vorhandenen Bedarf angepasst. Der Rüstvorgang kann daher im Sinne von SLACK (1983) als Reibung interpretiert werden.

## 2 Grundlagen der Verpackungstechnik und der Veränderungsfähigkeit

Für FRÜHWALD (1990, S. 21 f.) ist das Rüsten „(...) das Vorbereiten des Arbeitssystems für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe sowie -soweit erforderlich- das Rückversetzen des Arbeitssystems in den ursprünglichen Zustand.“ Diese Arbeitsaufgabe ist das Herstellen eines anderen Produktes. Je Arbeitsvorgang fällt zumeist nur ein Umrüstvorgang an (FRÜHWALD 1990, S. 21 f.). Die Rüstzeit kann mit der Dauer zwischen dem letzten Gutteil des vorherigen Loses und dem ersten Gutteil der nachfolgenden Variante bestimmt werden (ERLACH 2010, S. 62). Alternativ werden für die Bestimmung die Zeitpunkte vorgeschlagen an dem die Ausbringungsmenge das Sollniveau verlässt bzw. dieses wieder erreicht (MILEHAM ET AL. 2004), vgl. Abbildung 6. Die damit verbundenen Anlaufverluste werden bspw. in der Druckindustrie als Makulatur bezeichnet. Somit umfasst die auf die Maschine bezogene Rüstzeit die Phasen des Nachlaufes bzw. Herunterfahrens, des Maschinenstillstandes und des Hochlaufes.

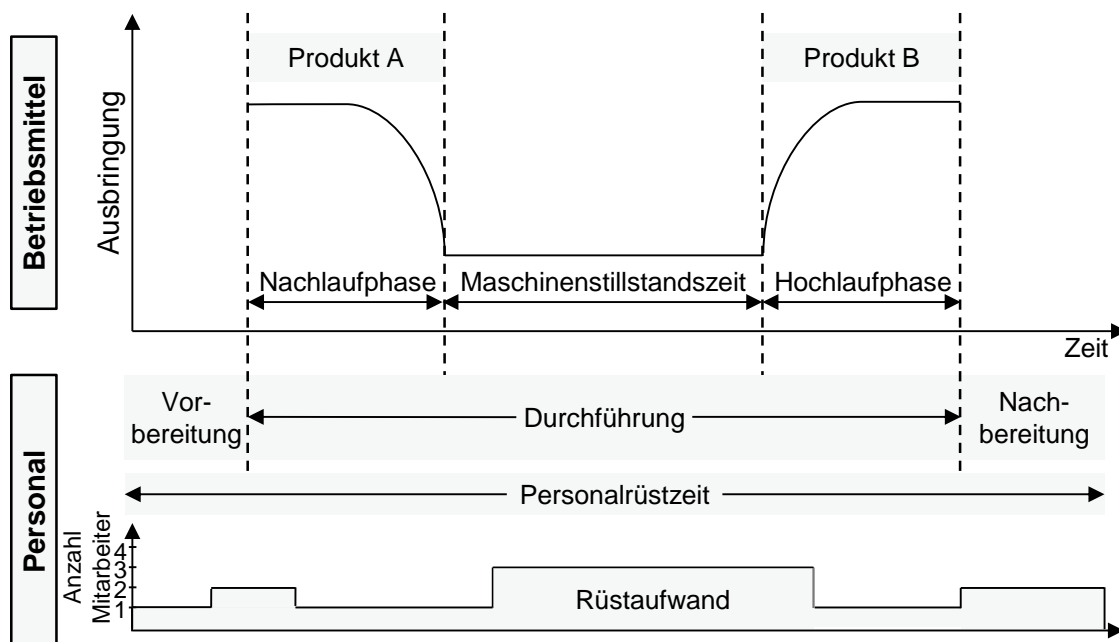


Abbildung 6: Beschreibung von betriebsmittel- und personalbezogenen Rüstzeiten in Anlehnung an FRÜHWALD (1990, S. 18) und MILEHAM ET AL. (2004)

Ein Rüstprozess kann in einzelne Rüsttätigkeiten und den zuordenbaren Rüstobjekten, z. B. Werkstück und Hilfsmittel, untergliedert werden (FRÜHWALD 1990, S. 33). Ein Beispiel stellt das Einlesen (Rüsttätigkeit) in die Fertigungsunterlagen (Rüstobjekt) des neuen Loses dar (WIRTH 1991, S. 6). Ferner werden die Begriffe Umrüsten, Produktwechsel, Umbau und Changeover synonym zum Rüsten verwendet (BLOM 2007, S. 16). In Erweiterung zur Tätigkeit des Rüstens kann die *Umrüstbarkeit* gesehen werden. WIENDAHL (2009) bezeichnet die Umrüstbarkeit

als „(...) die operative Fähigkeit einer einzelnen Maschine oder eines einzelnen Arbeitsplatzes, um zu jedem gewünschten Zeitpunkt mit minimalem Aufwand und in kürzester Zeit definierte Arbeitsoperationen (...) durchführen zu können.“ Somit ist die Umrüstbarkeit ein auf Betriebsmittel bezogenes Potenzial für die Realisierung von flexiblen Produktionsressourcen.

### 2.3.2 Wandlungsfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit

Die *Wandlungsfähigkeit* stellt eine weitere Klasse der Veränderungsfähigkeit dar (WIENDAHL 2009). Unter Wandlungsfähigkeit kann das Potenzial verstanden werden, die vorhandenen Korridore durch Veränderungen zu erweitern bzw. zu verschieben (NYHUIS ET AL. 2008a). Für die Durchführung von Veränderungen im Rahmen der Wandlungsfähigkeit sind zeitliche und monetäre Aktivierungsaufwände notwendig (KLEMKE ET AL. 2012). Anhand der in Abbildung 7 dargestellten Merkmale können die Flexibilität und die Wandlungsfähigkeit unterschieden werden.

Flexibilität		Wandlungsfähigkeit
Veränderung innerhalb der Flexibilitätskorridore	↔	Erweiterung/Verschiebung der Flexibilitätskorridore
Reversibles Verhalten	↔	Strukturelle Veränderungen
Reaktive Anpassungen	↔	Antizipative Anpassungen
Bekannte Anpassungsmaßnahmen	↔	Unbekannte Anpassungsmaßnahmen
Aufwandsarme Anpassungsmaßnahmen	↔	Aufwendigere Anpassungsmaßnahmen

Abbildung 7: Gegenüberstellung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit nach GRAßL (2015, S. 15)

Die Anpassungsmaßnahmen der Wandlungsfähigkeit können u. a. organisatorische oder technische Veränderungen sein (KLEMKE ET AL. 2012). Abhängig vom Wandlungsobjekt und dem jeweiligen anzupassenden Veränderungsmerkmal sind unterschiedliche Wandlungsbefähiger und die damit verbundenen Maßnahmen bekannt (vgl. NYHUIS ET AL. 2008a). Eine Voraussetzung für die Wandlungsfähigkeit wird hierbei in rekonfigurierbaren Systemen gesehen (KIRCHNER ET AL. 2004, WIENDAHL 2009). Das Rekonfigurieren ist die Durchführung der Anpassung und beinhaltet alle Tätigkeiten von der initialen Planung bis zur

## 2 Grundlagen der Verpackungstechnik und der Veränderungsfähigkeit

Sicherstellung der Produktionsbereitschaft (LORENZER 2010, S. 11). Die *Rekonfigurierbarkeit* ist die zugehörige Fähigkeit bzw. das Potenzial eines technischen Systems. Das Rüsten und das Rekonfigurieren sind somit beides Tätigkeiten mit dem Ziel, Produktionssysteme hinsichtlich ihres aktuellen Zustandes in der jeweiligen Ausprägungsdimension, z. B. Produktvariante, anzupassen. Allerdings ist die Umrüstbarkeit eine operative Fähigkeit und die Rekonfigurierbarkeit eine taktische Fähigkeit (WIENDAHL 2009). Eine Rekonfiguration ist die Anpassungsstrategie für technische Systeme, um die Lage und Größe von vorhandenen Flexibilitätskorridoren zu verändern (LORENZER 2010, S. 11). In Abbildung 8 wird dies anhand eines zeitlichen Verlaufes beispielhaft dargestellt.

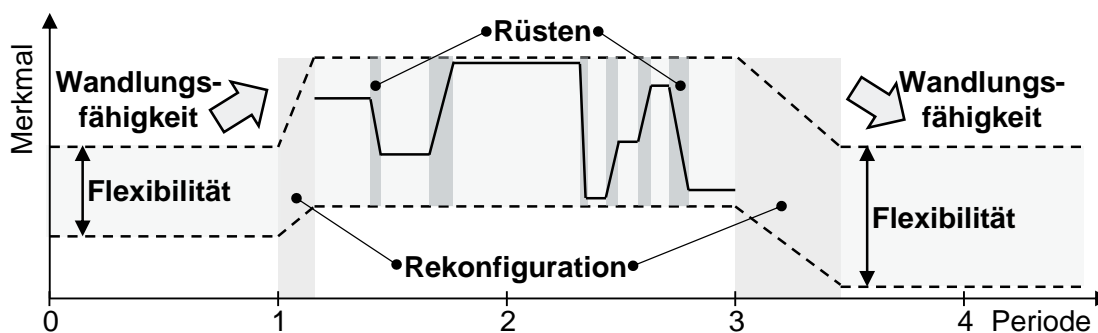


Abbildung 8: Unterscheidung zwischen Wandlungsfähigkeit und Flexibilität in Anlehnung an ZÄH ET AL. (2005)

Die Planung und Durchführung einer Rekonfiguration ist im Vergleich zu einem Rüstvorgang mit deutlich größeren zeitlichen und finanziellen Aufwänden verbunden, da bspw. die Umstellung größtenteils manuell durchgeführt werden muss sowie in der Regel neben dem Planungsvorlauf auch eine Anlauf- und eine Optimierungsphase notwendig sind (WIENDAHL 2009). Allerdings ist innerhalb dieses Flexibilitätskorridors für eine Beherrschung der steigenden Vielzahl von unterschiedlichen Produkten und der damit verbundenen Reduktion der Losgrößen trotzdem die Umrüstbarkeit die maßgebliche Anpassungsstrategie. Auch die beiden Veränderungsklassen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit können nicht losgelöst voneinander betrachtet werden. Ein theoretisch unendlich großer Flexibilitätskorridor würde alle möglichen Zustände von Veränderungsmerkmalen vorsehen und daher einen zukünftigen Bedarf an Wandlungsfähigkeit eliminieren (NYHUIS ET AL. 2008b, S. 24). Eine derart flexible Lösung kann jedoch wirtschaftlich nicht vorteilhaft sein (NYHUIS ET AL. 2008b, S. 24). Somit sind dies keine konkurrierenden Konzepte, da keine der beiden Veränderungsklassen durch die jeweils andere wirtschaftlich sinnvoll substituiert werden kann.

Zusammenfassend fokussiert diese Arbeit die Flexibilität. Eine Steigerung der Flexibilität von Verpackungsmaschinen ist die notwendige Maßnahme, um trotz einer Reduktion der Losgrößen wirtschaftlich verpacken zu können. Die Verbesserung der Umrüstbarkeit von Verpackungsmaschinen stellt hierfür eine Möglichkeit zur Flexibilitätssteigerung dar.

## 2.4 Formatflexibilität

### 2.4.1 Begriffsdefinition

Da die Flexibilität ein vielschichtig interpretierter und häufig definierter Begriff ist, vgl. Abschnitt 2.3, wird dieser für das im Rahmen der Arbeit untersuchte Veränderungsobjekt Verpackungsmaschine spezifiziert und der Begriff Formatflexibilität hergeleitet. Dies soll ein klares Verständnis schaffen und eine zukünftige Einbettung in die Terminologie der Veränderungsfähigkeit ermöglichen.

Die Flexibilität eines Produktionssystems definiert ABELE ET AL. (2006) als die Fähigkeit des Produktionssystems, sich schnell und mit sehr geringem Aufwand an geänderte Einflussfaktoren anzupassen. Der Begriff *Format* bezeichnet in der Verpackungstechnik die „(...) Größe, Gestalt oder Anordnung eines Packgutes, Packmittels oder Packhilfsmittels zur Verarbeitung auf einer Verpackungsmaschine oder auch der auf ihr hergestellten Packung“ (BLEISCH ET AL. 2014, S. 189 f.). Daher wird der Begriff der *Formatflexibilität* wie folgt definiert:

Die Formatflexibilität beschreibt die Fähigkeit einer Verpackungsmaschine, sich schnell und nur mit sehr geringem finanziellen Aufwand auf die Herstellung einer anderen Packung anzupassen.

### 2.4.2 Charakterisierung der Formatflexibilität

Flexibilität kann anhand von drei Dimensionen beschrieben werden (SLACK 1983). Diese sind die Zustands-, die Zeit- und die Kostendimension. Nachfolgend werden diese in Bezug auf die Formatflexibilität konkretisiert.

#### Zustandsdimension

Um eine Packung herstellen zu können, hat eine Verpackungsmaschine einen definierten Zustand einzunehmen. Dieser auf das Gesamtsystem bezogene Zustand setzt sich aus den Zuständen der unterschiedlichen Veränderungsmerkmale der einzelnen Teilsysteme, Baugruppen und Komponenten zusammen.

## 2 Grundlagen der Verpackungstechnik und der Veränderungsfähigkeit

---

Die Veränderungsmerkmale können hierbei ganz unterschiedliche Ausprägungen aufweisen. Dies kann bspw. ein richtig eingebautes und funktionsfähiges Arbeitsorgan bzw. Werkzeug sein sowie die einzustellenden Prozessparameter wie Temperaturen, Zeiten und Drücke.

Der *Flexibilitätskorridor* veranschaulicht die Größe und die Lage der potenziell annehmbaren Zustände eines Veränderungsmerkmals, vgl. Abbildung 5 und Abbildung 7. Erfordert der Verpackungsprozess einen Zustand, welcher nicht Element des Flexibilitätskorridors ist, so kann diese Packung mit dieser Verpackungsmaschine nicht hergestellt werden. Ein hierfür notwendiger Zustandswechsel generiert einen Rekonfigurationsbedarf, vgl. Abschnitt 2.3.2. Liegt der zu erreichende Zustand innerhalb des vorhandenen Flexibilitätskorridors, sollte der Wechsel des Zustands aufwandsarm durch gezielte Anpassungsmaßnahmen erzielt werden können, z. B. Rüsten. Daher sind die Größe und die Lage des Flexibilitätskorridors eines jeden Veränderungsmerkmals entscheidend, um die grundsätzliche Fähigkeit einer Verpackungsmaschine sicherzustellen, dass diese bestimmte Packungen herstellen kann. Die Größe und Lage der Flexibilitätskorridore ist somit maßgeblich von der Auslegung und der Dimensionierung im Rahmen der Gestaltung abhängig. Die geometrischen Abmessungen, in Form von Minimal- und Maximalmaß der Verarbeitungsgüter, kann anhand des sog. Formatbereiches einer Verpackungsmaschine beschrieben werden (BLEISCH ET AL. 2011, S. 262). Wie sich der Zustand des Gesamtsystems aus einzelnen Teilständen zusammensetzt, so ist auch dessen Flexibilitätskorridor eine Aggregation. Im Rahmen dieser Arbeit soll unter einem Formatbereich die Summe aller auf die unterschiedlichen Veränderungsmerkmale bezogenen Flexibilitätskorridore verstanden werden. Ein Formatbereich kann sich daher auf das Veränderungsobjekt, in diesem Fall die Verpackungsmaschine, oder auf die Objekte, welche einen Veränderungsbedarf verursachen, z. B. Packungen, beziehen.

Falls für die Herstellung einer anderen Packung mindestens ein Zustand eines Veränderungsmerkmals angepasst werden muss, so generiert dies einen Formatflexibilitätsbedarf und ein *Zustandswechsel* ist notwendig. In Anbetracht der dargelegten Definitionen, werden alle Zustandswechsel, die aufgrund eines anderen Formates induziert werden, als *Formatwechsel* bezeichnet. Ein solcher Formatwechsel ist u. a. durch einen Rüstvorgang, welcher wiederum vollständig oder teilweise manuell oder automatisiert durchgeführt werden kann, realisierbar. Weitere Möglichkeiten werden im späteren Abschnitt 2.4.3 dargelegt. Falls der Zustandswechsel durch einen Rüstprozess zu erfolgen hat, ist die Umrüstbarkeit die notwendige Eigenschaft einer formatflexiblen Verpackungsmaschine. Ferner



können die Zustandswechsel abhängig von den beiden aufeinanderfolgenden Packungen variieren. Ein Zustandswechsel verursacht einen sogenannten Reibungsverlust, welcher eine gemeinsame Betrachtung der beiden Dimensionen Zeit und Kosten darstellt (ZÄH ET AL. 2006a). MCINTOSH ET AL. (2001) ordnet einem Zustandswechsel zusätzlich eine Qualitätsdimension zu. Da sich diese in einer höheren Reproduzierbarkeit äußert, wirkt sich dies unmittelbar auf die Zeit- bzw. Kostendimension aus. Daher wird diese Dimension nicht separat betrachtet.

### **Zeitdimension**

Bei der Zeitdimension kann zwischen der maschinen- und der personenbezogenen Betrachtung unterschieden werden, vgl. Abbildung 6. Diese zeitlichen Aufwände fallen grundsätzlich bei jedem Formatwechsel an. Die Maschinenstillstandszeit sowie die Hoch- und Nachlaufzeit sind die drei zeitlichen Abschnitte eines Rüstvorganges in Bezug auf die Maschine. Im Gegensatz zu den beiden anderen Zeitabschnitten wird während des Maschinenstillstandes keine Packung hergestellt. Die Maschinenstillstandszeit reduziert somit in einem erheblichen Maße die Anlagenverfügbarkeit und damit direkt die herstellbare Produktionsmenge. Für eine Steigerung der Formatflexibilität sind alle drei Phasen zu verkürzen und der jeweilige Reibungsverlust zu reduzieren.

Die Personalrüstzeit wird hinsichtlich der zeitlichen Anteile in die Abschnitte Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung unterschieden, vgl. Abbildung 6. Falls der Formatwechsel nicht ausschließlich vom Maschinenbediener ausgeführt wird und weitere Mitarbeiter eingesetzt werden, kumulieren sich deren zeitliche Anteile. Beim Einsatz von mehreren Mitarbeitern, z. B. in Form eines Rüstteams, fallen zusätzlich Planungs-, Koordinations- und Abstimmungsaufwände an. Neben diesen beiden direkten Anteilen können der Zeitdimension noch indirekte Anteile zugeordnet werden. Zum Beispiel verlängert sich die gesamte Durchlaufzeit für die Herstellung eines Produktes, sodass auch der Kunde längere Lieferzeiten akzeptieren muss (ERLACH 2010, S. 26 f.). Allerdings sind diese indirekten Anteile deutlich schwerer quantifizierbar.

### **Kostendimension**

Die Kostendimension resultiert maßgeblich aus der Zeitdimension. Die Personalrüstkosten ergeben sich aus den Personalzeiten, der Anzahl des benötigten Personals sowie den jeweiligen Kostensätzen. Ferner entfallen Kosten für den Materialverbrauch während der Phasen des Hoch- und des Nachlaufs, der in nicht qualitätsgerechte und somit nicht verkaufbare Produkte einfließt. Ein grundsätzlicher Kostenbestandteil sind die Abschreibungskosten der Verpackungsmaschine.

## **2 Grundlagen der Verpackungstechnik und der Veränderungsfähigkeit**

---

Je nach Ausrüstung und vorgehaltener Automatisierung für den Formatwechsel entfallen Anteile des Investitionsbedarfs auf technische Ausstattungsmerkmale, welche die Personalrüstzeiten und somit -kosten reduzieren. Dieser höhere Investitionsbedarf fließt anteilig in die Abschreibungskosten ein. In Bezug auf die Maschinenzeiten ist dies der entgangene Deckungsbeitrag, aufgrund der geringeren Ausbringungsmenge, die im Verhältnis zur Anlagenverfügbarkeit steht. EICHHORN (2012, S. 140 f.) bezeichnet diese, aufgrund einer ungenutzten Wertschöpfung und des nicht dadurch entgangenen Nutzens, als Opportunitätskosten. Aufgrund der niedrigeren Ausbringungsmenge steigen die Stückkosten, die aus den fixen Maschinenkosten resultieren (ERLACH 2010, S. 23 f.). Wiederum können weitere Kostenbestandteile identifiziert werden, die nur mittelbar einem Zustandswechsel zugeordnet werden können, bspw. höhere Lagerkosten aufgrund von höheren Beständen (SHINGO 1985, S. 18; MCINTOSH ET AL. 2001, S. 17). Eine idealtypisch und daher vollumfassend formatflexible Verpackungsmaschine würde keinen Reibungsverlust aufweisen. Das Vorhalten des notwendigen Formatbereiches wird als maßgebliche Grundvoraussetzung erachtet, wobei ein überdimensionierter Formatbereich grundsätzlich den Bedarf an Rekonfigurierbarkeit reduzieren kann. Der Idealzustand einer Reibungsfreiheit kann jedoch in der Realität wohl kaum wirtschaftlich erreicht werden.

### **2.4.3 Befähiger für eine Steigerung der Formatflexibilität**

REIK ET AL. (2005) unterscheidet bei den Zuständen, welche im Rahmen einer Zustandsänderung anzupassen sind, zwischen physischen Elementen und Prozessparametern. Als Erweiterung dieser Untergliederung sowie einer Betrachtung, wie diese Zustandsänderungen realisiert werden können, sind die in Abbildung 9 dargestellten drei Klassen unterscheidbar. Diese Klassen beziehen sich auf die notwendigen Zustandswechsel einer Verpackungsmaschine und nicht auf den Flexibilitätskorridor in Form des Formatbereichs. Diese Klassifizierung stellt ein vereinfachtes Ordnungsschema für die Befähiger einer Steigerung der Formatflexibilität dar, welches auch Verlagerungen zwischen den einzelnen Klassen berücksichtigt. Die Übergänge zwischen diesen Klassen sind fließend. Diese drei Klassen werden im Folgenden skizziert.

Zustände, die der *parametrischen Formatflexibilität* zugeordnet werden können sind z. B. Temperaturen oder Drücke von Verarbeitungsprozessen. Befähiger für eine Steigerung sind der Einsatz von Steuerungstechnik und den zugehörigen Automatisierungskomponenten auf Prozess- und Feldebene. Dies ermöglicht, dass heutzutage nahezu alle Verpackungsmaschinen einen Rezepturen- bzw.

Programmspeicher haben. Dort können eine Vielzahl von Parametern und somit Zuständen eingestellt und ganze Parametersätze ausgewählt werden. Die Notwendigkeit eines Austauschs oder einer Anpassung von Komponenten entfällt. Zustandswechsel dieser Klasse können aufwandsarm realisiert werden, da keine manuellen Vorgänge nötig sind. Allerdings kann aufgrund einer physikalischen Trägheit eine Hochlaufphase notwendig sein, z. B. für das Erreichen der Verarbeitungstemperatur bei einem dauerbeheizten Siegelwerkzeug. Ein hohes Niveau an Formatflexibilität ist erreicht, falls jegliche Zustandsänderungen mittels der parametrischen Flexibilität abgebildet werden.

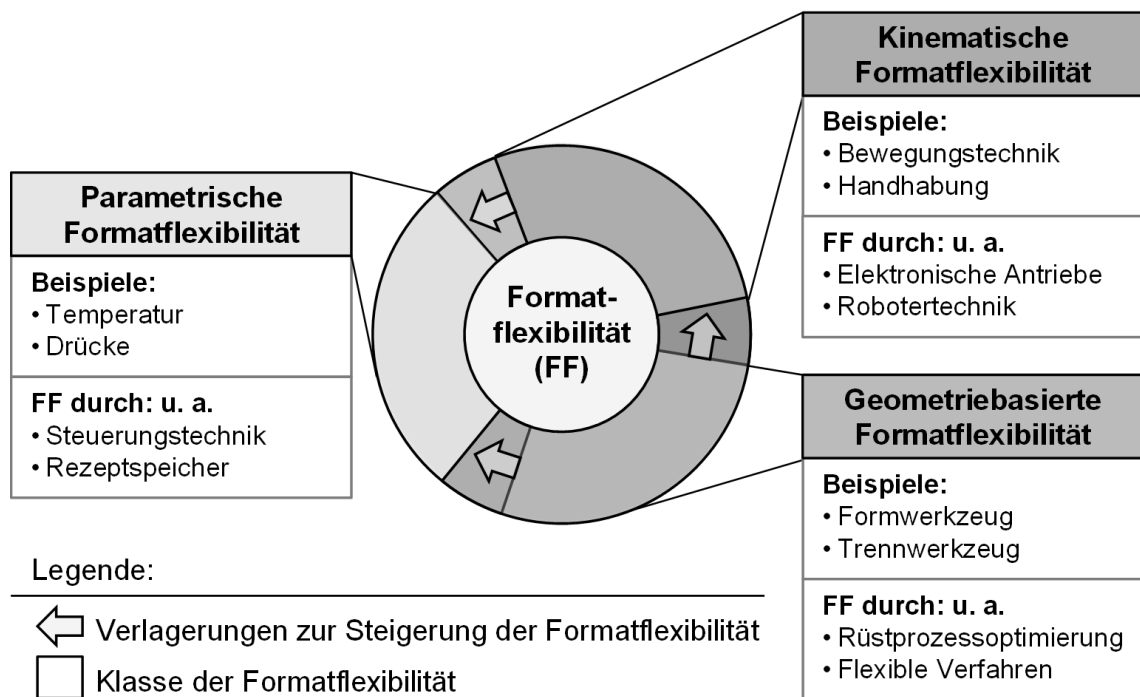


Abbildung 9: Einteilung der Befähiger für eine Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen

Die *kinematische Formatflexibilität* wurde bereits in der Vergangenheit entscheidend gesteigert. Zum Beispiel wurde dies durch den Wechsel von der mechanischen Königswelle oder Kurvenscheiben hin zu dezentralen Antrieben erreicht (WINKLER 2013). Dies hat die Maschinenstruktur tiefgreifend verändert, da sich durch den Wegfall der konventionellen Zentralantriebe der mechanische Anteil reduziert hat (RÖMISCH & WEIß 2014, S. 10). In Verpackungsmaschinen werden überwiegend Servoantriebe sowie Frequenzumrichter an Asynchron- und permanenterregten Synchronmotoren eingesetzt (QUEST 2014). Die Fortschritte in der elektronischen Antriebstechnik haben auch zu einer Weiterentwicklung der Industrierobotik geführt. Daher werden vermehrt Industrieroboter in Verpackungsmaschinen eingesetzt (QUEST 2012). Dort tragen Roboter, wie in anderen

## **2 Grundlagen der Verpackungstechnik und der Veränderungsfähigkeit**

---

Industriebereichen, aufgrund ihrer Eigenschaften zu einer Steigerung der Flexibilität bei (HENNIG 2013, G 2.1 S. 12). Die VDI 2860 definiert Industrieroboter als „(...) universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind.“ Hieraus wird deutlich, dass die Programmierbarkeit ein entscheidender Faktor ist. Damit ist eine Verlagerung verbunden und die kinematische wird somit Teil der parametrischen Formatflexibilität. Daher generiert ein derartiger Zustandswechsel geringere operative Aufwände.

Die *geometriebasierte Formatflexibilität* ist maßgeblich mit dem Verarbeitungssystem einer Verpackungsmaschine verbunden. Die dortigen Arbeitsorgane tragen entscheidend zur Funktionserfüllung einer Verpackungsmaschine bei (MAJSCHAK 1996, S. 48; BLEISCH ET AL. 2011, S. 191). Die Funktionserfüllung bspw. bei stoffformenden Prozessen ist hierbei an die geometrische Gestaltung der Arbeitsorgane gebunden (MAJSCHAK 1996, S. 39). Für die Herstellung einer spezifischen Packung bedarf es einer darauf angepassten geometrischen Gestaltung und somit einen anderen Zustand der Verpackungsmaschine. Dies bezieht sich auf die für die Funktionserfüllung entscheidende Wirkfläche zwischen dem Verarbeitungsgut und dem Arbeitsorgan. Ferner kann für die Herstellung ein anderes Verfahren erforderlich sein. Eine weitere Packung mit einer anderen geometrischen Gestalt kann zusätzlich eine auf den Packstoff bezogene andere werkstoffliche Zusammensetzung aufweisen. Damit sind ebenfalls Abhängigkeiten verbunden. Für den Zustandswechsel ist ein Austausch der jeweiligen Arbeitsorgane nötig. Dieser Austausch verursacht die Notwendigkeit eines Umrüstprozesses. Eine Verbesserungsmöglichkeit stellt eine Optimierung des Rüstprozesses dar. Alternativ ermöglicht der Einsatz von flexibleren Verfahren eine Flexibilitätssteigerung, da solche Verfahren diese geometrischen bzw. werkstofflichen Abhängigkeiten nicht aufweisen.

Anhand dieser Ausführungen wird die Vielseitigkeit einer Steigerung der Formatflexibilität deutlich. Es können drei Klassen von Befähiger für eine Steigerung der Formatflexibilität unterschieden werden. Ein Zustandswechsel kann durch ein Rüsten erfolgen. Dies erfordert die Umrüstbarkeit der Maschine und führt zu einem operativen Reibungsverlust. Ein Zustandswechsel kann auch ohne Rüstvorgang durchgeführt werden, bspw. im Falle einer parametrischen bzw. kinematischen Formatflexibilität. Allerdings bedarf dies zumeist einer höheren Investition, wobei der operative Reibungsverlust in der Betriebsphase der Verpackungsmaschine entfällt.

# 3 Stand der Wissenschaft und Technik

## 3.1 Überblick

Der Stand der Erkenntnisse ist in wissenschaftliche und methodische Ansätze sowie technische Ansätze der industriellen Praxis untergliedert. In Abschnitt 3.2 werden wissenschaftliche und methodische Arbeiten dargestellt. Nachfolgend sind in Abschnitt 3.3 Ansätze des Werkzeug- und des Verpackungsmaschinenbaus aufgezeigt, die sich auf technische Lösungen fokussieren. In Abschnitt 3.4 werden die resultierenden Handlungsfelder identifiziert.

## 3.2 Wissenschaftliche und methodische Arbeiten für eine Steigerung der Flexibilität von Produktionsmaschinen

Die operative Steigerung der Flexibilität eines Betriebsmittels wird teilweise in der Rüstprozessoptimierung während der Betriebsphase angestrebt. Die darauf fokussierten Methoden werden in Abschnitt 3.2.1 dargelegt. In Abschnitt 3.2.2 folgen Ansätze, deren Fokus auf der Gestaltung der Umrüstbarkeit von Betriebsmitteln liegt. Abschließend wird in Abschnitt 3.2.3 der Stand der Erkenntnisse zusammengefasst und ausgewertet.

### 3.2.1 Ansätze zur Rüstprozessoptimierung

#### SMED – Werkzeugwechsel im einstelligen Minutenbereich

Die Steigerung der Effizienz von Umrüstprozessen während der Betriebsphase mittels SMED (engl. Single-Minute Exchange of Die) ist weit verbreitet und daher wird SMED oftmals als Synonym für Rüstprozessoptimierungen verwendet (vgl. SYSKA 2006, S. 127 ff.; CHIARINI 2013, S. 106 ff.; REITZ 2008, S. 254 ff.; CARRIZO-MOREIRA 2014, S. 483 ff.; KLETTI & SCHUMACHER 2014, S. 78 ff.). Die Vorteile von SMED werden u. a. in der Einfachheit und der Optimierung im Team gesehen (BLOM 2007). Der originäre Ansatz stammt von SHINGO (1985). Die Abkürzung SMED repräsentiert das Ziel der Optimierung. Ein Umrüstvorgang soll in weniger als zehn Minuten realisiert werden. SMED ist das dominante Vorgehen für die retrospektive Verbesserung von Rüstprozessen (MCINTOSH ET AL. 2007). Die weiteren Ausführungen basieren auf SHINGO (1985) und SHINGO & PRODUCTIVITY PRESS (1996).

### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Grundgedanke von SMED ist die Differenzierung zwischen internen und externen Rüstvorgängen. Interne Vorgänge müssen bei Maschinenstillstand stattfinden. Rüsttätigkeiten, die während der Produktion parallel ablaufen können, werden als externe Rüstvorgänge bezeichnet. Oftmals werden zu viele Rüsttätigkeiten, welche grundsätzlich externalisiert werden könnten, während des Maschinenstillstandes durchgeführt. Daher ist das Hauptziel von SMED die Externalisierung von Rüsttätigkeiten, um somit die unproduktive Zeit des Maschinenstillstands zu reduzieren. Sekundär wird eine Verkürzung der Personalrüstzeiten und -kosten angestrebt. Für die operative Rüstoptimierung wird ein vier Stufen umfassendes Vorgehen vorgeschlagen, vgl. Abbildung 10. Diese sequentielle Vorgehensweise wird durch den Einsatz von Rüstoptimierungstechniken unterstützt. Zur Verdeutlichung des Einsatzes der vierstufigen Methode und der Rüstoptimierungstechniken werden Beispiele in SHINGO (1985) aufgezeigt.

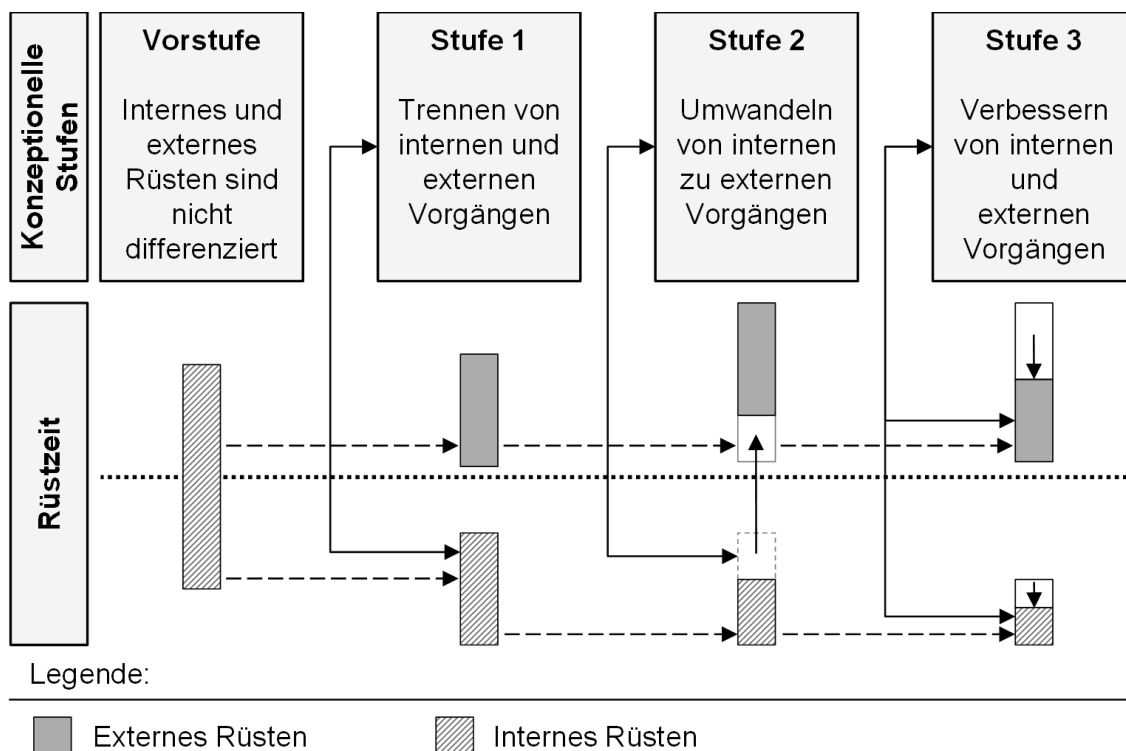


Abbildung 10: Konzept von SMED in Anlehnung an SHINGO (1985, S. 92) und SHINGO & PRODUCTIVITY PRESS (1996, S. XII)

In der initialen Vorstufe sind alle internen und externen Rüstvorgänge nicht differenziert. Durch eine Rüstprozessanalyse werden die einzelnen Rüstvorgänge erfasst. Als Hilfsmittel für diese Phase werden Videoaufnahmen, Wegdiagramme, Multimomentaufnahmen sowie ein Befragen der Mitarbeiter vorgeschlagen (SHINGO 1985, S. 29; SHINGO & PRODUCTIVITY PRESS 1996, S. 27; CHIARINI 2013, S. 110; KLETTI & SCHUMACHER 2014, S. 158).

### **3.2 Wissenschaftliche und methodische Arbeiten für eine Steigerung der Flexibilität von Produktionsmaschinen**

---

Der Rüstprozess wird in der ersten Stufe in interne und externe Vorgänge untergliedert. Folgende Rüstoptimierungstechniken werden hierfür als Unterstützung vorgeschlagen: der Einsatz von Checklisten, die Durchführung von Funktionsprüfungen sowie die Verbesserung des Werkzeugtransports. Im Rahmen der zweiten Stufe sollen interne in externe Rüstvorgänge umgewandelt werden. Die folgenden Rüstoptimierungstechniken sind angedacht: die Vorbereitung der Einsatzbereitschaft, die Standardisierung von Funktionen sowie der Einsatz von Zwischenvorrichtungen.

Sowohl die internen als auch die externen Vorgänge sollen in der abschließenden dritten Stufe von SMED optimiert werden. Die nachfolgenden Rüstoptimierungstechniken stehen dem Anwender für die Zielerreichung zur Verfügung, wobei der erste Punkt der Reduktion der externen Vorgänge und die weiteren Punkte den internen Vorgängen zugeordnet sind: die Verbesserung des Betriebsmittelmanagements, die Parallelisierung von Rüsttätigkeiten, die Nutzung von Schnellspannsystemen, die Eliminierung von Justierarbeiten sowie die Mechanisierung. Für die Rüstoptimierungstechniken ‚Nutzung von Schnellspannsystemen‘ sowie ‚Mechanisierung‘ zeigt SHINGO (1985) technische Beispiele auf. Der Einsatz von Schrauben ist bspw. für das Fixieren von Rüstteilen zu eliminieren. Daher werden Schraubverbindungen als „Feinde“ angesehen (SHINGO & PRODUCTIVITY PRESS 1996, S. 58). Die Mechanisierung sollte erst nach allen anderen Rüstoptimierungstechniken eingesetzt werden (SHINGO 1985, S. 87, SHINGO & PRODUCTIVITY PRESS 1996, S. 68). In Fallstudien und weiteren Arbeiten wird die Anwendung von SMED, teils in modifizierter Form, dargelegt (u. a. TERAN-SOMOHANO & SMITH 1996, MCINTOSH ET AL. 2007, CAKMAKCI 2009, KUSAR ET AL. 2010, ALMOMANI ET AL. 2013, FACCIO 2013, FERRADAS & SALONITIS 2013, CARRIZO-MOREIRA 2014, BRAGLIA ET AL. 2016).

Das Vorgehen, die Rüstoptimierungstechniken und die Beispiele von SHINGO (1985) sind für den Einsatz in der Automobilindustrie gedacht. Wie CARRIZO-MOREIRA (2014) darlegt, sind diese nicht auf jede andere Produktionsmaschine übertragbar. SHINGO (1985) weist zwar auf die Möglichkeit hin, die Rüstoptimierungstechniken in der Maschinenentwicklung anwenden zu können. Jedoch ist nicht dargelegt, wie dies erfolgen kann. Zudem liegt der Fokus auf organisatorischen Maßnahmen. Allerdings sind 64 % der dargestellten Lösungen technischen und nicht organisatorischen Ursprungs (MCINTOSH ET AL. 2007).

Ferner ist SMED die Basis von weiteren Rüstoptimierungstechniken, bspw. EKUV. Die Abkürzung steht hierbei für Eliminieren, Kombinieren, Umstellen und Verbessern (LINSEISEN 1998, KRUSE 2011). Da diese den gleichen Grund-

gedanken aufweisen und hinsichtlich einer technisch orientierten Sichtweise keinen Beitrag leisten, wird auf eine Detaillierung an dieser Stelle verzichtet.

#### **Zero Changeover – Werkzeugwechsel in weniger als 3 Minuten**

Eine weitere Reduktion der Umrüstzeiten beabsichtigt das Konzept Zero Changeover. Dieser Ansatz ist in SEKINE & ARAI (1992) veröffentlicht. Die weiteren Ausführungen sind SEKINE & ARAI (1992) entnommen und können dort vertieft werden. Das Ziel ist es, die Dauer für den Umrüstprozess auf unter drei Minuten zu reduzieren. Der grundlegende Gedanke ist die Detektion und Eliminierung von Verschwendungen im Rüstprozess. In dieser Form wird der gesamte Rüstprozess als eine Verschwendung gesehen. Für die Zielerreichung wird ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess vorgeschlagen. Dieser ist erst dann beendet, wenn die o. g. Zielsetzung erreicht ist. Für den ersten Schritt werden u. a. die Analysehilfsmittel Videoaufnahme und Wegdiagramme vorgeschlagen. Für das Verbessern des Rüstprozesses werden neun Handlungsanweisungen eingeführt, welche in drei Verschwendungskategorien aufgeteilt sind:

- Verschwendung durch Bereitstellungsarbeiten,
- Verschwendung durch Montage-/Demontagetätigkeiten,
- Verschwendung durch Abstimmungs-/Einrichtungsarbeiten.

Diese einzelnen Handlungsanweisungen werden durch sogenannte Ideen für die Verschwendungseliminierung ergänzt. Diese sind detaillierte technische Hinweise, z. B. der Einsatz von birnenförmigen Löchern und U-förmigen Scheiben mit Sechskantschrauben. Anhand der Handlungsanweisungen wird deutlich, dass diese für das Verbessern von Pressen und umformtechnischen Anlagen gedacht sind. Die Vorgehensweise fokussiert im Vergleich zu SMED die Verbesserung der technischen Aspekte eines Rüstprozesses. Wie Zero Changeover im Rahmen eines Entwicklungsprozesses genutzt werden könnte, wird nicht dargestellt.

#### **Reduction-In Strategie – Reduktion von Verschwendungen**

Den Grundgedanken, dass der Rüstvorgang und dessen Teilbestandteile eine Ansammlung von Verschwendungen sind, greifen auch MCINTOSH ET AL. (2001) auf. Die dortigen Ausführungen basieren auf unterschiedlichen Vorarbeiten (u. a. GEST ET AL. 1994, GEST ET AL. 1995, MCINTOSH ET AL. 1996, MCINTOSH ET AL. 2000). Die weiteren Ausführungen sind MCINTOSH ET AL. (2001) entnommen und sind dort zu vertiefen. Verschwendungen können in die folgenden vier Reduktionsfelder eingeordnet werden:



### 3.2 Wissenschaftliche und methodische Arbeiten für eine Steigerung der Flexibilität von Produktionsmaschinen

- Reduktion von Online-Aktivitäten,
- Reduktion von Einstellarbeiten,
- Reduktion von Vielfalt,
- Reduktion von Arbeitsaufwand.

Eine drei Phasen umfassenden Gesamtmethode wird für die Rüstprozessverbesserung und -verkürzung vorgeschlagen. Diese Methode ist in ein strategisches und in ein operatives Level untergliedert. Die erste und strategische Phase umfasst u. a. die Ableitung der Strategie für eine Rüstprozessverbesserung sowie deren Zielsetzung. Die zweite und dritte Phase sind dem operativen Level zugeordnet und sollen im Sinne eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses durchgeführt werden. In der Vorbereitungsphase werden die strategischen Ziele und Rahmenbedingungen für den Einsatz vor Ort aufbereitet. Im Rahmen der Einführungsphase sind die Methoden der Reduction-In Strategie operativ zu implementieren und zu monitoren. Für eine Unterstützung bei der Zielerreichung werden Verbesserungsvorschläge dargelegt. Dies sind u. a. Gestaltungsregeln sowie organisatorische und gestalterische Verbesserungshinweise. Ein Auszug der Gestaltungsregeln und der gestalterischen Verbesserungshinweise kann der Abbildung 11 entnommen werden. In Summe wird die Bedeutung der Gestaltung der Betriebsmittel deutlich. Dies sollte bei Neuentwicklungen betrachtet werden, allerdings ist keine Integration in einen Entwicklungsprozess dargelegt.

	<b>Gestaltungsregeln</b>	<b>Gestalterische Verbesserungshinweise</b>
Reduktion von <b>Online- Aktivitäten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verändere, wann eine Aufgabe zu erledigen ist (damit eine bessere Aufgabenverteilung zwischen den vorhandenen Ressourcen ermöglicht wird)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eliminiere die Abhängigkeit von Aufgaben</li> </ul>
Reduktion von <b>Einstell- arbeiten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrolliere die Präzision von Wechselteilen und ermögliche durch Merkmale am Produkt oder dem Betriebsmittel eine reproduzierbare Lage</li> <li>• Suche nach Universalität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatisches Einstellen</li> <li>• Behandle die Präzisionsanforderungen</li> <li>• Überlege den Einsatz von Weg- und Zustandsmesstechnik</li> <li>• Nutze robustere Komponenten</li> </ul>

*Abbildung 11: Auszug der Gestaltungsregeln und der gestalterischen Verbesserungshinweise der Reduction-In Strategie nach MCINTOSH ET AL. (2001)*

#### 3.2.2 Flexibilitätssteigerung durch eine verbesserte Umrüstbarkeit

Die folgenden Arbeiten fokussieren die Gestaltung der umzurüstenden Betriebsmittel. Zunächst wird auf eine Steigerung des Technisierungsgrades von Bearbeitungszentren eingegangen. Anschließend werden Designregeln als Hilfsmittel für die Entwicklung sowie die Methode Design for Changeover dargelegt.

#### Lösungsraum für die technische Gestaltung von Bearbeitungszentren

Die Rüstprozessoptimierung von Bearbeitungszentren der metallverarbeitenden Industrie ist der Schwerpunkt von EICHHORN (2012). Um diese Verbesserungen zu erreichen, wird eine arbeitsbezogene Rüstplanung eingeführt. Neben EICHHORN (2012) beschäftigen sich auch weitere Arbeiten mit der besseren Planbarkeit und den arbeitswissenschaftlichen Aspekten des Rüstens (u. a. FRÜHWALD 1990, WIRTH 1991, CAKMAKCI & KARASU 2007).

EICHHORN (2012) setzt Prozessbausteine nach MTM-UAS (engl.: methods-time measurement für dt.: Arbeitsablauf-Zeitanalyse; universelles Analysiersystem) für die organisatorische Optimierung ein. Die folgenden Ausführungen sind aus EICHHORN (2012). Für die technischen Verbesserungen wird ein Lösungsraum für die Gestaltung des Arbeitssystems strukturiert, vgl. Abbildung 12.

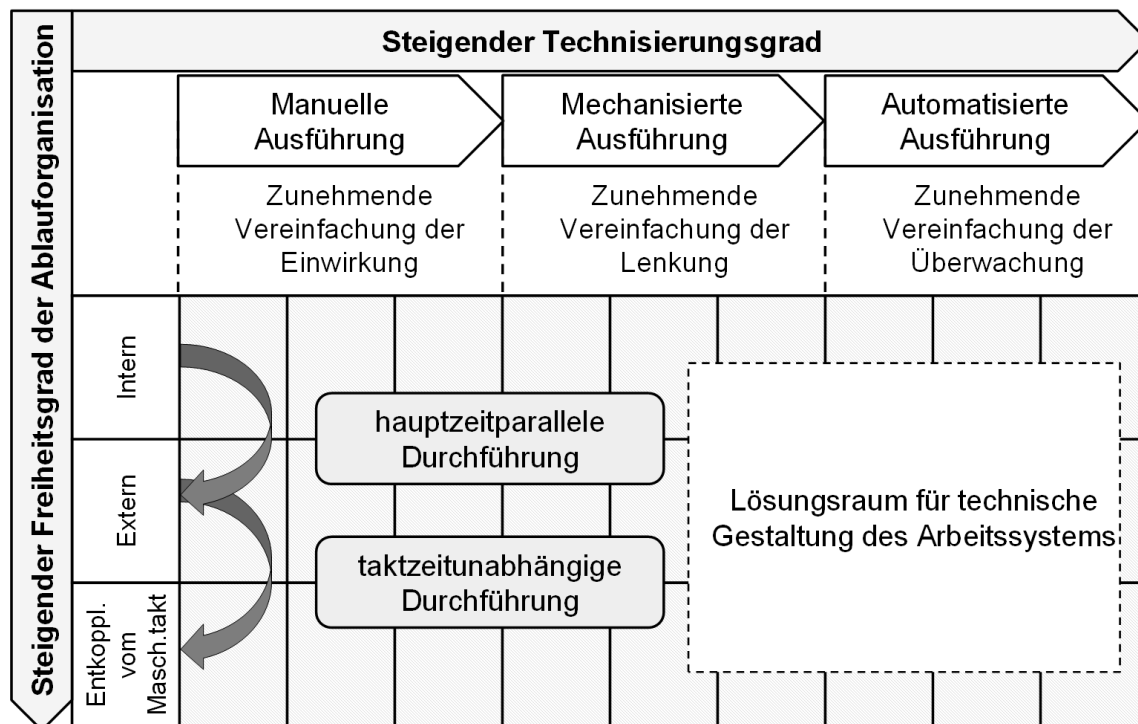


Abbildung 12: Strukturierung des Lösungsraums nach EICHHORN (2012, S. 61)

### **3.2 Wissenschaftliche und methodische Arbeiten für eine Steigerung der Flexibilität von Produktionsmaschinen**

---

Dieser Lösungsraum beinhaltet eine zweidimensionale Einteilung hinsichtlich des Technisierungsgrades und des Freiheitsgrades der Ablauforganisation. Die Steigerung des Technisierungsgrades beruht auf einer Erhöhung des Automatisierungsgrades. Hierbei wird grundsätzlich zwischen einer manuellen, mechanisierten und automatisierten Ausführung des Rüstprozesses unterschieden. Diese Einteilung basiert auf einer Unterscheidung, ob der Rüstmitarbeiter oder ein technisches System eine der drei Systemelemente Einwirkung, Lenkung und Überwachung durchführt. Innerhalb dieser grundsätzlichen und allgemeingültigen Einteilung des Technisierungsgrades, auch als Technisierungsniveau bezeichnet, werden jeweils drei Unterklassen differenziert. Diese orientieren sich ausschließlich an Bearbeitungszentren für die zerspanende Fertigung. Ein Rationalisierungspotenzial ist die Wahl eines passenden Technisierungsniveaus. Diese Klassifikation ermöglicht durch die Strukturierung von vorhandenen Systemen ein Aufzeigen von Suchfeldern für weitere technische Lösungen. Die zweite Dimension des Gliederungsschemas ist der Freiheitsgrad der Ablauforganisation. Diese Einteilung beruht auf der grundsätzlichen Differenzierung zwischen internen und externen Rüsttätigkeiten, wie diese ebenfalls in SMED vorgesehen wird. Diese Klassifikation wird um den Aspekt der Entkoppelung vom Maschinentakt erweitert.

Dieses Gliederungsschema kann als Hilfsmittel in der Planungs- und Betriebsphase genutzt werden, um die heute eingesetzten Betriebsmittel einzuordnen und auf dieser Basis direkt das Rationalisierungspotenzial abzuleiten. Für den Anwendungsfall Bearbeitungszentren und dortige Einzelfunktionen, z. B. Spannen/Lösen des Werkstückes, werden unterschiedliche Beispiele, z. B. das manuelle Spannen mittels Kniehebel-Spanner sowie das Spannen mittels Vakuum, aufgezeigt. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des vorhandenen Rationalisierungspotenzials wird ein Wirtschaftlichkeitsmodell vorgeschlagen.

#### **Designregeln**

Als weiteres Hilfsmittel für eine technische Verbesserung des Umrüstens von Produktionsmaschinen wird die Berücksichtigung von Designregeln vorgeschlagen. MILEHAM ET AL. (1999) führen insgesamt 27 Designregeln in den sechs Kategorien Leichtbau, Vereinfachung, Standardisierung, Befestigung, Positionierung und Einstellung sowie Handling ein. Diese Designregeln umfassen die Betrachtung der Maschinengestaltung, der Werkzeuge, der Zusatzeinrichtungen und des Produktes. Diese werden von VAN GOUBERGER & VAN LANDEGHEM (2002) teilweise angepasst und erweitert sowie um weitere Kategorien mit zusätzlichen Designregeln ergänzt.

### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

---

Diese Designregeln sind aus Erfahrungswissen von mehr als 60 Optimierungsprojekten in der Nutzungsphase entstanden und stellen somit eine retrospektive Verbesserung des Betriebsmittels dar. Ein Auszug dieser Designregeln kann Abbildung 13 entnommen werden.

<b>1. Leichtbau</b>
1.1 Nutze leichtere Werkstoffe 1.2 Nutze weniger Material
<b>2. Vereinfachung</b>
2.1 Reduziere die Anzahl an Mechanismen 2.2 Eliminiere die Notwendigkeit, Komponenten, die keine Rüstteile sind, entfernen zu müssen 2.3 Entferne online ganze Baugruppen/Module, die offline vorbereitet werden können, anstelle von der Handhabung und Befestigung von etlichen kleinen Teilen
<b>3. Standardisierung</b>
3.1 Nutze die selbe Schließhöhe bei Pressen 3.2 Setze die gleiche Sicherheitsschraubengröße ein 3.3 Setze die gleichen Typen von Elektromotoren ein 3.4 Gestalte universelle Komponenten, die nicht gewechselt werden müssen

Abbildung 13: Auszug der Designregeln aus MILEHAM ET AL. (1999) und VAN GOUBERGER & VAN LANDEGHEM (2002)

In VAN GOUBERGER & VAN LANDEGHEM (2002) wird der Nutzen der Designregeln anhand einiger Beispiele aufgezeigt. Optimierungsobjekte sind u. a. Verpackungsmaschinen und Maschinen für die Herstellung von Packmitteln. Dies verdeutlicht die Veränderungen in der Verpackungsbranche und die daraus resultierende Notwendigkeit zur Steigerung der Flexibilität dieser Maschinen. Auch werden die vorhandenen Potenziale zur Verbesserung der Umrüstbarkeit dargestellt, welche jedoch bereits im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen sind. Der Einsatz und die Integration der Designregeln in den Entwicklungsprozess werden nicht aufgezeigt. Ferner wird in MILEHAM ET AL. (1999) auf die Notwendigkeit eines „Design for Changeovers“ hingewiesen. Die Produkt-, Maschinen- und Werkzeuggestaltung bilden die vier Betrachtungsbereiche des Gesamtkonzepts (MILEHAM ET AL. 1999). Eine Konzeptdetaillierung wird nicht dargestellt.

#### **DFC – Design for Changeover**

Den Gedanken eines Design for Changeovers (DFC) greifen weitere Autoren auf. Im Folgenden wird die ursprünglich eingeführte DFC-Methode dargestellt, welche von REIK ET AL. (2005), REIK ET AL. (2006a) und REIK ET AL. (2006b) veröffentlicht wurde. Anschließend wurde von OWEN ET AL. (2011) eine überarbeitete Version eingeführt.

### 3.2 Wissenschaftliche und methodische Arbeiten für eine Steigerung der Flexibilität von Produktionsmaschinen

Der gemeinsame Grundgedanke der Arbeiten ist die Abkehr von der tätigkeitsbezogenen Betrachtung, wie diese u. a. in SMED praktiziert wird. Der Fokus liegt auf den Schnittstellen der Wechsel- bzw. Rüstelemente. Die Arbeiten von REIK ET AL. (2005), REIK ET AL. (2006a) und REIK ET AL. (2006b) beschreiben eine zwei Phasen umfassende Methode. Der Ablauf dieser Methode ist in Abbildung 14 dargestellt. In der ersten Phase wird das aktuelle Betriebsmitteldesign untersucht. In der zweiten Phase werden Verbesserungsvorschläge erarbeitet, welche dann in einem iterativen Prozess zu alternativen Gestaltungslösungen und abschließend zu einer verbesserten Gestaltung führen soll.

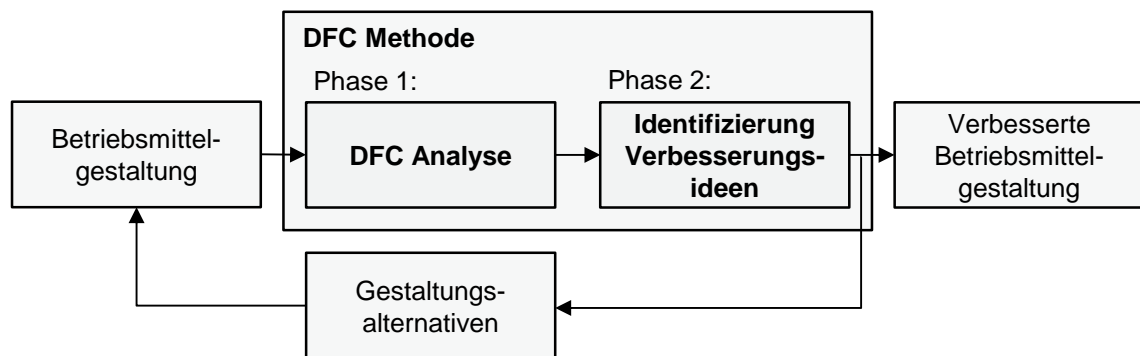


Abbildung 14: Ablaufschema des Vorgehens von Design for Changeover nach REIK ET AL. (2006b)

Ein elementarer Schritt der Analyse ist die Berechnung zweier Kennzahlen zur Beschreibung des aktuellen Rüstprozesses und der momentanen Betriebsmitteldesigns. Die Berechnung basiert auf der Unterscheidung zwischen notwendigen und nicht notwendigen Rüsttätigkeiten bzw. Rüstelementen. Die Notwendigkeit wird anhand der physischen Schnittstelle zum Produkt definiert. Der angedachte Verbesserungsmechanismus fokussiert eine Eliminierung der nicht notwendigen Rüstelemente. Falls dies nicht möglich ist, dann ist der Aufwand des Rüstens zu reduzieren. Die Rüstelemente werden anhand von Abhängigkeiten gruppiert und dies strukturiert den Verbesserungsmechanismus. Für die Umsetzung der Eliminierung und der Aufwandsreduktion werden Verbesserungsvorschläge genannt. Für die Bewertung der zu generierenden Verbesserungsalternativen sind die Implementierungskosten und die o. g. Kennzahlen als Grundlage zu ermitteln.

Auf Basis der bereits dargelegten Arbeiten wurde von OWEN ET AL. (2011) eine überarbeitete DFC-Version veröffentlicht. Für die praktische Umsetzung wird eine acht Stufen umfassende Methode vorgeschlagen. Für die Verbesserung des Designs sind zwei Optimierungsschleifen vorgesehen. Die Beschreibung der einzelnen Stufen kann OWEN ET AL. (2011) entnommen werden.

### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

In der Analyse wird keine tätigkeitsbezogene Betrachtung durchgeführt, da die einheitliche Definition einer Tätigkeit als problematisch erachtet wird. Im Hinblick auf die Gestaltungsoptimierung werden die folgenden globalen Verbesserungsmöglichkeiten gesehen:

1. Reduziere die Anzahl an Wechselteile.
2. Reduziere die Einschränkungen für das Zusammenführen der Schnittstellen.
3. Reduziere die Einschränkungen, zu welchem Zeitpunkt das Zusammenführen der Schnittstellen abgeschlossen sein muss.

Die dritte Möglichkeit weist somit Ähnlichkeiten zu EICHHORN (2012) hinsichtlich des zusätzlichen Freiheitsgrads der Ablauforganisation auf. Für eine Überprüfung der Einhaltung dieser Möglichkeiten werden sechs Kennzahlen eingeführt, u. a. der Fähigkeitsindex. Diese können Abbildung 15 entnommen werden.

<b>Globale Möglichkeit</b>	<b>DFC-Indizes</b>	<b>DFC-Designregeln (im Falle eines inakzeptablen Indexwerts)</b>
1	Fähigkeitsindex  Leistungsindex 1  Leistungsindex 2	Minimierung der Anzahl an Wechselementen  Reduktion von sekundären Wechselementen  Reduktion von nicht ‚wertschöpfenden‘ Wechselementen
2	Leistungsindex 3  Leistungsindex 4	Suche nach Umrüstvorgängen, die vom Maschinenbediener durchgeführt werden können  Vermeide zusätzliche Ressourcen*  Suche bei der Gestaltung von Wechselementen nach einer Unterstützung durch einen effektiven Ressourceneinsatz  Suche nach eindeutigen Anweisungen und intuitiven Schnittstellen
3	Leistungsindex 5	Suche die vollständige Unabhängigkeit von Schnittstellen  Suche nach mehrfachen Wechselementeinheiten
*Jede Ressource (Person oder Hilfsmittel etc.), außer dem Maschinenbediener, ist eine zusätzliche Ressource		

Abbildung 15: Verknüpfung der globalen Gestaltungsverbesserungen, des Kennzahlensystems und einzelner ausgewählter Designregeln nach OWEN ET AL. (2011)

Diese Kennzahlen sollen dem Entwickler helfen, die vorhandenen Potenziale besser zu erkennen. Als Ergänzung und zugleich als Hilfsmittel stehen abgeleitet aus den globalen Verbesserungsmöglichkeiten spezifische Designregeln zur Verfügung. Die Kopplung der Kennzahlen mit den Designregeln erlaubt ein Auffinden der am besten geeigneten Verbesserungsmöglichkeiten. Die Bewertung von generierten Alternativen wird nicht dargelegt.

#### 3.2.3 Fazit

Die Rüstprozessverbesserung und die damit verbundene Flexibilitätssteigerung ist seit Mitte der 1980er Jahre Inhalt einer Vielzahl von unterschiedlichen Veröffentlichungen. Die grundsätzlichen Mechanismen wurden bereits in SHINGO (1985) dargestellt. Die Externalisierung von Arbeitsinhalten und die Optimierung der internen und externen Rüsttätigkeiten sind die Möglichkeiten um Maschinenstillstände zu verkürzen und die Personalrüstkosten zu reduzieren. Die Kernaspekte, z. B. Vermeiden von Einstellarbeiten, werden immer wieder als Verbesserungsvorschläge genannt. Für die Betriebsphase ist SMED immer noch die am weitesten verbreitete und bestverstandenste Methode. Allerdings führen Rüstprozessverbesserungen, z. B. gemäß SMED, zu zusätzlichen logistischen Herausforderungen, da bspw. mehr Werkzeuge und Vorrichtungen im Umlauf sind. Wie aus den Ausführungen hervorgeht, so haben Betreiber von Produktionsmaschinen in der Betriebsphase ausschließlich die Möglichkeit, im Sinne eines Kaizens oder eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) kleine, evolutionäre Verbesserungsschritte umzusetzen. Die Hersteller von Produktionsmaschinen können dagegen im Entwicklungsprozess umfangreiche Verbesserungen bewirken und dies als Chance im Sinne eines Wettbewerbsvorteils nutzen. Erst in späteren Veröffentlichungen rückte die Verantwortung des Maschinenherstellers bzw. der Entwickler von Betriebsmitteln in den Fokus, wobei die grundsätzlichen Mechanismen von SMED aufgegriffen werden. Die jeweiligen Methoden sollen hierbei den Anwender bei der Umsetzung unterstützen. Allerdings sind dies singuläre Vorgehensweisen ohne Einbettung in einen Entwicklungsprozess.

### 3.3 Technische Ansätze zur Flexibilitätssteigerung

Im Rahmen des Abschnittes wird zunächst das Thema der Flexibilitätssteigerung bei Werkzeugmaschinen beleuchtet, Abschnitt 3.3.1. Nach der Darstellung von Entwicklungen im Verpackungsmaschinenbau in Abschnitt 3.3.2, werden die Erkenntnisse in Abschnitt 3.3.3 zusammengefasst und abgeglichen.

### 3.3.1 Technische Ansätze im Werkzeugmaschinenbau

Auch die Betreiber von Werkzeugmaschinen müssen eine produktive sowie wirtschaftliche Fertigung bei sinkenden Losgrößen sicherstellen (BÖGE 2009, S. O 2). Daher steigt auch in dieser Branche der Bedarf an Flexibilität (BÖGE 2009, S. O 2). Ebenfalls stellt die Reduktion der Rüstzeiten eine zielführende Möglichkeit dar, um dieser Herausforderung zu begegnen (WECK & BRECHER 2005, S. 434). Für EICHHORN (2012, S. 100) stellt eine Flexible Fertigungszelle (FFZ) aufgrund der automatisierten Ausführung die höchste Ausbaustufe der Rüstprozessoptimierung dar. KIEF ET AL. (2015, S. 367) definieren eine FFZ als eine „(...) alleinstehende CNC-Maschine, meistens ein Bearbeitungszentrum (...) oder eine andere CNC-Maschine, die durch zusätzliche Automatisierungseinrichtungen für einen zeitlich begrenzten, bedienerlosen Betrieb ausgerüstet ist.“ Eine FFZ stellt hinsichtlich Automatisierung eine Erweiterung gegenüber einem Bearbeitungszentrum (BAZ) dar, vgl. Abbildung 16. Die nächste Ausbaustufe im Hinblick eines steigenden Automatisierungsgrades sind Flexible Fertigungssysteme (FFS) (GROTE & FELDHUSEN 2007, S. T 94 f.). Ein FFZ weist u. a. folgende technischen Eigenschaften auf (KIEF ET AL. 2015, S. 367 ff.):

- „Ein ausreichender Teilevorrat in Form von bestückten Paletten oder als Einzelteilspeicher für einen etwa einschichtigen Betrieb (...)
- Ein erweiterter Werkzeugspeicher, um bei schnell wechselnden Werkstücktypen ohne ständigen Werkzeugaustausch arbeiten zu können
- Ein automatischer Werkzeugwechsel mit Überwachungseinrichtung.“

Hinsichtlich der Maschinenflexibilität und der damit verbundenen Umrüstbarkeit wird deutlich, dass das hauptzeitparallele und somit externalisierte Vorbereiten der Werkzeuge bzw. der Werkstücke sowie der Programme entscheidend ist. Das Erstellen der CNC-Programme in der Arbeitsvorbereitung, anstelle einer Programmierung im Werkstattbereich, und der automatisierte Programmwechsel gestattet ohne nennenswerte Maschinenstillstandszeiten die Fertigung eines neuen Produktes (NEUGEBAUER 2012, S. 437 f.). Auch führen ein Voreinstellen und vorheriges Vermessen der Bearbeitungswerkzeuge zu einer Reduktion der Rüstzeiten. Dies kann maschinenintegriert und vollautomatisch erfolgen (NEUGEBAUER 2012, S. 187). Ein hauptzeitparalleles Spannen der Werkstücke ermöglicht ferner eine erhebliche Reduktion der Durchlaufzeit (WECK & BRECHER 2005, S. 435). Dieses Vorbereiten ist ein manueller Vorgang. Der Wechsel der Werkstücke bzw. Werkzeuge findet dagegen automatisiert statt. Für eine Verkürzung der Wechselzeiten werden technische Systeme wie z. B. Dreh- und Kipptische sowie Fräs- und Bohrköpfe eingesetzt (NEUGEBAUER 2012, S. 129).



### 3.3 Technische Ansätze zur Flexibilitätssteigerung

Dies reduziert u. a. die organisatorischen Abhängigkeiten von der Mitarbeiterverfügbarkeit, welche aufgrund des hohen Automatisierungsgrades nicht mehr dauerhaft einer Maschine als Bedienpersonal zugeordnet sein müssen. Auch der Einsatz von Nullpunktspannsystemen wird vorgeschlagen (BRAUN 2007).

<ul style="list-style-type: none"> <li>• mehrere sich ergänzende und ersetzende Maschinen</li> <li>• automatischer Werkstückfluss</li> <li>• Transportüberwachung &amp; Fertigungssteuerung über Leitrechner</li> <li>• ergänzende Einrichtungen wie Mess- und Reinigungsmaschinen</li> </ul>					
<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatisierte Werkstückbe- und -entladeeinrichtung aus Werkstückspeicher</li> <li>• automatische Fertigungssteuerung</li> <li>• flexible Werkstückfolge</li> <li>• integrierte Überwachungs- und Messeinrichtungen</li> </ul>				FFZ	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatisierter WZ-Wechsel aus eigenem WZ-Speicher</li> <li>• automatisierter WSt.-Palettenwechsel und -Überwachung</li> <li>• Mehrseiten-/Komplettbearbeitung (4. und 5. NC-Achse)</li> <li>• automatisierter Programmaufruf</li> </ul>					
<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatisierter Arbeitszyklus für gleiche Werkstücke</li> <li>• Ablaufsteuerung der Maschinenfunktionen</li> <li>• (Werkzeugrevolver)</li> </ul>		CNC		FFZ	
Erzeugung der Schnitt- und Vorschubbewegung sowie der Prozesskräfte		konv. WZM			
				FFS	

Legende:

WZM: Werkzeugmaschine  
 FFZ: Flexible Fertigungszelle  
 WSt.: Werkstück

BAZ: Bearbeitungszentrum  
 FFS: Flexibles Fertigungssystem  
 WZ: Werkzeug

Abbildung 16: Automatisierungsstufen von Werkzeugmaschinen nach NEUGEBAUER (2012, S. 17)

Für umformende Werkzeugmaschinen sind äquivalente Entwicklungen bereits Anfang der 1990er Jahre prognostiziert (SCHMOECKEL 1991) und in wissenschaftlichen Arbeiten untersucht worden (z. B. HEIDEMANN 1990). Ferner wurde angestrebt, den Umrüstvorgang von Pressen und Anlagen zum Kaltmassivumformen zu standardisieren (vgl. u. a. VDI 3196, VDI 3195).

Zusammenfassend kann die Flexibilitätssteigerung von spanenden Werkzeugmaschinen in mehrere Stufen unterteilt werden. Der Wechsel von vollständig geometriegebundenen hin zu universell einsetzbaren Werkzeugen führte zu einer Steigerung der Flexibilität, da derart ausgestattete Werkzeugmaschinen anhand einer veränderbaren Bewegungssteuerung für neue Fertigungsaufgaben vorbereitet werden können. Durch die Einführung der CNC-Technik wurde wiederum diese Bewegungssteuerung entscheidend variabler gestaltet, somit kann schneller und flexibler auf Kundenwünsche reagiert werden (MILBERG 1995, S. 15 f.).

Ferner sei auf die bereits genannten Maßnahmen verwiesen, u. a. automatisierter Werkstückwechsel. Dieser Stufe können heutzutage die meisten spanenden Werkzeugmaschinen zugeordnet werden. Umformende Werkzeugmaschinen stehen vor ähnlichen Herausforderungen wie Verpackungsmaschinen. Parallel haben sich in der Fertigungstechnik unterschiedlichste Verfahren etabliert, die ohne geometriegebundene Werkzeuge die Funktionserfüllung gewährleisten. In einer ersten Stufe waren dies Verfahren mit einem Fokus auf eine zweidimensionale Fertigung, z. B. das Laserstrahlschweißen und -trennen (u. a. KLOCKE & KÖNIG 2007, S. 201 ff.; RISSE 2012, S. 463 ff.; KIEF ET AL. 2015, S. 301 ff.) sowie das Wasserstrahltrennen (u. a. KLOCKE & KÖNIG 2007, S. 321 ff.; FRITZ & SCHULZE 2010, S. 386 ff.; KIEF ET AL. 2015, S. 321 ff.). Mittlerweile haben sich auch vielfältige Verfahren etabliert, die ohne geometriegebundene Werkzeuge dreidimensionale Werkstücke herstellen können, z. B. Additive Fertigungsverfahren (u. a. FRITZ & SCHULZE 2010, S. 105 ff.; RISSE 2012, S. 84 ff.).

#### 3.3.2 Technische Ansätze im Verpackungsmaschinenbau

Im Rahmen dieser Betrachtung werden die Erkenntnisse aus technisch-wirtschaftlichen Veröffentlichungen der industriellen Praxis des Verpackungsmaschinenbaus dargestellt. Die identifizierten Maßnahmen für eine Steigerung der Formatflexibilität sind in Anlehnung an den Technisierungsgrad von EICHHORN (2012) klassifiziert. Hierbei sind die technischen Verbesserungen der Formatflexibilität im Fokus. Es wurde ein repräsentativer Ausschnitt des Verpackungsmaschinenbaus gewählt. Die Verbesserungsmaßnahmen von bspw. unterschiedlichen Maschinentypen, Anwendungsbranchen und Unternehmen sind berücksichtigt. In Summe sind sieben Gruppen unterscheidbar. Wie Abbildung 17 zeigt, so ist der Übergang zwischen den gruppierten Verbesserungsmaßnahmen fließend. Teilweise werden Kombinationen dieser Maßnahmen eingesetzt.

Die erste Gruppe sind Verbesserungen, welche sich auf die Gestaltung der Rüstteile auswirken. Dies kann bspw. ein farbiges Markieren sein, um die Verwechslungsgefahr zu reduzieren (KRONES 2013). Ferner werden Rüstteile nach dem Poka-Yoke-Prinzip gestaltet (BAUERNFEIND 2013) oder das Gewicht von Rüstteilen angepasst (FELK 2013). Für Positionierungs- und Einstellvorgänge werden Hilfsmittel vorgesehen, z. B. elektronische Positionsanzeigen (BRUNNER 2014, WISCHNEWSKI 2014), Handräder und Lineartische (IGUS 2014, SVZ 2015) sowie Einstellhilfen (ROVEMA 2016). Die Durchführung des Rüstvorganges bleibt manuell. Dies trifft auch bei der nächsten Gruppe zu. Hier wird die Reduktion der Anzahl von Rüstteilen forciert (z. B. BAUERNFEIND 2013, ZAHORANSKY 2015).

### 3.3 Technische Ansätze zur Flexibilitätssteigerung

Auf eine Reduktion bzw. Eliminierung der Notwendigkeit von Hilfsmitteln und somit einem werkzeuglosen Rüsten zielt die nächste Gruppe von Verbesserungsmaßnahmen ab (z. B. AFZ 2004, MULTIVAC 2012, BIG DRUM ENGINEERING 2013, BBVERPACKUNGSMASCHINEN 2015, BOSCH PACKAGING 2015).

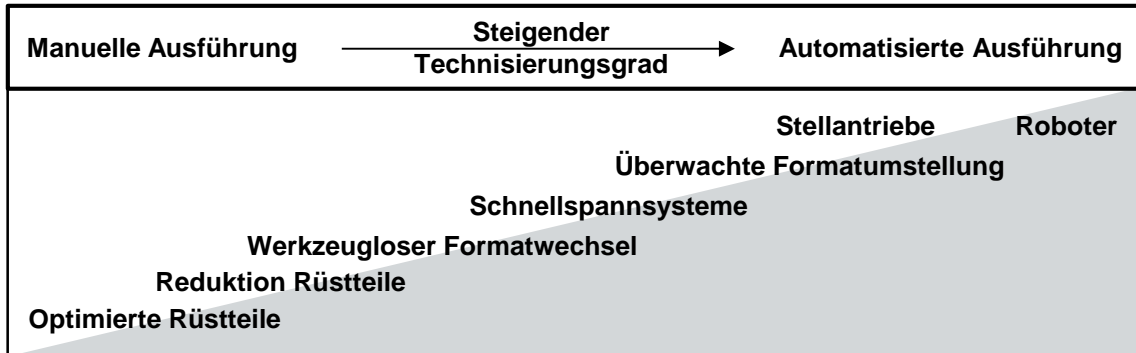


Abbildung 17: Gruppierung von Verbesserungsmaßnahmen zur Formatflexibilitätssteigerung von Verpackungsmaschinen

Ferner werden Schnellspannsysteme eingesetzt, die wiederum kein externes Hilfsmittel benötigen (z. B. CERMEX 2015, ZAHORANSKY 2015). Bei den bisher genannten Clustern kommen teilweise noch Formateinstelllisten in Papierform zum Einsatz (IGUS 2014). Eine überwachte Formatumstellung basiert zwar grundsätzlich auf einem manuellen Rüstprozess, jedoch werden die von den Mitarbeitern eingestellten Positionen, Einstellungen sowie Austauschvorgänge auf deren Richtigkeit hin elektronisch überprüft (z. B. WISCHNEWSKI 2014). Auch wird zur Unterstützung des Rüstpersonals mittels des Bedienterminals ein geführter Rüstvorgang ermöglicht (z. B. BAUERNFEIND 2013, KHS 2014).

Ausschließlich mit Fremdenergie wird ein Formatwechsel durchgeführt, falls elektromechanische Antriebe verwendet werden (z. B. BOSCH REXROTH 2014, BRUNNER 2014, SICK 2014, SIKO 2014, WISCHNEWSKI 2014, LENORD+BAUER 2015, SCHÄFER & FLOTTMAN 2015). Diese Gruppe hat eine Überschneidung zu dem benannten Befähiger, welcher der kinematischen Flexibilität zugeordnet werden kann, vgl. Abschnitt 2.4. Teilweise werden die für den Verpackungsprozess notwendigen Antriebe im Rahmen eines Umstellvorganges digital eingestellt, z. B. Anwahl einer anderen elektronischen Kurvenscheibe. Alternativ werden zusätzliche Antriebe integriert, welche ausschließlich für den Formatwechsel eingesetzt werden. Hinsichtlich des möglichen Technisierungsgrades ist der automatisierte Formatwechsel mittels Robotern die höchste Stufe (z. B. PACKAGING VALLEY GERMANY & PACKAGING EXCELLENCE CENTER 2012, S. 96; SCHUBERT 2013). Der zusätzliche Austausch von geometriegebundenen Rüstteilen erfordert eine Roboterkinematik. Dies ist mit einer reinen

### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

---

rotatorischen bzw. translatorischen Bewegung eines Stellantriebes in dieser Form nicht möglich.

Ein weiteres Beispiel für die Reduktion von Maschinenstillstandszeiten aus dem Bereich der Thermoformverpackungsmaschinen stellen sogenannte Mehrstationenkonzepte bzw. Multiformatmaschinen dar (MULTIVAC 2012, SCHMID 2014). Hierfür werden mehrere Stationen für die Realisierung eines Vorgangs eines Verpackungsprozesses in einer Maschine vorgesehen. Diese einzelnen Stationen sind für jeweils ein spezielles Format vorbereitet, sodass ein Formatwechsel durch das Ein- bzw. Ausschalten der jeweiligen Stationen erfolgen kann. Da die Umstellung auf zusätzliche, nicht bereits vorbereitete Formate intern zu erfolgen hat, stellt dies keine separate Gruppe dar. Ferner weist BAUERNFEIND (2013) auf den Einsatz von „formatfreien“ Funktionen hin, allerdings ohne zu spezifizieren, welche Funktion in dieser Weise wie flexibilisiert wurde.

Die identifizierten Verbesserungsmaßnahmen sind aufgrund der unterschiedlichen Maschinentypen und Marktsegmente sehr heterogen. Allgemein sind die dargestellten Maßnahmen weiterhin für einen internen Rüstprozess ausgelegt. Technische Systeme, welche eine nahezu vollständige Externalisierung der Rüsttätigkeiten ermöglichen, werden nicht dargestellt. Auch die roboterbasierten Formatwechsel finden intern statt, sodass weiterhin eine Maschinenstillstandszeit von ca. 15 Minuten anfällt (SCHUBERT 2013). Ein Beispiel für eine Ausnahme sind externe Vorwärmstationen (AFZ 2004).

Die Auswertung der unternehmensnahen Fachliteratur zeigt auf, dass zwar Maschinenstillstandszeiten von weniger als zehn Minuten möglich sind, allerdings auch, dass ein Formatwechsel innerhalb von 30 bis 60 Minuten als Erfolg erachtet wird. Daher werden bspw. die Zielsetzungen von SMED oder Zero Changeover weit verfehlt und das wirtschaftliche Verpacken in kleinchargigen Losgrößen bis hin zur Losgröße 1 wird als nicht möglich erachtet.

#### 3.3.3 Fazit

Der Werkzeug- und der Verpackungsmaschinenbau sind mit sinkenden Losgrößen und damit einem steigenden Bedarf an flexiblen Systemen konfrontiert. Die technischen Entwicklungen des Werkzeugmaschinenbaus zielen auf eine Zunahme des Automatisierungsgrades sowie einer gleichzeitigen und damit einhergehenden Steigerung der Flexibilität ab. Der Zielkonflikt zwischen Automatisierung und Flexibilität scheint aufgehoben. Die Verkürzung der Maschinenstillstandszeiten werden durch eine Externalisierung von Tätigkeiten und eine

Automatisierung des Rüstprozesses realisiert. Falls manuelle Aufwendungen nötig sind, welche sich auf die Personalrüstkosten auswirken, werden diese möglichst externalisiert. Auch werden immer mehr Fertigungsverfahren eingesetzt, welche ohne geometriegebundene Werkzeuge die Funktionserfüllung realisieren.

Im Verpackungsmaschinenbau ist ebenfalls ein steigender Trend zu einem höheren Automatisierungsgrad feststellbar. Allerdings werden auch viele Neuerungen kommuniziert, welche die Verbesserung eines manuellen Rüstprozesses behandeln, z. B. Einstellhilfen oder das farbige Markieren von Rüstteilen. Es ist kein derart ausgeprägter Trend zu technischen Lösungen feststellbar, die ein externalisiertes Vorbereiten des Rüstvorganges ermöglichen und somit zu einer deutlichen Reduzierung der Maschinenstillstandszeiten führen. So wird zwar der Rüstvorgang automatisiert ausgeführt, allerdings ist hierfür ein längerer Maschinenstillstand notwendig, da der Wechsel der Werkzeuge für das Greifen und Handhaben der Verarbeitungsgüter intern erfolgt (u. a. SCHUBERT 2013).

Bei Werkzeug- und Verpackungsmaschinen haben die Fortschritte in den Bereichen Antriebstechnik, Steuerungssysteme und Robotik zu einer Steigerung der Flexibilität beigetragen. Hinsichtlich einer verfahrensseitigen Flexibilisierung haben sich in der Fertigungstechnik neue Technologien entwickelt und etabliert.

### 3.4 Darstellung der Handlungsfelder

Anhand der bisherigen Ausführungen werden fünf Handlungsfelder abgeleitet.

*Die Steigerung der Formatflexibilität ist als Zielgröße in die Verpackungsmaschinenentwicklung zu integrieren.* Die Formatflexibilität und deren mögliche Ausprägung als Umrüstbarkeit muss eine Zielgröße der Produktentwicklung sein. In der Betriebsphase sind auch Einflussmöglichkeiten vorhanden, allerdings werden die maßgeblichen Entscheidungen bereits in der Entwicklung getroffen. Eine nachträgliche Änderung technischer Systeme ist deutlich kostspieliger als eine direkte Berücksichtigung im Rahmen der Entwicklung, vgl. Abbildung 18. In der Nutzungsphase ist die Möglichkeit der Beeinflussung eingeschränkt, obwohl in dieser Phase der größte Teil der Kosten verursacht wird. Die alleinige Berücksichtigung in der Entwicklung ist nicht ausreichend, da wiederum in den frühen Phasen der Entwicklung die größeren Potenziale vorhanden sind. Eine Einbettung und Integration in gängige und somit etablierte Vorgehensmodelle des Entwicklungsprozesses wird bei den bekannten Ansätzen nicht aufgezeigt. Diese Ansätze sind autark und sehr singulär auf die Rüstprozessverbesserung ausgerichtet. Um allerdings die Berücksichtigung der Zielgröße Format-

### 3 Stand der Wissenschaft und Technik

flexibilität im Rahmen der Entwicklung zu fördern, insbesondere für den mittelständisch geprägten Verpackungsmaschinenbau, ist eine aufwandsarme Integration in das jeweils eingesetzte Vorgehensmodell unabdingbar. Ferner fokussieren die Ansätze in technischer Sicht die Gestaltung von Betriebsmitteln und vernachlässigen weitere Entwicklungsphasen.

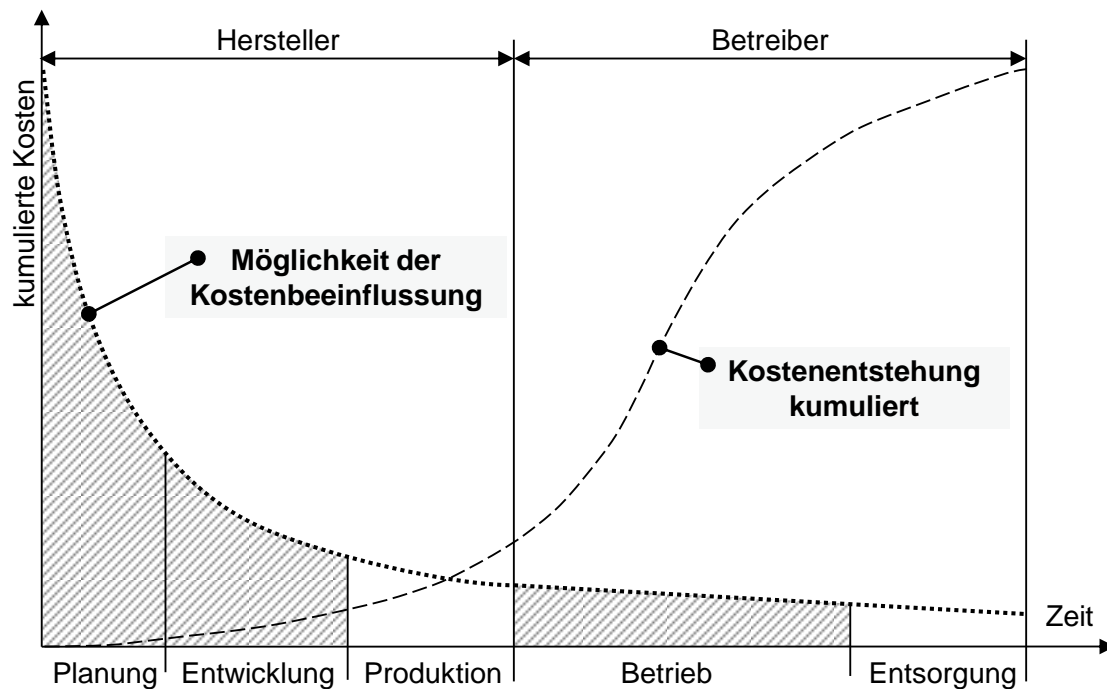


Abbildung 18: Verlauf der Kostenbeeinflussung und -entstehung im Produktlebenszyklus in Anlehnung an EHRENSPIEL ET AL. (2007, S. 11)

Eine wirtschaftliche Betrachtung der Formatflexibilität hat bereits in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses zu erfolgen. Die Zielsetzung von Rüstprozessverbesserungen wird in den Arbeiten teilweise nur aus der Konzeptbezeichnung abgeleitet oder fehlt vollständig. Beispielsweise wird bei SMED ein Maschinenstillstand von maximal zehn Minuten (SHINGO 1985) und bei Zero Changeover von maximal drei Minuten (SEKINE & ARAI 1992) als akzeptabel erachtet. Dies stellt zwar eine sehr eingängliche und verständliche Zielsetzung dar, jedoch werden bspw. die Personalarüstkosten der externalisierten Tätigkeiten bei dieser Zieldefinition nicht berücksichtigt. Im Rahmen von DFC werden Kennzahlen ermittelt und die Zielsetzung anhand der aktuellen Kennzahlen abgeleitet. Jedoch haben bspw. die Kennzahlen in OWEN ET AL. (2011) keinen Bezug zu wirtschaftlichen Größen. Somit werden wirtschaftliche Aspekte bei der Zieldefinition unzureichend berücksichtigt. Des Weiteren wird in den dargelegten Veröffentlichungen auf die wirtschaftlichen Vorteile einer Rüsto Optimierung hingewiesen, z. B. eine Verringerung der wirtschaftlichen Losgrößen in SHINGO

(1985, S. 18) oder MCINTOSH ET AL. (2001, S. 17). Auch wird die Notwendigkeit einer Bewertung der erarbeiteten Verbesserungsmaßnahmen aufgezeigt, bspw. im achten Schritt des Designs for Changeover in REIK ET AL. (2006b). Allerdings wird eine umfassende Berechnungsvorschrift nicht dargestellt. In EICHHORN (2012, S. 135 ff.) wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die monetäre Bewertung von Maßnahmen dargelegt, welche für den Einsatz in der Betriebsphase von Bearbeitungszentren angedacht ist. Die Spezifika des Entwicklungsprozesses insbesondere in frühen Phasen bleiben unberücksichtigt, bspw. Unsicherheiten. Da die Formatwechsel zunehmend automatisiert durchgeführt werden, vgl. Abschnitt 3.3, führt dies zu einem zunehmenden Automatisierungsgrad und zu steigenden Anschaffungskosten der Verpackungsmaschine. Dies steigert das Investitionsvolumen und äußert sich in einem höheren Investitionsrisiko für den Maschinenbetreiber (SCHMITZ 1994, S. 168). Daher ist die Investitionsentscheidung aus Kunden- und Betreibersicht ebenfalls zu berücksichtigen.

*Die Flexibilitätsbedarfe sind systematisiert zu ermitteln und die Potenziale in der Konzeptphase sind zu nutzen.* Da die Packungsvielfalt deutlich steigt und insbesondere die Verpackungen hinsichtlich ihrer Eigenschaften heterogener werden, z. B. neue Packstoffe, sind die Auswirkungen auf die Verpackungsmaschine systematisch zu erfassen. Eine systematische Erfassung ermöglicht im Entwicklungsprozess eine vollumfängliche und nachvollziehbare Berücksichtigung. Auch ist der Anteil an Neukonstruktionen im Verarbeitungsmaschinenbau höher als in vergleichbaren Maschinenbaubranchen (MAJSCHAK 1996, S. 10), sodass weniger auf vorhandene Lösungen zurückgegriffen werden kann. Eine Notwendigkeit der Identifikation von Veränderungstreibern wird in REIK ET AL. (2006a, 2006b) und OWEN ET AL. (2011) benannt, jedoch werden nur die Unterschiede zwischen den herzustellenden Produkten und die Auswirkungen auf die Rüsttätigkeiten betrachtet. Die Zustandsdimension der Formatflexibilität und die notwendige Größe der Flexibilitätskorridore bleiben unberücksichtigt. Allerdings darf die Sicherstellung einer grundsätzlichen Fähigkeit einer Verpackungsmaschine, eine Packung herzustellen, nicht vernachlässigt werden. Für eine Verbesserung der Flexibilität wird in den Arbeiten der Fokus auf ein schrittweises Verbessern einer ausgearbeiteten und detaillierten Entwicklung gelegt. Die Konzeption, als eine der frühen Entwicklungsphasen, wird in die Betrachtung kaum miteinbezogen.

*Der Einsatz von Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität ist zu forcieren, um den Bedarf an Rüstvorgängen zu reduzieren.* Die dargelegten Arbeiten in Abschnitt 3.2 vernachlässigen die Möglichkeit und somit das Potenzial, ein flexibleres Verfahren einzusetzen. Der Begriff Verfahren steht hierbei als allgemeiner Oberbegriff und Zusammenfassung von Fertigungs- und Verarbeitungs-

verfahren. Im Rahmen einer Rüstprozessoptimierung ist eine solche Überlegung im Hinblick auf die bereits getätigte Investition und die damit verbundene Notwendigkeit der Auslastung zu spät. Allerdings ist dieser Freiheitsgrad im Rahmen der Entwicklung gegeben. Diesen Gedankengang stellen auch LINDEMANN ET AL. (2006, S. 89 ff.) für die Herstellung von individualisierten Produkten dar und es werden Beispiele aus der Fertigungstechnik benannt, u. a. Additive Fertigung, rechnergesteuertes Treiben von Blechbauteilen und robotergeführte Laserstrahlschweißprozesse. Ein Kernaspekt hinter diesen Fertigungsverfahren ist der Softwareeinsatz anstelle von wenig flexiblen und kostspieligen Werkzeugen (LINDEMANN ET AL. 2006, S. 91). Der Einsatz von wenig flexiblen Werkzeugen führt nicht nur zu höheren Maschinenstillstandszeiten aufgrund von notwendigen Umrüstprozessen, sondern auch die werkstückspezifischen Werkzeugkosten steigen aufgrund der zu geringen Stückzahlen und der somit reduzierten Fixkostendegression.

Die Verlagerung der Funktionalität vom Werkzeug bzw. Arbeitsorgan hin zur Software kann auch mithilfe der Ausführungen in Abschnitt 2.2.2 und insbesondere der Abbildung 3 gedeutet werden. Die Funktionalität wird vom Verarbeitungs- in die Teilsysteme Energie- und Informationssystem verlagert. Diese Verlagerung von Funktionalität, u. a. um die Flexibilität zu steigern, hat bereits durch den Einsatz der Robotik und von dezentralen elektromechanischen Antriebssystemen in Verpackungsmaschinen stattgefunden, vgl. Abschnitt 2.4.2.

*Die bekannten Gestaltungsregeln und Design Rules sind heterogen verteilt und daher zu sammeln sowie zu verdichten.* In der Literatur sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Gestaltungsregeln bzw. -vorschlägen und vergleichbare Hinweise für eine Verbesserung eines Rüstprozesses zu finden, welche den Schwerpunkt auf die Gestaltung der Betriebsmittel legen. Somit ist in Summe eine umfangreiche, jedoch in dieser Form verteilte und heterogene Informationsbasis vorhanden. Diese Gestaltungsregeln sind nur teilweise identifizierten Verbesserungspotenzialen zugeordnet, z. B. von SEKINE & ARAI (1992) zu den Verschwendungskategorien. Eine Zuordnung ist eine sinnvolle Kopplung und ermöglicht eine effiziente Identifikation der für die Verbesserung zweckmäßigen Gestaltungsregeln. Allerdings sind diese Zuordnungen starr bzw. hierarchisiert. Daher wird die situationsgerechte Nutzung der Gestaltungsregeln für die Vielzahl an unterschiedlichen Rüstprozessen und den jeweiligen Defiziten erschwert. Dies resultiert aus dem starren Optimierungsfokus der jeweiligen Ansätze, z. B. Externalisierung. Somit ergibt sich der Bedarf an einer vereinheitlichenden Zusammenführung der einzelnen Gestaltungsregeln. Dazu gehört gleichermaßen das Ermöglichen eines situationsangepassten und flexiblen Zugriffs.



# 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

## 4.1 Überblick

Der Untersuchungsbereich für die weitere Ausarbeitung wird zunächst im Abschnitt 4.2 spezifiziert. In Abschnitt 4.3 werden die Anforderungen an das Vorgehen aufgezeigt. Auf dieser Basis führt Abschnitt 4.4 das Vorgehen zur Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen ein. Das Vorgehen basiert auf vier Methodenbausteinen, die in den folgenden Abschnitten dargestellt werden. In Abschnitt 4.5 ist dies der Methodenbaustein Szenario-Steckbrief, in Abschnitt 4.6 die Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs, in Abschnitt 4.7 folgt der Funktionspool und in Abschnitt 4.8 der Gestaltungspool.

## 4.2 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs

Die Untersuchungsobjekte im engeren Sinne sind Verpackungsmaschinen, die Kernelemente von abpackenden Anlagen, die einen hohen Mechanisierungs- und Automatisierungsgrad während des Verpackungsprozesses aufweisen. Verpackungsvorgänge, welche manuell auszuführen sind, werden nicht betrachtet. Der Fokus wird auf die Veränderungsdimension Flexibilität und als spezifische Ausprägung auf die Formatflexibilität gelegt. Diese Klasse der Veränderungsfähigkeit ist für eine wirtschaftliche Bewältigung der zunehmenden Packungsvielfalt und der Reduktion der Losgrößen entscheidend. Die Wandlungsfähigkeit und die Rekonfigurierbarkeit, als taktische Fähigkeiten, werden nicht betrachtet.

Die Umrüstbarkeit, als Eigenschaft einer Verpackungsmaschine, ist eine Maßnahme für das Erreichen von Formatflexibilität. Das operative Umrüsten kann manuell, teilautomatisiert oder vollautomatisiert erfolgen. Bei der Steigerung der Formatflexibilität sollen personal- und maschinenbezogene Aufwendungen reduziert werden. Die Formatflexibilität soll primär durch technische und nur sekundär durch organisatorische Maßnahmen verbessert werden. Der Fokus liegt auf den Befähigern, die dem Bereich der geometriebasierten Formatflexibilität zugeordnet werden können. Für die zielführende Gestaltung der Formatflexibilität ist es entscheidend, dass die Freiheitsgrade des Entwicklungsprozesses ausgeschöpft werden. Die Verbesserung der Formatflexibilität wirkt sich auf die Nutzungsphase aus. Eine lebenszyklusphasenübergreifende Betrachtung ist daher notwendig.

### 4.3 Anforderungen an das Vorgehen

Das Vorgehen hat unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen. Die inhaltlichen Anforderungen stellen die in Abschnitt 3.4 dargelegten Handlungsfelder dar. Die zusätzlichen praktischen Anforderungen werden nachfolgend erläutert.

*Praxisorientierte Anwendbarkeit:* Der Verpackungsmaschinenbau ist eine „(...) mittelständisch strukturierte Branche“ (VDMA 2015). Ein großer Anteil der Hersteller von Verpackungsmaschinen sind kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Den Arbeitsstil von Mitarbeitern eines Unternehmens aus dem Verpackungsmaschinenbau charakterisiert BRAUN (2005, S. 79), anhand eines Beispiels aus der strategischen Produktplanung, als „(...) sehr operativ orientierte und pragmatische Arbeitsweise (...)“. Für eine Praxistauglichkeit müssen mit dem Einsatz des Vorgehens eine Effizienzsteigerung und damit ein positives Aufwand-Nutzen-Verhältnis verbunden sein. Dies bezieht sich auf die Durchlaufzeit der Entwicklung, die einen großen Einfluss auf die Produkteinführungszeit hat, sowie auf die Aufwendungen, u. a. die Personalkosten, da bspw. zeit- und kostspielige Iterationsschleifen vermieden werden. Zusätzlich sollte das Vorgehen durch Einfachheit der Einarbeitung und Nutzung im pragmatischen Umfeld des Verpackungsmaschinenbaus für Akzeptanz sorgen. Dies beinhaltet auch die Sicherstellung von Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Um die Anwendbarkeit sicherzustellen, wird der Einsatz von Hilfsmitteln als Notwendigkeit erachtet. Diese sollen zwar durch den Einsatz von rechnergestützten Systemen vereinfacht werden, jedoch sollte keine separate Softwarelösung notwendig sein. Für eine Sicherstellung der Praktikabilität muss eine Eignung für Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktionen gegeben sein. Die Kreativität in der Lösungsfindung sollte möglichst gefördert werden.

*Integrationsfähigkeit und Übertragbarkeit:* Die Formatflexibilität ist eine entscheidende Zielgröße der Entwicklung einer Verpackungsmaschine. Allerdings ist diese Zielgröße nicht singular zu verfolgen. Für die Integrationsfähigkeit muss sichergestellt sein, dass auch weitere Entwicklungsziele berücksichtigt werden können. Daher sollte das Vorgehen derart gestaltet sein, dass dieses in die jeweiligen unternehmensspezifischen Prozesse eingebettet werden kann. Dies beinhaltet auch eine fallspezifische Flexibilität hinsichtlich der Anwendung und Nutzung von einzelnen Elementen des Vorgehens. Das Vorgehen soll ferner die Spezifika des Verpackungsmaschinenbaus sowie der Verpackungstechnik im Allgemeinen berücksichtigen, um den Adaptionaufwand zu minimieren. Auch ist die Allgemeingültigkeit hinsichtlich der zu entwickelnden Verpackungsmaschine zu gewährleisten.

### 4.4 Vorgehen zur Steigerung der Formatflexibilität

Das Vorgehen zur Steigerung der Formatflexibilität umfasst vier Methodenbausteine und das Gesamtkonzept integriert diese Methodenbausteine in einen Entwicklungsprozess. In diesem Abschnitt werden aus Vorgehensmodellen der Produktentwicklung die Struktur und der Aufbau des Gesamtkonzepts abgeleitet.

Die Steigerung der Formatflexibilität einer Verpackungsmaschine hat aufgrund der größeren Potenziale und Freiheitsgrade bereits im Entwicklungsprozess zu erfolgen. Der Entwicklungsprozess ist die „(..) Summe aller Arbeitsschritte von der Produktidee bis zur Erzeugung der Fertigungsunterlagen (...)“ (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 13). Die Entwicklungstätigkeit ist daher „(..) die Tätigkeit, bei der ausgehend von Anforderungen die (..) Merkmale eines technischen Produkts mit allen seinen lebenslaufbezogenen Eigenschaften (...) festgelegt werden“ (EHRENSPIEL & MEERKAMM 2013, S. 254). Die Entwicklung ist ein Optimierungsprozess, da teilweise widersprüchliche Ziele zu verfolgen sind (EHRENSPIEL & MEERKAMM 2013, S. 254). Die auf die Mechanik bezogene Konstruktion wird im Rahmen dieser Arbeit als ein Teil einer domänenübergreifenden Entwicklung gesehen. Ein Vorgehensmodell ist ein Hilfsmittel für den Entwickler, um Prozesse zu planen, um sich innerhalb des aktuellen Prozesses zu orientieren sowie um abgeschlossene Prozesse zu reflektieren (LINDEMANN 2009, S. 33). Daher legt ein Vorgehensmodell - auch Prozessmodell genannt - den Prozess und somit die Reihenfolge von Aktivitäten fest, wobei eine Aktivität „Eingangsinformationen (...) zu Ausgangsinformationen (..) verarbeitet“ (LINDEMANN 2009, S. 16).

Um die Anforderungen der Praxistauglichkeit und der Integrationsfähigkeit sowie den Handlungsbedarf des integrierten Ansatzes zu berücksichtigen, werden im Folgenden Vorgehensmodelle der Produktentwicklung analysiert. Hinsichtlich des Auflösungsgrades von Produktentwicklungsprozessen unterscheidet LINDEMANN (2009, S. 38) die folgenden vier Kategorien:

- elementare Handlungsabläufe,
- operative Arbeitsschritte,
- Phasen/Arbeitsschritte und
- Meilensteine/Gesamtprojekt.

Die Grenzen zwischen diesen Stufen verschwimmen (LINDEMANN 2009, S. 39). Vorgehensmodelle der Kategorien elementare Handlungsabläufe, z. B. Plan-Do-Check-Act-Zyklus (PDCA), und operative Arbeitsschritte, z. B. Münchener Vorgehensmodell, sind auf die Mikrologik einer Produktentwicklung fokussiert

#### **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

(BRAUN 2005, S. 29; LINDEMANN 2009, S. 39). Die makrologischen Aspekte berücksichtigen die Vorgehensmodelle des Auflösungsgrades Meilenstein/Gesamtprojekt durch deren Fokus auf das Projektmanagement.

Für die hiesige Aufgabenstellung werden auf Basis einer Analyse die Vorgehensmodelle der Kategorie Phasen/Arbeitsschritte im Vergleich zu den anderen Kategorien als am besten geeignet erachtet (u. a. BRAUN 2005, LINDEMANN 2009, FELDHUSEN & GROTE 2013). Dieser Kategorie werden unterschiedliche Vorgehensmodelle zugeordnet. Dies sind bspw. die VDI-Richtlinie 2221, die VDI-Richtlinie 2206 sowie das Münchner Produktkonkretisierungsmodell (MKM) (LINDEMANN 2009, S. 39). Die VDI-Richtlinie 2221 ist eine Zusammenfassung von verschiedenen Prozessmodellen mit einem daher allgemeingültigen Charakter (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 16). Die Erweiterung der VDI-Richtlinie 2221 um den Aspekt der Eigenschaftsabsicherung stellt die VDI-Richtlinie 2206 mit dem V-Modell dar (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 16).

Diese in Richtlinien dargelegten Vorgehensmodelle wurden in der industriellen Praxis in Form von unternehmensspezifischen Vorgehensmodellen adaptiert. Daher ist kein allgemeingültiges und allgemeinverbindliches Vorgehen für die Entwicklung von technischen Systemen im Allgemeinen und daher auch nicht im Verpackungsmaschinenbau im Speziellen identifizierbar. Allerdings können verallgemeinert vier typische Entwicklungsphasen abgeleitet werden, die sich an einer Struktur vom Abstrakten hin zum Konkreten orientieren, vgl. Abbildung 19. Diese vier Phasen sind die Produktplanung und Aufgabenklärung, die Konzeptions- und Entwurfsphase, die Gestaltungsphase sowie die Ausarbeitung und Detaillierung.

Das in Abbildung 20 dargestellte Gesamtkonzept sieht vier Methodenbausteine vor, welche als Entwicklungsmodule für eine Integration und den Einsatz im jeweiligen Entwicklungsprozess konzipiert sind. Diese Methodenbausteine werden in den folgenden Abschnitten eingeführt. Diese weisen keine direkten Abhängigkeiten auf, sodass sie unabhängig voneinander eingesetzt werden können. Eine Nutzung von Ergebnissen, welche im Rahmen eines anderen Methodenbausteins generiert werden, ist allerdings zweckmäßig und zielführend. Diese Unabhängigkeit der Methodenbausteine ermöglicht deren Modularität und gewährleistet das Erfüllen der Anforderung Integrierbarkeit.

## 4.4 Vorgehen zur Steigerung der Formatflexibilität

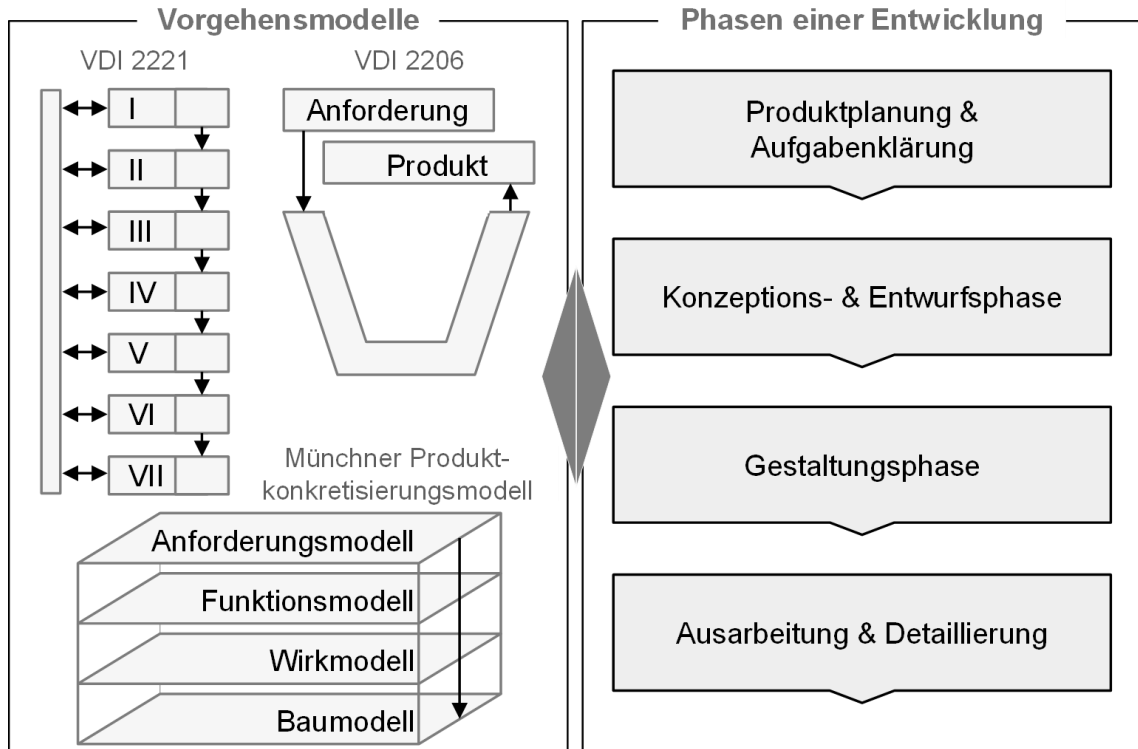


Abbildung 19: Ableitung der Phasen einer Entwicklung aus den Vorgehensmodellen der Kategorie Phasen/Arbeitsschritte

Der Phase Ausarbeitung und Detaillierung wird kein methodischer Baustein zugeordnet, da die zu diesem Zeitpunkt des Entwicklungsprozesses vorangeschrittene maschinenabhängige Spezifikation methodisch nicht weiter unterstützt werden kann. Eine Unterstützung in dieser Phase wird durch das verbesserte Ergebnis der Gestaltungsphase erreicht, welches die Basis für die weitere Ausarbeitung bildet und diese Phase somit vereinfacht.

Da das Gesamtkonzept diese allgemeingültigen Entwicklungsphasen aufgreift, ist es vom eingesetzten Vorgehensmodell unabhängig. Somit wird ermöglicht, dass die Methodenbausteine im jeweiligen Vorgehensmodell einsetzbar sind. Ein separates und ausschließlich auf die Formatflexibilität fokussiertes Vorgehensmodell ist somit nicht nötig und die Hemmnisse für eine Anwendung werden deutlich reduziert. Ferner wird gewährleistet, dass die weiteren Entwicklungsziele gemäß dem eingesetzten Vorgehensmodell berücksichtigt werden.

## 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

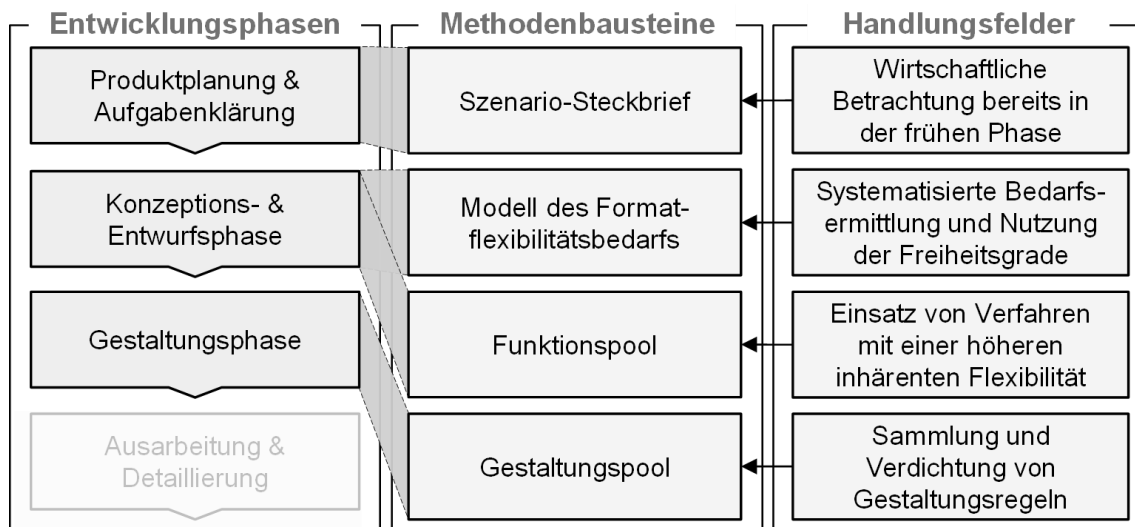


Abbildung 20: Gesamtkonzept aus den Entwicklungsphasen und den integrierten Methodenbausteinen sowie die adressierten Handlungsfelder

### 4.5 Methodenbaustein Szenario-Steckbrief

Dieser Methodenbaustein adressiert den in Abschnitt 3.4 aufgezeigten Handlungsbedarf einer wirtschaftlichen Betrachtung. Der Szenario-Steckbrief ist frühzeitig im Produktplanungs- und Entwicklungsprozess einzusetzen, um bereits in diesen ersten Phasen die wirtschaftlichen Anforderungen und Rahmenbedingungen an die Formatflexibilität zu ermitteln und somit eine wettbewerbsfähige formatflexible Verpackungsmaschine entwickeln zu können.

Die technische Umsetzung von veränderungsfähigen Systemen geht mit finanziellen Mehrbelastungen einher (SCHUH ET AL. 2004a). Beispielhaft zeigt dies der steigende Automatisierungsgrad für die Realisierung eines schnelleren und vom Rüstpersonal unabhängigen Formatwechsels. Ferner sind die in der Planungs- und Anforderungsphase vorliegenden Informationen mit Unsicherheiten behaftet. Die Gründe für Unsicherheiten sind vielfältig. Eine Ursache wird durch die Unfähigkeit von potenziellen Kunden ihre Bedürfnisse zu beschreiben charakterisiert (MULLINS & SUTHERLAND 1998). Da die Flexibilität ein schwierig greifbares Konzept darstellt, vgl. Abschnitt 2.3, wird der Grad an Unsicherheit in Bezug auf die Formatflexibilität verschärft. Als weiteres Hauptproblem bei der Anforderungsermittlung wird neben der unklaren Zielvorstellung auch die Veränderlichkeit von Anforderungen gesehen (RUPP & DIE SOPHISTEN 2014, S. 24). Diese zeitlichen Veränderungen resultieren u. a. aus veränderlichen Rahmenbedingungen in der Betriebsphase. Eine Verpackungsmaschine ist ein Investitionsgut und weist eine mehrjährige Nutzungsdauer auf.

Durch ein frühzeitiges Einbinden der wirtschaftlichen Aspekte wird das Risiko einer Fehlentwicklung reduziert. Wie Studienergebnisse aufzeigen, scheitern im Allgemeinen zwischen 55 und 70 % der Projekte aufgrund von unklaren Anforderungen und Zielen (ENGEL & QUADAJACOB 2016). Bei KMU ist die Planungsphase oftmals wenig formal ausgeprägt und sehr personenbezogen (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 301). Ferner sind Verpackungsmaschinen oft Spezial- bzw. Individuallösungen und werden auf Basis von spezifischen Kundenanforderungen umgesetzt (VDMA & MCKINSEY 2014). Dies betrifft auch den Aspekt der Formatflexibilität. KOREN ET AL. (1999) benennen das Ziel einer kundenspezifischen Flexibilität („customized flexibility“). Daher wird der Bedarf gesehen, die frühen Entwicklungsphasen zu unterstützen, um das Projektrisiko zu reduzieren.

Die zugrunde liegende Bewertungsaufgabe wird nachfolgend skizziert. Der Nutzen einer formatflexibleren Verpackungsmaschine kommt in der Betriebsphase zum Tragen. Die Formatflexibilität als Maschinenfähigkeit wird im Rahmen der Entwicklung entscheidend festgelegt. Dies verursacht zusätzliche Kosten, die sich dem Kunden in Form des Investitionsbedarfes zeigt. Daher resultiert die Notwendigkeit, auch die getätigte oder geplante Investitionsentscheidung aus Kundensicht zu betrachten. Zusätzlich sind aufgrund der frühen Phase des Entwicklungsprozesses Unsicherheiten zu berücksichtigen. Daher soll es mit dem Methodenbaustein möglich sein, anhand einer wirtschaftlichen Betrachtung die maximale Maschinenstillstandszeit zu ermitteln oder mehrere Verpackungsmaschinen miteinander zu vergleichen. Ferner soll eine Berechnung ermöglicht werden, die aufzeigt, wie viel eine Steigerung der Formatflexibilität das Investitionsvolumen erhöhen darf. Um die Akzeptanz des Methodenbausteins sicherzustellen, sollen weitgehend bekannte und erprobte Bestandteile einfließen. Im folgenden Abschnitt 4.5.1 werden die Grundannahmen des Methodenbausteins aufgezeigt sowie die Gesamtstruktur eingeführt. Der Methodenbaustein kombiniert ein Wirtschaftlichkeits- und ein Vorgehensmodell, die in Abschnitt 4.5.2 dargelegt werden. In Abschnitt 4.5.3 folgt die Einbettung in das Gesamtkonzept.

### 4.5.1 Grundannahmen und Gesamtstruktur

Die wirtschaftliche Bewertung von flexiblen Produktionssystemen ist Inhalt von unterschiedlichen wissenschaftlichen Publikationen. Daher wird zunächst ein Überblick von Verfahren für die Bewertung von flexiblen Systemen dargelegt und die Übertragbarkeit auf das hiesige Untersuchungsobjekt und den Bewertungsfokus geprüft. Darauf aufbauend wird die Gesamtstruktur des Methodenbausteins eingeführt.

## **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

### **Ansätze für die Wirtschaftlichkeitsbewertung von flexiblen Systemen**

Eine Vielzahl von heterogenen Ausprägungen im Hinblick auf die Veränderungsfähigkeit im Allgemeinen und die Flexibilität im Speziellen sind in der Literatur zu finden, vgl. Abschnitt 2.3. Daher existiert kein einheitliches Verfahren für die Ermittlung einer Bemessungsgröße Flexibilität. Ein Erfassen der Zielgröße Flexibilität ist notwendig, um bspw. diese gezielt steuern zu können (COX 1989). Daher beschäftigen sich Arbeiten mit der Bewertung von Flexibilität von Produktionssystemen und nutzen hierfür bspw. Kennzahlensysteme (u. a. SCHUH ET AL. 2004; GEORGOULIAS ET AL. 2007; ROGALSKI & OVTCHAROVA 2009; ROGALSKI 2010; KLETTI & SCHUMACHER 2014, S. 78; SEEBACHER & WINKLER 2014). Allerdings werden monetäre Größen nicht vollständig berücksichtigt.

Im Hinblick auf die Bewertung der Maschinenflexibilität unterscheiden SETHI & SETHI (1990) und SARKER ET AL. (2009) zwischen zeit- und/oder kostenbasierten (u. a. TAYMAZ 1989, CHANDRA & TOMBAK 1992) sowie operationsfähigkeitsbasierten Ansätzen (u. a. BRILL & MANDELBAUM 1989). WAHAB ET AL. (2008) kombinieren diese Ansätze. Die Bewertungsobjekte sind einzelne Werkzeugmaschinen bzw. FFS (u. a. MOHAMED ET AL. 2001, WAHAB & STOYAN 2008). Die Aspekte einer monetären Investitionsentscheidung sind nicht integriert.

Die Kapitalwertmethode wird ebenfalls für die wirtschaftliche Flexibilitätsbewertung eingesetzt (u. a. SCHMITZ 1994; ALEXOPOULOSA ET AL. 2007; GEORGOULIAS ET AL. 2009; EICHHORN 2012, S. 135 ff.; KAMPKER ET AL. 2013). Die Kapitalwertmethode ist ein Verfahren der dynamischen Investitionsentscheidung und berücksichtigt, im Gegensatz zu statischen Verfahren, den Zeitpunkt von Ein- und Auszahlungen (GÖTZE 2008, S. 71; ERMSCHEL ET AL. 2011, S. 44 ff.; DAUM ET AL. 2014, S. 276; HERING 2014, S. 15). Eine lebenszyklusbezogene Kostenanalyse schlagen weitere Arbeiten vor (u. a. TOSATTI 2006). Bei FLEISCHER ET AL. (2005), LANZA ET AL. (2009), LANZA ET AL. (2010a) und LANZA ET AL. (2010b) fließt das OEE-Kennzahlensystem in die Flexibilitätsbewertung ein, um die Kosten in das Verhältnis zum Nutzen zu setzen. Allerdings berücksichtigen diese Methoden, im Gegensatz zu den Verfahren der Investitionsentscheidung, nicht die Erlöse bzw. Einzahlungen (TOSATTI 2006).

Die Flexibilität von Produktionssystemen wird als Maßnahme zur Bewältigung von Unsicherheiten gesehen (NEWMAN ET AL. 1993, ZÄH ET AL. 2006a). Daher werden Unsicherheiten in der Bewertung, z. B. mittels Fuzzy-Set-Theorie oder Wahrscheinlichkeitsverteilungen, berücksichtigt (u. a. REINHART ET AL. 2007, KREBS 2011, VON BREDOW 2012).



Ferner wird der Realloptionsansatz angewendet. Der Realloptionsansatz ist ein Verfahren der Investitionsentscheidung unter Berücksichtigung von Unsicherheiten (GÖTZE 2008, S. 385 ff.). Es werden einige Ansätze dargelegt, die den Realloptionsansatz für eine wirtschaftliche Flexibilitätsbewertung vorschlagen (u. a. ZÄH ET AL. 2003, JIAO & JIAO 2004, ABELE ET AL. 2006, ZÄH ET AL. 2006a, ZÄH ET AL. 2006b, ABELE ET AL. 2007, SUDHOFF 2007, MÖLLER 2008, TERKAY ET AL. 2009). Jedoch weisen Realloptionsansätze eine höhere Komplexität auf (JIAO & JIAO 2004) und eine generelle Überlegenheit ist umstritten (GÖTZE 2008, S. 410). Für die Anwendung in der mittelständisch geprägten Verpackungsmaschinenindustrie scheint dieser Ansatz darüber hinaus zu komplex.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass viele Arbeiten eine Flexibilitätsart bewerten, die nicht dem Untersuchungsbereich dieser Arbeit entspricht, z. B. Routenflexibilität. Diese Ansätze sind daher für eine Bewertung der Formatflexibilität nicht geeignet. Auch wird die Flexibilität als Messgröße benannt, jedoch zeigen die Ausführungen, dass z. B. die Wandlungsfähigkeit adressiert wird. Die Kapitalwertmethode, als dynamisches Verfahren der Investitionsentscheidung, wird für die Flexibilitätsbewertung adaptiert und bildet lebenszyklusbezogene Veränderungen im Vergleich zu statischen Verfahren besser ab. Ferner hat die Kapitalwertmethode eine höhere Aussagegüte als kostenbezogene Verfahren. Für die Charakterisierung der Produktivität ist das OEE-Kennzahlensystem geeignet.

### **Gesamtstruktur des Methodenbausteins**

Dieser Methodenbaustein kombiniert ein Wirtschaftlichkeits- und ein Vorgehensmodell. Die relevanten Vorarbeiten werden im Rahmen der folgenden Konzeption des Methodenbausteins und der Ableitung der Gesamtstruktur dargelegt.

#### *Wirtschaftlichkeitsmodell*

Das Wirtschaftlichkeitsmodell vereint die Kapitalwertmethode mit der Bewertung der Gesamtanlageneffektivität. Für die Bewertung von Investitionsentscheidungen ist die Kapitalwertmethode ein akzeptiertes Verfahren (GÖTZE 2008, S. 80). Ferner ist dieses Verfahren, wie die vorherigen Ausführungen zeigen, grundsätzlich für eine wirtschaftliche Bewertung von flexiblen Systemen geeignet. Jedoch werden in der Grundform Aspekte der Formatflexibilität nicht ausreichend berücksichtigt, sodass eine Anpassung und Erweiterung notwendig ist. Auf einer detaillierten Darstellung der Grundlagen der Kapitalwertmethode wird verzichtet und auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (u. a. GÖTZE 2008, ERMSCHEL ET AL. 2011, HERING 2014, DAUM ET AL. 2014).

#### 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

Bei einer Bewertung der Flexibilität sind weitere Kriterien, z. B. Produktivität, zu betrachten, um ein umfassendes Bild zu erhalten (TAYMAZ 1989). Das OEE-Kennzahlensystem ist eine gängige Möglichkeit für die Charakterisierung des Betriebsverhaltens von Produktionsmaschinen (MAY & KOCH 2008). Die englische Abkürzung OEE ist geläufiger als die deutsche Bezeichnung Gesamtanlageneffektivität (GAE). Das OEE-Kennzahlensystem nach DIN 8743 ist ein Instrument für die Charakterisierung des Betriebsverhaltens von Verpackungsmaschinen. Die DIN 8743 definiert u. a. ein Zeitmodell, vgl. Abbildung 21.

Theoretisch nutzbare Zeit $t_T$					
Maschinenarbeitszeit $t_W$					Ungenutzte Zeit $t_I$
Betriebszeit $t_O$				Geplante Stillstandszeit $t_D$ z. B. Rüsten, Produktwechsel	
Laufzeit $t_R$			Ungeplante Stillstandszeit $t_F$		
Qualitätszeit $t_Q$	Ausschusszeit $t_{LQ}$	Verlustzeit infolge verminderter Ausbringung z. B. Anlaufzeiten $t_{LP}$			
Verlustzeit $t_L$					

Abbildung 21: Zeitmodell für die Berechnung der OEE nach DIN 8743

Die zentrale Kennzahl OEE wird, gemäß der folgenden Formel, aus dem Produkt des Qualitätsgrades  $Q$ , des Leistungsgrades  $P$  und der Verfügbarkeit  $A$  gebildet:

$$OEE = Q \cdot P \cdot A \quad (1)$$

Die Verfügbarkeit  $A$  wird anhand der Betriebszeit  $t_O$ , der Maschinenarbeitszeit  $t_W$ , der theoretisch nutzbaren Zeit  $t_T$  und der ungenutzten Zeit  $t_I$  berechnet. Die Formatflexibilität wirkt sich auf die OEE-Kennzahl wie folgt aus. Die von einem Formatwechsel verursachte Maschinenstillstandszeit wird dem Abschnitt der geplanten Stillstandszeit  $t_D$  zugeordnet. Die Nachlauf- und Vorlaufzeit gehören zur Laufzeit  $t_R$  und dort der Verlustzeit infolge verminderter Ausbringung  $t_{LP}$ . Es wird deutlich, dass die Steigerung der Formatflexibilität sich direkt auf die geplante Stillstandszeit  $t_D$  und die Laufzeit  $t_R$  positiv auswirkt. Daher kann die OEE-Kennzahl für die Bewertung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen eingesetzt werden und ermöglicht weitere Eigenschaften des Betriebsverhaltens, z. B. Wartung, in die Modellierung zu integrieren. Eine monetäre Bewertung ist allerdings nicht vorgesehen. Das entwickelte Wirtschaftlichkeitsmodell vereint die Beschreibung der Betriebscharakteristik mittels DIN 8743 und die Kapitalwertmethode als Verfahren der Investitionsentscheidung.

### *Vorgehensmodell*

Das Vorgehensmodell soll bei der Berücksichtigung von Unsicherheiten unterstützen. Für die Prognose von zukünftigen Veränderungen werden quantitative und qualitative Verfahren unterschieden, z. B. Delphi-Technik (KLEMKE 2014, S. 20). Ein weiteres Verfahren ist die Szenariotechnik. Im Rahmen von Planungsprojekten ist diese ein Werkzeug für die systematische Unsicherheits- und Risikoermittlung (HAMBACH & ALBRECHT 2014). Es wurden unterschiedliche Varianten von szenariobasierten Verfahren entwickelt (u. a. KOSOW & GABNER 2008). Falls die Szenarien in strategische Planungen einbezogen werden, so wird dies als Szenario-Management bezeichnet (GAUSEMEIER & PLASS 2014, S. 46). Ein durchgeführtes Review zeigt, dass dies ein praktikables und erprobtes Verfahren ist (GAUSEMEIER 2011, GAUSEMEIER 2012). Ebenfalls wurde das Szenario-Management bereits für strategische Betrachtungen des Verpackungsmaschinenbaus eingesetzt (vgl. GAUSEMEIER & KÖCKERLING 2000; BRAUN 2005, S. 89 ff.), sodass von einer Akzeptanz des Verfahrens ausgegangen wird. Auch wurde das Szenario-Management im Rahmen der Planung der Veränderlichkeit (u. a. HERNÁNDEZ MORALES 2002, WIENDAHL & HEGER 2004), im Produktplanungs- und Entwicklungsprozess (u. a. Schuh et al. 2014) und bei weiteren strategischen Planungsaufgaben (u. a. HERZHOFF 2004; SCHACK 2007, S. 124 ff.) verwendet.

Die Vorteile werden in der einfachen Anwendbarkeit, der hohen Flexibilität im Hinblick auf das Gestaltungsfeld und dem ganzheitlichen Ansatz gesehen (SCHACK 2007, S. 126). Das Szenario-Management beruht auf den beiden Säulen vernetztes Denken und multiple Zukünfte (GAUSEMEIER & PLASS 2014, S. 44 ff.). Ferner wird ein Phasenmodell für die Durchführung vorgeschlagen (GAUSEMEIER ET AL. 1998; GAUSEMEIER & PLASS 2014, S. 48).

Die Planung der Formatflexibilität hat für den Maschinenbauer, aus Sicht der Entwicklung, und für den Kunden, aus Sicht der Investitionsentscheidung, einen strategischen Charakter. Daher wird grundsätzlich der Einsatz der Szenariotechnik als zielführend für diesen Methodenbaustein erachtet. Da Hemmnisse für die Anwendung szenariobasierter Verfahren gesehen werden, ist eine Anpassung nötig. Als Hemmnisse werden der zeitliche Aufwand und das benötigte Erfahrungsniveau der Nutzer identifiziert (SCHACK 2007, S. 126). Da zwar die Planung der Formatflexibilität einen strategischen Charakter aufweist, jedoch eine geringere Tragweite als andere strategische Planungen hat, z. B. Fabrikplanung, kann das Verfahren verschlankt und somit der operativere Einsatz ermöglicht werden.

Die Schritte des entwickelten Vorgehensmodells orientieren sich am Szenario-Management von GAUSEMEIER & PLASS (2014, S. 48), vgl. Abbildung 22. Die

## 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

Adaption des Phasenmodells erfolgt in den einzelnen Schritten und Aufgaben sowie in der Kombination mit dem Wirtschaftlichkeitsmodell. Die Grundsäule des vernetzten Denkens kommt im Wirtschaftlichkeits- und die multiplen Zukünfte im Vorgehensmodell zum Ausdruck.

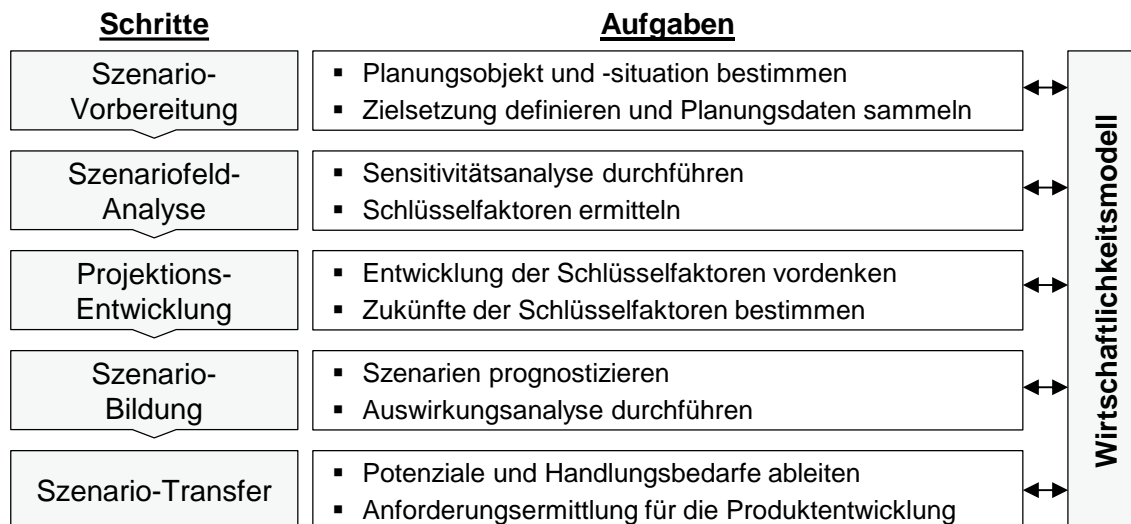


Abbildung 22: Vorgehensmodell des Methodenbausteins Szenario-Steckbrief in Anlehnung an GAUSEMEIER & PLASS (2014, S. 48) und die Erweiterung um ein Wirtschaftlichkeitsmodell

### 4.5.2 Detaillierung des Wirtschaftlichkeits- und des Vorgehensmodells

#### Wirtschaftlichkeitsmodell

Das Wirtschaftlichkeitsmodell kombiniert die Kapitalwertmethode mit der Beschreibung des Betriebsverhaltens anhand der DIN 8743. Der Fokus liegt auf der Modellierung der Aspekte der Formatflexibilität, z. B. Maschinenstillstandszeiten und Personalarbeitskosten. Auch werden weitere Kriterien für die Charakterisierung des Betriebsverhaltens genutzt, u. a. Ausschussquoten. Das Wirtschaftlichkeitsmodell hat mehrere Eingabewerte, welche die Eigenschaften der Verpackungsmaschine und die Einsatzbedingungen repräsentieren. Diese Eingabewerte werden anschließend mithilfe von Elementen der Kapitalwertmethode und der OEE-Berechnungsvorschriften verarbeitet. Das Ergebnis des Wirtschaftlichkeitsmodells ist der Kapitalwert als monetäre Bewertungsgröße. Die Strukturierung der Modellierung ermöglicht eine inverse Nutzung des Modells, um bspw. wirtschaftliche Rahmenbedingungen für Entwicklungsprojekte zu ermitteln.

Die Modellierung fokussiert ausgewählte Eingabewerte für eine Reduktion des Aufwandes der Datenerhebung, der Berechnungen sowie der Nachvollziehbarkeit. Diese werden in allgemeine Planungsdaten und maschinenspezifische Daten untergliedert. Nachfolgend werden diese auszugsweise benannt und sind im Anhang 9.1 vollständig beschrieben. Allgemeine Planungsdaten sind u. a. die Maschinenarbeitszeit, die Anzahl der Formatwechsel, der Stundensatz des Rüstpersonals und die Nutzungsdauer. Maschinenspezifische Daten sind u. a. die Anzahl der Rüstmitarbeiter, die Einstellausbringung, die Ausschussquote, die Dauer eines Rüstvorgangs, die Maschinenkosten und die Formatwerkzeugkosten. Die Abbildung 23 visualisiert die Eingangsgrößen Dauer eines Rüstvorgangs, den Hochlaufverlust sowie den Nachlaufverlust.

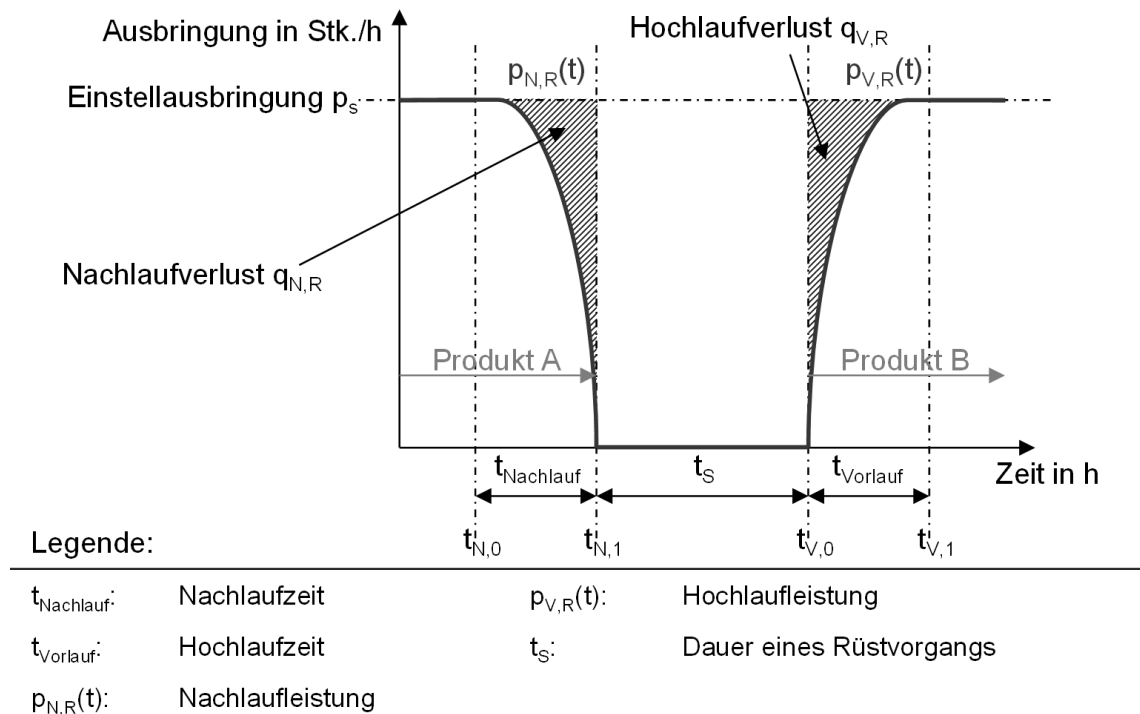


Abbildung 23: Phasen eines Formatwechsels und die phasenspezifischen Ausbringungsmengen in Anlehnung an MCINTOSH ET AL. (2001, S. 7)

Quantitativ kaum messbare Kostenvorteile, wie z. B. ein geringerer Schulungsaufwand der Rüstmitarbeiter bei einem höheren Automatisierungsgrad, finden zunächst keine Berücksichtigung. Anhand dieser Eingabedaten werden die Berechnungen durchgeführt. Die mathematischen Berechnungsgrundlagen werden an dieser Stelle nicht erläutert und sind dem Anhang 9.2 zu entnehmen. Das Ergebnis des Wirtschaftlichkeitsmodells ist die Summe der jährlichen Barwerte und somit der Kapitalwert dieser Verpackungsmaschine.

## **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

### **Vorgehensmodell**

Die *Struktur des Vorgehensmodells* orientiert sich an den fünf Schritten des Szenario-Managements von GAUSEMEIER & PLASS (2014, S. 48). Die Gesamtstruktur kann der Abbildung 22 entnommen werden. Das Vorgehensmodell ist in fünf Arbeitsschritte untergliedert. Wie bereits dargestellt, so wurden die inhaltlichen Schritte für den hiesigen Anwendungsfall modifiziert und durch die Kopplung mit dem Wirtschaftlichkeitsmodell adaptiert.

#### **Schritt 1: Szenario-Vorbereitung**

Zunächst ist das Planungsobjekt und die -situation zu bestimmen. Das Planungsobjekt ist die Verpackungsmaschine, wobei dies auch mehrere Maschinenvarianten umfassen kann. Hinsichtlich der Planungssituation werden grundsätzlich die beiden nachfolgenden Arten der Initiierung eines Produktentwicklungsprojektes unterschieden (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 319):

- Die Initiierung der Entwicklungsaufgabe erfolgt extern durch einen vorliegenden Kundenauftrag.
- Das Projekt wird intern durch die Produktplanung initiiert und ist zunächst für einen anonymen, d. h. nicht spezifizierten, Kundenkreis bestimmt.

Falls ein Kundenauftrag vorliegt, so sind die notwendigen Daten aus dessen Planungen abzuleiten und die Nutzung des Vorgehensmodells dient als Beratungs- und Kommunikationshilfe zwischen dem Kunden und dem Maschinenhersteller. Insbesondere bei erklärungsbedürftigen Investitionsgütern findet ein reger Austausch zwischen dem Kunden und dem Lieferanten statt, da die individuellen Anforderungen zu berücksichtigen sind. Im Falle einer internen Initiierung steht kein Kunde als Informationsquelle zur Verfügung. Daher werden mehrere anonyme Kunden zu einer Bedarfsgruppe bzw. einem Marktsegment zusammengefasst. Dieses Marktsegment soll dann mit der angestrebten Maschinenentwicklung bedient werden. In beiden Fällen kann das Vorgehen bereits in der vorgelagerten Phase der Produktplanung bzw. in der Projektanbahnung eingesetzt werden. Unabhängig von der Planungssituation sind die für das Wirtschaftlichkeitsmodell relevanten Daten zusammenzustellen und das Planungsziel zu fixieren. Abschließend sind die Eingangsgrößen in das Modell einzupflegen.

#### **Schritt 2: Szenariofeld-Analyse**

Der Kapitalwert des Planungsobjektes wird auf Basis ermittelter Planungsdaten berechnet. Anschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse vermittelt einen strukturellen Einblick in das zugrunde liegende Modell und die Darstellung der Einflüsse von Unsicherheiten (GÖTZE 2008, S. 375). Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden die einzelnen Einflussfaktoren gezielt variiert, wobei die Planungsdaten der weiteren Einflussfaktoren unverändert bleiben. Die Auswirkungen auf den Kapitalwert werden hierbei ermittelt. Bei der zeitgleichen Variation von mehreren Größen können Interpretationsschwierigkeiten die Folge sein (GÖTZE 2008, S. 375). Daher wird die Veränderung nur einer Einflussgröße als sinnvoll erachtet, um eine einfach nachvollziehbare Darstellung zu erhalten. Somit werden die Einflussfaktoren identifiziert, welche einen größeren Einfluss auf den Kapitalwert haben. Auf dieser Basis ist eine Rangfolge der wichtigsten Einflussfaktoren zu erstellen und die anwendungsfallspezifischen Schlüsselfaktoren auszuwählen. Eine maximale Anzahl an Schlüsselfaktoren kann an dieser Stelle nicht vorgegeben werden. Mit jedem zusätzlichen Schlüsselfaktor erhöhen sich der Aufwand und die Berechnungsdauer der weiteren Schritte überproportional, vgl. Schritt 4. Daher ist die Anzahl der Schlüsselfaktoren fallspezifisch zu wählen.

### **Schritt 3: Projektions-Entwicklung**

In der Projektions-Entwicklung sind die ermittelten Schlüsselfaktoren detailliert hinsichtlich möglicher Veränderungen zu untersuchen und zu analysieren. Dies sollte mit den notwendigen internen Ansprechpartnern bzw. im Dialog mit dem Kunden abgestimmt werden. Je Schlüsselfaktor sind mehrere Zukünfte zu entwickeln. Hierbei sollte das Ziel sein, nicht nur die aus heutiger Sicht realistischen Projektionen vorzudenken sondern bewusst Extrema einzubeziehen, um ein breites Spektrum an Zukünften zu betrachten (GAUSEMEIER ET AL. 1998). Eine Möglichkeit ist bspw. von drei Zukünften eines jeden Schlüsselfaktors auszugehen und zwar von einer äußerst positiven, von einer äußerst pessimistischen und einer wahrscheinlichen Entwicklung (ERMSCHEL ET AL. 2011, S. 75; KLEMKE 2014, S. 67). Im Szenario-Management sind zwei bis vier Zukunftsprojektionen je Schlüsselfaktor die Regel (GAUSEMEIER & PLASS 2014, S. 58).

### **Schritt 4: Szenario-Bildung**

Die schlüsselfaktorbezogenen Zukünfte werden zu einzelnen konsistenten Szenarien zusammengefasst. Bei einer restriktiv ausgewählten Anzahl von Schlüsselfaktoren und Zukunftsprojektionen können die sonst üblichen zeitaufwendigen Zwischenschritte der Szenario-Bildung entfallen. Diese Zwischenschritte, z. B. Ermittlung der Projektionsbündel oder Konsistenzprüfung, sind bei einem umfassenderen Planungsprojekt elementar und hierfür kommen spezielle Softwarelösungen zum Einsatz, vgl. (GAUSEMEIER & PLASS 2014, S. 74 f.).

## **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

Im Rahmen dieser entwickelten Variante der Szenariotechnik wird es als zielführend erachtet, wenn diese Zwischenschritte durch eine anwendungsfallspezifisch reduzierte Anzahl der Schlüsselfaktoren erreicht wird, vgl. Schritt 2. Für die einzelnen Szenarien sind die jeweiligen Kapitalwerte zu ermitteln. Anschließend sind die Veränderungen der Kapitalwerte zu analysieren. Die Durchführung einer Auswirkungsanalyse gibt bei dem Vergleich mehrerer Maschinenalternativen Auskunft darüber, welche Variante bei welchem Szenario die wirtschaftlichste Lösung ist. Hiermit kann auf Basis der Wirtschaftlichkeit eine zukunftsrobuste Maschinenauswahl getroffen werden. Die Auswirkungen für die Maschinenentwicklung werden im folgenden fünften Schritt ermittelt.

### **Schritt 5: Szenario-Transfer**

Der Szenario-Transfer ist sowohl von der im ersten Arbeitsschritt definierten Zielsetzung als auch von den erarbeiteten Erkenntnissen der Auswirkungsanalyse abhängig. Die Bewertung von alternativen Maschinen wurde bereits erwähnt. Diese beschränkt sich nicht nur auf eigene Maschinenvarianten sondern kann auch im Vergleich zu den Maschinen der Marktbegleiter gesehen werden. Für die Ableitung von Anforderungen und Rahmenbedingungen im Hinblick auf die Formatflexibilität kann wiederum das Wirtschaftlichkeitsmodell eingesetzt werden. Dies entspricht daher einer Zielkostenrechnung (engl. Target Costing). Die Entwicklung und Fertigung von marktgerechten Produkten im Hinblick auf die Leistungsmerkmale und Kosten ist das Ziel der Zielkostenrechnung (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 143). Nachfolgend werden beispielhafte Fragen aufgezeigt:

- Wie viel schneller muss ein Formatwechsel hinsichtlich Maschinenstillstandszeit werden, um die Ziel-Wirtschaftlichkeit zu erreichen?
- Wie viel darf der Investitionsbedarf einer flexibleren Maschine, welche einen schnelleren Formatwechsel ermöglicht, steigen?
- Wie viel darf eine automatisiertere Maschine mehr kosten, wenn der Formatwechsel ohne Rüstpersonal durchgeführt werden kann?
- Welche Rüstzeit muss erreicht werden, um mit einem höheren Automatisierungsgrad, der den Investitionsbedarf steigert, wirtschaftlicher zu sein?

Anhand dieser Fragestellungen können für die nachfolgende Entwicklung die maßgeblichen Rahmenbedingungen und Anforderungen im Hinblick der Formatflexibilität anhand einer wirtschaftlich fundierten Betrachtung abgeleitet werden.



### 4.5.3 Zusammenfassung und Integration in das Gesamtkonzept

Der Methodenbaustein Szenario-Steckbrief stellt bereits in der frühen Phase einer Entwicklung eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dar und ermöglicht somit einen zielgeleiteten Entwicklungsprozess. Der Einsatz des Methodenbausteins ist in der Phase Produktplanung und Aufgabenklärung angedacht, vgl. Abbildung 24.

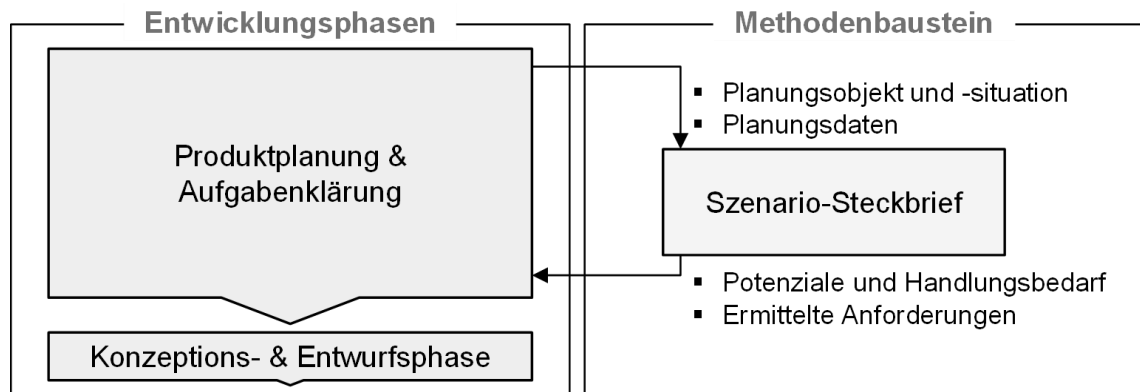


Abbildung 24: Integration des Methodenbausteins Szenario-Steckbrief in die Phase Produktplanung und Aufgabenklärung

Als Eingangsinformationen werden die Beschreibung des Planungsobjektes und der -situation sowie die Planungsdaten benötigt. Das Ergebnis, welches im Anschluss in den weiteren Aktivitäten der Produktplanung und Aufgabenklärung genutzt werden, sind die Potenziale und die Handlungsfelder, die mit einer Steigerung der Formatflexibilität verbunden sind. Ferner stehen die Anforderungen an die vorliegende Entwicklungsaufgabe zur Verfügung. Das Wirtschaftlichkeits- in Kombination mit dem Vorgehensmodell ist auch für eine Alternativenbewertung in weiteren Phasen einer Entwicklung geeignet. Der Einsatz des Vorgehensmodells führt zu einer strukturierten, nachvollziehbaren und reproduzierbaren Arbeitsweise.

## 4.6 Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs

Dieser Methodenbaustein thematisiert den Handlungsbedarf einer systematisierten Ermittlung der Flexibilitätsbedarfe und die Nutzung der Potenziale in der Konzeptphase. Die herzustellenden Packungen, die von der zu entwickelnden Verpackungsmaschine zu produzieren sind, repräsentieren Anforderungen. In der anschließenden Phase wird anhand von Maschinenkonzepten die grundlegende Struktur des zu entwickelnden technischen Systems erarbeitet.

## **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

Diese Phase umfasst u. a. den zweiten und dritten Arbeitsschritt des Vorgehensmodells der VDI-Richtlinie 2221. Dies sind die Bestimmung der Gesamtfunktion sowie die Ermittlung von Teilfunktionen und die Funktionsstrukturen (VDI 2222-1). Im dritten Arbeitsschritt sind die Lösungsprinzipien zu suchen und auszuwählen (VDI 2222-1). In der industriellen Praxis wird der Trend zu einer Vernachlässigung der Konzeptphase gesehen (SCHÄPPI ET AL. 2005, S. 165). Daher läuft die Konzeptphase bspw. undokumentiert ab (SCHÄPPI ET AL. 2005, S. 304). Da Neuentwicklungen bei Verarbeitungs- und Verpackungsmaschinen häufig notwendig sind, wird der Anteil und die Bedeutung der Konzeptphase im Vergleich zu anderen Branchen als höher eingeschätzt (MAJSCHAK 1996, S. 10 f.). Aus diesen Gründen soll der Konzeption ein höherer Stellenwert für die Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen beigemessen werden.

Mit diesem Methodenbaustein ist eine Möglichkeit zu schaffen, beginnend mit der Angabe der herzustellenden Packungen, strukturiert ein Maschinenkonzept für eine formatflexible Verpackungsmaschine abzuleiten. Ein Teilelement ist die Ermittlung des Formatbereichs anhand der Anforderungen. Ferner sind die Auswirkungen auf das Maschinenkonzept aufzuzeigen. Die Potenziale in der Konzeptionierung des Gesamtsystems sind strukturiert zu erfassen. Dies hat in einer dokumentierten und somit nachvollziehbaren Weise zu erfolgen. Im folgenden Abschnitt 4.6.1 werden die Grundannahmen und die Gesamtstruktur des Vorgehensmodells dargestellt. Die Detaillierung des Vorgehensmodells folgt in Abschnitt 4.6.2 und in Abschnitt 4.6.3 werden die Erkenntnisse zusammengefasst.

### **4.6.1 Grundannahmen und Gesamtstruktur**

Zunächst wird das Produkt-Prozess-Ressourcen-Modell vorgestellt, das anschließend auf die Entwicklung einer formatflexiblen Verpackungsmaschine übertragen wird. Im Anschluss folgt die Gesamtstruktur des Vorgehensmodells.

### **Formatflexibilität aus Sicht des Produkt-Prozess-Ressourcen-Modells**

Das Produkt-Prozess-Ressourcen-Modell (PPR-Modell) ist ein aus der Notwendigkeit einer elektronischen Beschreibung aller Planungsdaten entstandenes Konzept der Digitalen Fabrik, welches sich in der Praxis bewährt hat (DRAHT 2010, S. 83). Ein Einsatzgebiet stellt die rechnergestützte Produktionsplanung dar (u. a. SCHACK 2007, FELDMANN ET AL. 2008). Dieses Modell unterteilt die Zusammenhänge einer Produktion in die drei Teilsegmente Produkt, Prozess und Ressource (DRAHT 2010, S. 83 f.).

Für SCHACK (2007, S. 88) stellen diese Segmente Objektklassen für Informationen in der Produktionsplanung dar. Beispiele für Produktinformationen sind Toleranzen sowie für Prozessinformationen sind es Arbeitspläne (SCHACK 2007, S. 88). Ressourceninformationen sind z. B. Angaben zum Fertigungsmitteltyp (FELDMANN ET AL. 2008). Dieses Modell kann für eine Interpretation des Entwicklungszieles Formatflexibilität bei Verpackungsmaschinen genutzt werden, vgl. Abbildung 25. Die Aspekte der Formatflexibilität äußern sich in allen Teilmodellen und werden nachfolgend skizziert.

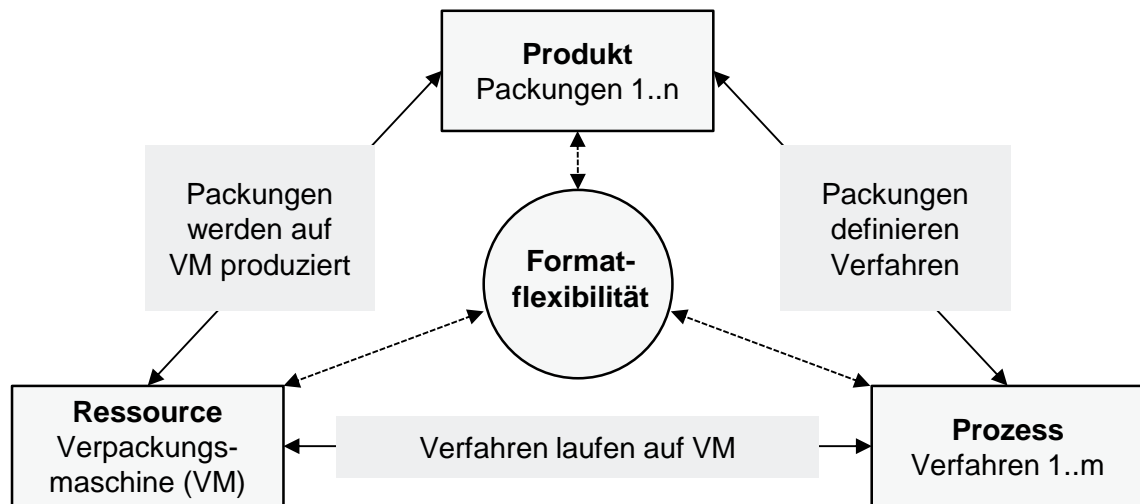


Abbildung 25: Interpretation des Produkt-Prozess-Ressourcen-Modells in Anlehnung an DRAHT (2010, S. 84) im Hinblick auf die Formatflexibilität einer Verpackungsmaschine

Die Vielzahl an herzustellenden Packungsvarianten ist die Produktsicht. Mehrere Verarbeitungsverfahren repräsentieren die Prozesssicht und die Verpackungsmaschine ist die Ressourcensicht, die technisch die Verarbeitungsverfahren abbildet und somit die Herstellung der Packungsvarianten ermöglicht. Mit der Definition der Packungsvarianten wird eine Vielzahl von Eigenschaften festgelegt, z. B. geometrische Abmessungen oder die Verarbeitungseigenschaften. Die Gesamtheit der Veränderungsmerkmale in Form dieser diversen Eigenschaften spannt im Hinblick auf die Formatflexibilität den Formatbereich auf, welcher von den ausgewählten Prozessen und den zu entwickelnden Ressourcen abzubilden ist.

Der Verpackungsprozess wird durch einzelne Verpackungsvorgänge beschrieben, welche technologisch durch mehrere Verarbeitungsvorgänge ausgeführt werden (BLEISCH ET AL. 2011, S. 172). Für die Realisierung der Verarbeitungsvorgänge bzw. -verfahren sind wiederum die Verarbeitungseigenschaften der Verarbeitungsgüter entscheidend. Die Verpackungsmaterialien und das Packgut sind in Verpackungsmaschinen die Verarbeitungsgüter, vgl. Abschnitt 2.2.

#### **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

Die einzelnen Verarbeitungsverfahren weisen Verfahrensgrenzen auf, z. B. hinsichtlich des zu verarbeitenden Werkstoffs, sodass verfahrensspezifische Restriktionen einen Einfluss auf die Formatflexibilität und insbesondere auf den Formatbereich haben. Die Verpackungsmaschine bildet physisch die Verarbeitungsverfahren ab. Die für eine Realisierung der Maschine notwendige Auslegung und Dimensionierung verursachen weitere Restriktionen hinsichtlich der Formatflexibilität. Diese sind bspw. geometrische Restriktionen im Sinne eines geometrischen Formatbereiches, wie dieser von BLEISCH ET AL. (2011, S. 262) benannt wird. Aber auch die maximalen Prozessparameter werden festgelegt. Zum Beispiel bestimmt die Auslegung eines Hubwerkes einer Thermoformverpackungsmaschine die maximalen Formdrücke bzw. Trennkräfte einer solchen Einheit. Diese Ausführungen zeigen auf, dass der Formatflexibilitätsbedarf durch die herzustellenden Produkte sowie deren Eigenschaften generiert wird und sowohl für die Prozesse als auch für die Ressourcen Restriktionen darstellen. Im Hinblick auf die Formatflexibilität ist somit nicht ausschließlich entscheidend, dass der Zustandswechsel in Form der Zeit- und Kostendimension in einer ausreichenden Güte betrachtet wird. Auch die Fähigkeit einer Verpackungsmaschine und den zugehörigen Verarbeitungsverfahren, die Packungsvielfalt herstellen zu können, ist entscheidend. Dieser wird im Folgenden als Formatbereich einer Verpackungsmaschine bezeichnet und soll nicht nur die geometrischen, sondern auch die verarbeitungstechnischen Aspekte berücksichtigen.

Der Methodenbaustein basiert auf folgenden Annahmen. Für die grundsätzliche Fähigkeit einer Verpackungsmaschine eine Vielzahl von Packungen herstellen zu können, ist der Formatbereich entscheidend. Der Formatbereich ist die Summe aller auf die unterschiedlichen Veränderungsmerkmale bezogenen Flexibilitätskorridore. Bei fehlender Berücksichtigung bzw. unzureichender Dimensionierung können nicht alle Produktvarianten gefertigt werden und ein aufwendiger Rekonfigurationsvorgang wird nötig. Die für einen Formatwechsel notwendige Zustandsänderung der gesamten Ressource, welche sich als Reibungsverlust in Form von Kosten bzw. Zeit äußert, bezieht sich auf die einzelnen Veränderungsmerkmale einer Verpackungsmaschine. Aufgrund der Konzeptphase wird eine auf die Funktion bezogene und abstrahierte Sichtweise eingenommen. Die Gliederung in die drei Teilmodelle des PPR-Modells soll beibehalten werden.

#### **Gesamtstruktur des Vorgehensmodells**

Die Struktur des Vorgehensmodells orientiert sich an den Teilmodellen/-sichten des PPR-Modells und ist in vier Schritte untergliedert, vgl. Abbildung 26.

## 4.6 Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs

<u>Schritte</u>	<u>Aufgaben</u>	<u>Sicht</u>
Modellierung der Packungsvarianten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Beschreibung der Packungsvarianten</li> <li>▪ Ermittlung der variantenbezogenen Formatbereiche</li> </ul>	<b>Produkt</b>
Ermittlung der prozessspezifischen Formatbereiche	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Funktionsstruktur und die spezifischen Formatbereiche</li> <li>▪ Prozessstruktur und die spezifischen Formatbereiche</li> </ul>	<b>Funktion &amp; Prozess</b>
Erstellen von Systemkonfigurationen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ableiten von Systemkonfigurationen</li> <li>▪ Generierung von alternativen Systemkonfigurationen</li> </ul>	<b>Ressource</b>
Bewertung und Auswahl	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewertung der Alternativen</li> <li>▪ Auswahl und Ableiten von Entwicklungspotenzialen</li> </ul>	

*Abbildung 26: Vorgehensmodell des Methodenbausteins Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs*

Mithilfe des Vorgehensmodells wird eine strukturierte Konzeption einer Verpackungsmaschine im Hinblick auf die Zielgröße der Formatflexibilität gewährleistet. Den gestalterischen Kern des Vorgehensmodells bildet der dritte Schritt. Die Schritte 1 und 2 erarbeiten das benötigte Wissen in Form der Formatbereiche. Deren Bedeutung steigt mit einer zunehmenden Packungsvielfalt und Heterogenität. Der vierte Schritt umfasst die Bewertung und Auswahl. Das Vorgehensmodell kann für Kundenprojekte für die konzeptionelle Konfiguration einer Verpackungsmaschine eingesetzt werden sowie in der Produktplanung für die Identifikation von Entwicklungspotenzialen im Hinblick auf die Formatflexibilität. Außerdem werden alle drei Dimensionen der Formatflexibilität thematisiert. Die Zustandsdimension wird anhand der Auswahl der Formatbereiche berücksichtigt. Die Dimensionen Zeit und Kosten kommen insbesondere bei der Entwicklung von formatflexiblen Maschinenkonzepten zum Tragen.

### 4.6.2 Detaillierung des Vorgehensmodells

#### Schritt 1: Modellierung der Packungsvarianten

Als Eingangsinformationen werden die herzustellenden Packungen benötigt, die der Produktsicht des PPR-Modells entsprechen. Diese sind die Untersuchungsobjekte für die Modellierung und die Beschreibung der Packungsvarianten.

## **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

### *Modellierung der Untersuchungsobjekte & Beschreibung der Packungsvarianten*

Im Rahmen der Modellierung werden den Packungen und deren hierarchisch strukturierbaren Bestandteilen Attribute zugeordnet. Daher sollen sowohl die aktuell geplanten als auch die zukünftigen Packungen in die Betrachtung einbezogen werden. Die einzelnen Attribute sind sehr vielfältig, z. B. geometrische Eigenschaften, Verarbeitungszustände, Verarbeitungsverhalten. Diese Attribute können teilweise unmittelbar aus der Produktsicht abgeleitet werden. Allerdings ist eine ausreichend genaue Beschreibung erst durch die spätere Erweiterung um die Prozesssicht möglich, z. B. bei Verarbeitungseigenschaften die vom jeweiligen Verfahren abhängig sind. Auch die einzelnen Verpackungsstufen, z. B. Primär- und Sekundärpackung, können durch die hierarchische Struktur abgebildet werden. Dies entspricht somit der Produktstruktur der Packung. Ein großer Vorteil dieser strukturierten Beschreibung ist die Allgemeingültigkeit, da keine aufwendige Anpassung an den jeweiligen Anwendungsfall notwendig ist. Ein Aufbau eines Attributenkatalogs für bestimmte Packungstypen ist damit möglich. Der Detaillierungsgrad dieser Modellierung ist fallspezifisch zu wählen. Dies soll das folgende Beispiel verdeutlichen. Aus der geometrischen Beschreibung einer Packung und den Qualitätsanforderungen ist bekannt, dass die Schnittkanten keine spitzen und scharfkantigen Stellen aufweisen dürfen. In der folgenden Prozess- und Ressourcensicht führt ein Fehlen dieser Information dazu, dass ggf. der Komplettschnitt ausgeschlossen wird. Dieser verursacht einen höheren Investitionsbedarf und hat ein niedrigeres Niveau an Formatflexibilität als Werkzeugsysteme für einen sequenziellen Schnitt, u. a. Rollenmesser.

Die Produktstruktur in Kombination mit den Attributen wird im Folgenden zusammengefasst als Packungsstruktur bezeichnet. Anschließend werden die Packungsvarianten anhand dieser Attribute beschrieben. Für eine Standardisierung und Vereinfachung der Schritte 1 und 2 ist ein matrixbasiertes Hilfsmittel vorgesehen, vgl. Abbildung 27. Matrixbasierte Hilfsmittel für das Abbilden von Varianten auf Strukturen werden auch von anderen Autoren genutzt (u. a. NEUHAUSEN 2001, SCHUH ET AL. 2004a, SCHUH ET AL. 2004b, REIK ET AL. 2005, REIK ET AL. 2006b, OWEN ET AL. 2011). Somit ist dies ein zielführender Ansatz für die Visualisierung, der aufwandsarm adaptiert und erweitert werden kann.

### *Ermittlung des benötigten Formatbereichs*

Zunächst sind die Attribute der einzelnen Varianten zu konsistenten Merkmalsbündeln bzw. -korridore, bspw. räumliche Abmessungen, zusammenzufassen. Ferner wird die Häufigkeit der unterschiedlichen Ausprägungen eines jeden

## 4.6 Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs

Attributes mit dem matrixbasierten Hilfsmittel erfasst. Dies wird als Indikator für die Häufigkeit einer notwendigen Zustandsänderung interpretiert. Auch besteht die Möglichkeit, diese Angaben zur Häufigkeit aus vorliegenden Produktionsprogrammplanungen abzuleiten.

Packungsstruktur	Varianten					Verpackungsmaschine (Funktions- bzw. Prozessstruktur)			
	#1	#2	...	#n	MK	F/P 1	F/P 2	...	F/P k
<b>Packung</b>									
Attribut 1									
Attribut m									
→ <b>Packgut</b>	Schritt 1: Modellierung der Packungsvarianten					Schritt 2: Ermittlung der prozessspezifischen Formatbereiche			
Attribut 1									
Attribut o									
→ <b>Verpackung</b>									
Attribut 1									
Attribut p									
→ <b>Packmittel</b>									
Attribut 1									
Attribut q									

Legende:

MK: Merkmalskorridor

F: Funktion

P: Prozess

Abbildung 27: Matrixbasiertes Hilfsmittel für die Schritte 1 und 2

Somit stehen nach dem Schritt 1 diese Informationen zur Verfügung: die Packungsstruktur, die zugehörigen Attribute, die attributspezifischen Merkmalskorridore und die Häufigkeit der Änderung einer Ausprägung eines Attributes.

### Schritt 2: Ermittlung der prozessspezifischen Formatbereiche

Dieser Schritt adressiert die Prozesssicht des PPR-Modells. Allerdings werden nicht unmittelbar die möglichen Prozesse ausgewählt. Zuerst wird eine lösungsneutrale Funktionssicht generiert. Für die Sicherstellung eines strukturierten Auswahlprozesses wird die lösungsneutrale und funktionsorientierte Struktur ermittelt und dann eine prozess- und verarbeitungsorientierte Struktur abgeleitet.

#### Ableitung der Funktionsstruktur & der funktionsspezifischen Formatbereiche

Aus der ermittelten Packungsstruktur wird die Funktionsstruktur für deren Herstellung bestimmt. Die einzelnen Funktionen dieser Struktur sind unabhängig vom Verarbeitungsprozess zu formulieren. Die lösungsneutrale und funktions-

## **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

orientierte Struktur ist angelehnt an die Beschreibung des Verpackungsprozesses und die einzelnen Verpackungsvorgänge. Dieser Schritt ist notwendig, um einer Funktion den abzubildenden Formatbereich zuordnen zu können. Daher sollte die Ableitung der Funktionsstruktur nicht vernachlässigt und die Prozessstruktur nicht direkt abgeleitet werden. Dieser Schritt beinhaltet auch die Ergänzung der Packungsstruktur um weitere Attribute, die mit der Funktionsstruktur zusammenhängen. Dies kann wiederum mithilfe der in Abbildung 27 dargestellten Matrixstruktur erfolgen. Abschließend sind die funktionspezifischen Formatkorridore abzuleiten.

### *Ermittlung der Prozessstruktur & der prozessspezifischen Formatbereiche*

Auf Basis der Funktionsstruktur und der zugehörigen funktionspezifischen Formatbereiche sind potenzielle Prozesse für die Umsetzung der einzelnen Funktionen abzuleiten. Zum Beispiel sind der Funktion stoffschlüssiges Verschließen Verarbeitungsverfahren, wie das dauerbeheizte Wärmekontaktverfahren, zuzuordnen. Eine weitere Notwendigkeit ist die Ergänzung der Packungsstruktur um die prozessspezifischen Attribute, z. B. die Siegelamplituden, -zeiten und -drücke beim Ultraschallverfahren. Die Ermittlung von Prozessparametern, wie bspw. Siegeltemperatur, kann auf Basis von Datenblättern, Erfahrungswerten, Vorversuchen oder Simulationen erfolgen. Ferner sind anhand der Prozessstruktur und der funktionspezifischen Formatbereiche die prozessspezifischen Formatbereiche zu ermitteln. Können keine Prozesse ermittelt werden, welche die gestellten Anforderungen erfüllen, so ist die Rücksprache mit dem Kunden bzw. der Produktplanung notwendig. Dann ist gemeinsam eine Lösung zu finden, z. B. Anpassung der Anforderungen bzw. Nutzung des Methodenbausteins Funktionspool für die Entwicklung von flexibleren Verfahren.

### **Schritt 3: Erstellen von Systemkonfigurationen**

Nach der Produkt- und der Prozesssicht folgt im dritten Schritt die Transformation in die Ressourcensicht. Hierfür werden Systemkonfigurationen abgeleitet und Alternativen hinsichtlich der Formatflexibilität generiert.

### *Ableiten von Systemkonfigurationen*

Den identifizierten Prozessen werden mögliche Ressourceneinheiten zugeordnet. Im Sinne einer effizienten und zeitlich limitierten Entwicklung ist grundsätzlich die Nutzung von bereits entwickelten Teilsystemen einer Neuentwicklung vorzuziehen (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 482). Bei diesem Schritt sind wiederum die Anforderungen im Hinblick auf die ermittelten Formatkorridore zu beachten.



## 4.6 Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs

Die Bezeichnung Ressourceneinheit wird in Abgrenzung zu den Begrifflichkeiten Baugruppe und Modul gewählt. Eine Ressourceneinheit kann eine Baugruppe sein, welche die von KIPP (2012, S. 24) beschriebenen graduellen Eigenschaften eines Moduls erfüllt, z. B. Schnittstellenstandardisierung. Jedoch muss dies von einer Ressourceneinheit nicht unbedingt erfüllt werden. Da die Modularisierung außerhalb des hiesigen Betrachtungsbereiches liegt, wird im weiteren Verlauf die Begrifflichkeit Ressourceneinheit verwendet. Die Auswahl der Ressourceneinheiten anhand der Prozessstruktur und den prozessspezifischen Formatbereichen stellt hierbei keine 1:1-Beziehung dar. Dies soll anhand von beispielhaften Zusammenhängen verdeutlicht werden. Eine Ressourceneinheit kann bspw. mehrere Prozesse ausführen. Zudem können für die anlagentechnische Umsetzung eines Prozesses aufgrund des spezifischen Formatbereichs mehrere Ressourceneinheiten benötigt werden. Ein mögliches Zwischenergebnis ist an dieser Stelle die Detektion von neu zu entwickelnden Ressourceneinheiten, falls ein Zusammenstellen von bereits vorhandenen Einheiten nicht ausreichend ist. Dies äußert sich darin, dass eine Merkmalsausprägung des notwendigen Formatbereiches von den vorhandenen Ressourceneinheiten nicht bereitgestellt wird. Auf dieser Basis werden mögliche Systemkonfigurationen grafisch dargestellt. Hierfür werden drei Grundelemente eingeführt, vgl. Abbildung 28. Diese beziehen sich auf eine Ressourceneinheit und deren Möglichkeit, einen Formatwechsel zu realisieren.

Kriterien Grundelement	Reibungsverlust		Investitions- bedarf	Symbol
	MSZ	PRZ		
Rüstloser Formatwechsel	0	0	niedrig/mittel <sup>1</sup>	
Externes Rüsten	niedrig <sup>1</sup>	mittel <sup>1,2</sup>	mittel/hoch <sup>1,2</sup>	
Internes Rüsten	hoch <sup>1</sup>	hoch <sup>1,2</sup>	niedrig/mittel <sup>1,2</sup>	

Legende/Abkürzungen:

MSZ: Maschinenstillstandszeit

PRZ: Personalarüstzeit

<sup>1</sup>: qualitativer Vergleich

<sup>2</sup>: abhängig vom Automatisierungsgrad

Abbildung 28: Grundelemente für die maschinentechnische Umsetzung eines Formatwechsels

## 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

---

Die Realisierung eines *rüstlosen Formatwechsels* ist der Idealzustand. Dies ist der Fall, wenn keine Rüstzeiten, d. h. keine Maschinenstillstands- und keine Personalrüstzeiten und somit keine operativen Rüstkosten anfallen. Der Investitionsbedarf für eine solche Funktionseinheit könnte allerdings im Vergleich zu den anderen Grundelementen höher sein, da bspw. aufwendigere und daher teurere Verfahren eingesetzt werden.

Das *externe Rüsten* bezieht sich auf das Externalisieren des Rüstens der gesamten Funktionseinheit und nicht nur auf einzelne Rüsttätigkeiten. Hierfür stellen Palettenwechselsysteme ein Beispiel aus dem Bereich der Werkzeugmaschinen dar, vgl. Abschnitt 3.3.1. Die Auswirkung auf das Maschinensystem ist eine fast vollständige Minimierung der Maschinenstillstandszeit, da ausschließlich das Einwechseln des bereits vorbereiteten Systems intern stattfindet. Der Investitionsbedarf wird aufgrund des zusätzlichen Aufwands höher sein, u. a. mehr Systemkomponenten, als eine Funktionseinheit die intern umgerüstet wird. Der externe Rüstprozess kann manuell und automatisiert erfolgen. Eine Automatisierung kann zusätzlich zu einer Steigerung des höheren Investitionsbedarfs führen.

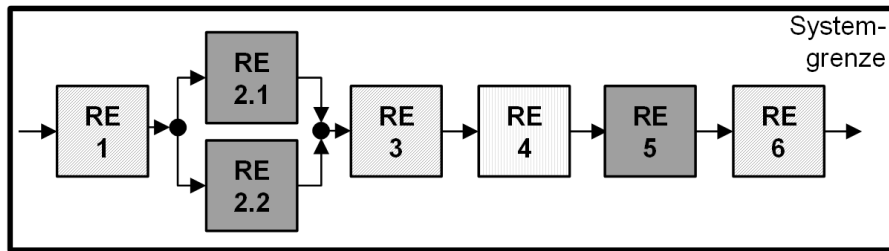
Das Grundelement *internes Rüsten* beschreibt den gängigsten Weg, den Formatwechsel bei Verpackungsmaschinen zu realisieren. Hierbei ist für die Durchführung von Rüsttätigkeiten ein Maschinenstillstand nötig. Einige Rüsttätigkeiten sind externalisiert. Der überwiegende Anteil wird noch intern durchgeführt. Die Rüsttätigkeiten können wiederum manuell oder automatisiert durchgeführt werden. Da auch ein automatisierter Rüstvorgang nicht den Maschinenstillstand eliminiert, vgl. Beispiele in Abschnitt 3.3, ist dies weiterhin ein internes Rüsten. Beispiele für die Visualisierung von Systemkonfigurationen anhand der drei Grundelemente sind in Abbildung 29 dargestellt.

### *Generierung von alternativen Systemkonfigurationen*

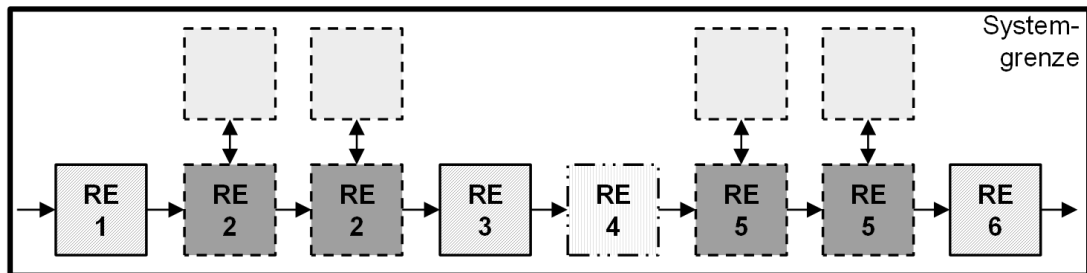
Während im vorherigen Teilschritt ausschließlich bereits entwickelte Ressourceneinheiten berücksichtigt wurden, werden im Folgenden alternative Systemkonfigurationen entwickelt. Hier werden die Angabe zur Häufigkeit eines Formatwechsels und die Überprüfung der Notwendigkeit eines Rüstvorgangs benötigt. Die Grundelemente und deren Abstraktionsniveau dienen als Mittel zur Kreativitätssteigerung und für das Ermitteln von Potenzialen. Abschließend sind alternative Systemkonfigurationen zusammengestellt, vgl. Abbildung 29.

## 4.6 Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs

**Systemkonfiguration 1:** Alle Ressourceneinheiten sind intern zu rüsten. Die Ressourceneinheiten 2.1 und 2.2 sind parallel geschaltet und decken zusammen den notwendigen Formatbereich ab.



**Variante der Systemkonfiguration 1:** u. a. die Ressourceneinheiten 2.1 und 2.2 werden zusammengefasst und zwei extern umrüstbare Einheiten in Reihe geschaltet.



Legende:

- |  |   |
|--|---|
| RE: Ressourceneinheit  | <input type="checkbox"/> niedriger Formatflexibilitätsbedarf        |
| <input type="checkbox"/> mittlerer Formatflexibilitätsbedarf | <input checked="" type="checkbox"/> hoher Formatflexibilitätsbedarf |

Abbildung 29: Beispielhafte Systemkonfiguration mit einer vereinfachten Analyse der Häufigkeit eines Formatwechsels und einer Variantenbildung mithilfe der Grundelemente

### Schritt 4: Bewertung und Auswahl

Im letzten Schritt werden die Systemkonfigurationen bewertet und eine Auswahl getroffen. Für die wirtschaftliche Bewertung ist das im Methodenbaustein Szenario-Steckbrief vorgestellte Wirtschaftlichkeitsmodell zusammen mit dem Vorgehensmodell angedacht. Hiermit kann die wirtschaftliche Dimension einer multi-kriteriellen Bewertung repräsentiert werden. Bei der Auswahl sind zwei Fälle zu unterscheiden. Bei einem Kundenprojekt wird die für den Kunden beste Systemkonfiguration ausgewählt. Im Rahmen einer internen Produktplanung werden aus den ermittelten Potenzialen zukünftige Entwicklungsprojekte als Vorleistung initiiert, um z. B. eine extern rüstbare Ressourceneinheit zu entwickeln. Ferner werden Bedarfe an flexibleren Verfahren offenkundig. Solche Verfahren können mit dem Methodenbaustein Funktionspool ermittelt und entwickelt werden.

## 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

### 4.6.3 Zusammenfassung und Integration in das Gesamtkonzept

Für die Konzept- und Entwurfsphase einer Verpackungsmaschine stellt der Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs eine Unterstützung dar, vgl. Abbildung 30. Dies erfolgt anhand eines strukturierten Vorgehens, welches sich an das PPR-Modell anlehnt und somit auch für eine Digitalisierung des Vorgehens genutzt werden kann. Als Eingangsinformationen werden die Packungsvarianten und die vorhandenen Ressourceneinheiten benötigt. Das Ergebnis des Methodenbausteins sind bewertete Systemkonfigurationen. Im Rahmen von Kundenprojekten wird die am besten geeignete Systemkonfiguration ausgewählt. Auch können anhand der Systemkonfigurationen Potenziale für die Entwicklung von weiteren Ressourceneinheiten oder Verfahren identifiziert werden.

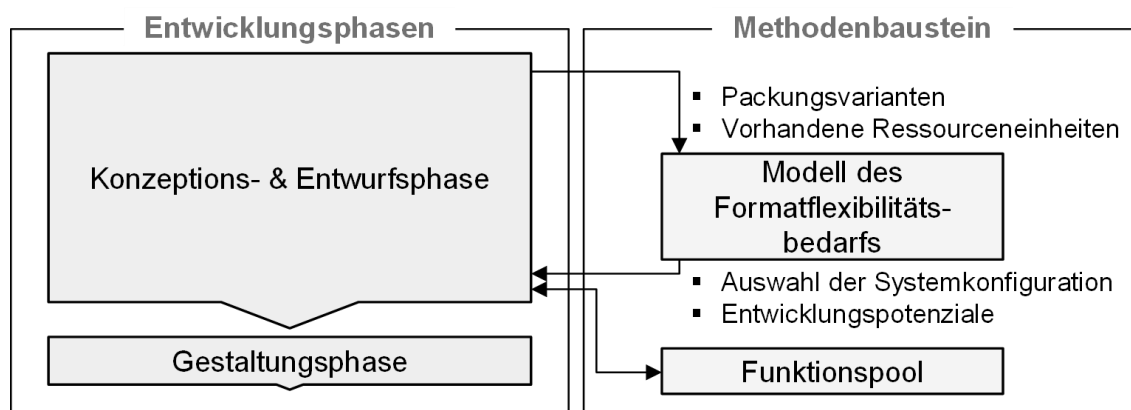


Abbildung 30: Integration des Methodenbausteins Modell des Formatflexibilitätsbedarfs in die Phase Konzeption und Entwurf

### 4.7 Methodenbaustein Funktionspool

Ein weiteres Handlungsfeld ist der Einsatz von Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität. Der Funktionspool adressiert dieses Handlungsfeld. Eine Funktion „(...) ist der allgemeine und gewollte Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang eines Systems mit dem Ziel, eine Aufgabe zu erfüllen (...)“ (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 242). Eine hierarchische Sichtweise ermöglicht die Gesamtfunktion eines Systems in einzelne Teilfunktionen zu zerlegen (CONRAD 2013, S. 61). Für die Erfüllung der für die Produktion entscheidenden Hauptfunktionen werden Verfahren eingesetzt. Bei einer Verarbeitungsmaschine sind dies die Verarbeitungsverfahren, vgl. Abschnitt 2.2. Da die funktionale Sichtweise der Entwicklung eingenommen werden soll, wird dieser Methodenbaustein als Funktionspool bezeichnet, wobei dieser technologisch gesehen Verfahren adressiert. Unter einem Verfahren wird im Folgenden das Verständnis

über die physikalischen Zusammenhänge verstanden, um aus dem Eingangs- den definierten Ausgangszustand zu erzeugen. Dies umfasst auch die zugehörige anlagentechnische Ausrüstung um diese physikalische Wirkung für die Herstellung von physischen Gütern einsetzen zu können. Aus dem Blickwinkel der Entwicklung ist dies grundsätzlich ein Wirkprinzip. Ein Wirkprinzip setzt sich aus dem physikalischen Effekt sowie den geometrischen und stofflichen Merkmalen zusammen (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 246 ff.).

Die Suche und Auswahl von Lösungsprinzipien für das Realisieren der einzelnen Funktionen einer Verpackungsmaschine ist Bestandteil der Konzeptphase. Im Gegensatz zum Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs ist der Fokus nicht die Auswahl sondern die Suche und die Bereitstellung von Verarbeitungsverfahren als entscheidende funktionelle Bausteine des Verarbeitungssystems. Der Einsatz von Verarbeitungsverfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität stellt ein Potenzial dar, um die Flexibilität des Verarbeitungssystems und somit die Formatflexibilität der gesamten Verpackungsmaschine zu steigern. Das Potenzial solcher Verfahren ist im Verpackungsmaschinenbau unzureichend genutzt. Falls die Potenziale ungenutzt bleiben, erschwert dies die folgenden Schritte um die Flexibilitätsziele zu erreichen.

Der Methodenbaustein Funktionspool zielt darauf ab, durch die Zuordnung eines inhärent flexiblen Verfahrens zu einer Funktion einer Verpackungsmaschine deren Formatflexibilität zu steigern. Den Aspekt der inhärenten Flexibilität greift auch MATTHEWS (2007) auf und untersucht kinematische Ketten auf deren Potenzial zusätzliche Produkte ohne Veränderungen an der mechanischen Struktur zu verarbeiten. Für eine Auswahlmöglichkeit im Entwicklungsprozess sind allerdings zunächst Alternativen zu generieren. Die Generierung von Lösungsalternativen ist daher der Kern dieses Methodenbausteins, wohingegen im Rahmen des Methodenbausteins Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs, vgl. Abschnitt 4.6, aus vorhandenen und abgesicherten Lösungsalternativen ausgewählt wird. Für die Bereitstellung von Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität wird im Rahmen dieser Arbeit ein methodisches Vorgehen vorgeschlagen sowie für ausgewählte Funktionen eine Suche nach alternativen Verfahren durchgeführt. In Abschnitt 4.7.1 werden zunächst die dem Funktionspool zugrunde liegenden Sachverhalte und Sichtweisen dargelegt. Anschließend wird ein aus dem Technologiemanagement abgeleitetes Vorgehensmodell detailliert (Abschnitt 4.7.2). In Kapitel 5 wird für ausgewählte Funktionen das verfahrenseitige Potenzial zur Steigerung der Formatflexibilität untersucht.

## **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

### **4.7.1 Grundannahmen und Gesamtstruktur**

Im Rahmen dieses Abschnittes wird eine charakterisierende Beschreibung der inhärenten Flexibilität als Eigenschaft eines Verfahrens dargelegt. Anschließend wird der Funktionspool als Schnittstelle zwischen der Technologie- und Produktentwicklung interpretiert und die Gesamtstruktur des Vorgehens eingeführt.

#### **Beschreibung der Verfahreneigenschaft der inhärenten Flexibilität**

Ein jedes Verfahren weist einen gewissen Grad an inhärenter Flexibilität auf. Es ist entscheidend, dass der benötigte Formatbereich und die damit verbundenen Veränderungsmerkmale abgedeckt werden. Somit ist für eine quantitative Bewertung ein konkretisierter Flexibilitätsbedarf notwendig. Für einen qualitativen Vergleich von Verfahren wird nachfolgend die Verfahreneigenschaft der inhärenten Flexibilität anhand von Ausprägungen skizziert. Grundsätzlich hat ein Verfahren eine höhere inhärente Flexibilität, falls die Eigenschaften des Verfahrens eine geringe Abhängigkeit vom Verarbeitungsgut und den Verarbeitungseigenschaften haben, z. B. werkstoffliche Zusammensetzung oder geometrische Gestalt und Anordnung. Auch induziert eine Änderung des Verarbeitungsgutes und der Verarbeitungseigenschaften keinen Änderungsbedarf des Verfahrens bzw. der zugehörigen anlagentechnischen Ausrüstung.

Eine praktikable Möglichkeit um diese Zusammenhänge zu veranschaulichen sind die in Abbildung 9 dargestellten Klassen von Befähigern für eine Formatflexibilitätssteigerung. Dies wird an Beispielen verdeutlicht. Falls für die Funktionserfüllung eines Verfahrens ein geometrieabhängiges Werkzeug bzw. Arbeitsorgan benötigt wird, so ist dies ein Indikator für einen niedrigeren Grad an inhärenter Flexibilität. Ein Zustandswechsel, falls sich dieser auf ein geometrisches Merkmal bezieht, induziert definitiv einen Rüstprozess. Dies ist unabhängig davon, ob dieser Rüstprozess extern oder intern bzw. automatisiert oder manuell durchgeführt wird. Der Bedarf eines Verfahrens an einem geometrieabhängigen Werkzeug ist daher ein Indikator für ein weniger flexibles Verfahren. Ein zusätzlicher wirtschaftlicher Effekt ist ein Anstieg der werkstückspezifischen Werkzeugkosten im Falle von niedrigeren Stückzahlen eines Produktes. Ein Arbeitsorgan, welches für die Produktion aller herzustellenden Packungen ohne Umstellzeit geeignet ist, kann als formattolerant bezeichnet werden (BLEISCH ET AL. 2011, S. 263). Falls ein Zustandswechsel dagegen mittels der Klassen kinematische oder parametrische Flexibilität durchgeführt werden kann, weist dieses Verfahren ebenfalls einen höheren Grad an inhärenter Flexibilität auf.

Die Geometrieunabhängigkeit ist allerdings nicht das alleinige Kriterium. Wenn die Notwendigkeit eines geometrieabhängigen Werkzeuges bzw. Arbeitsorganes als Trägheit eines Systems interpretiert wird, so kann dies auch auf andere Zustandsgrößen bezogen werden. Zum Beispiel kann eine notwendige Temperaturänderung eines Werkzeuges bzw. Arbeitsorganes zwar grundsätzlich der Klasse parametrische Flexibilität zugeordnet werden, da diese ausschließlich eine Parameteränderung in der Maschinensteuerung darstellt und mit keiner weiteren manuellen oder automatisierten Tätigkeit verbunden sein sollte. Allerdings ist die Trägheit bezüglich einer Temperaturänderung auch ein Indikator für ein Verfahren mit einer geringeren inhärenten Flexibilität im Vergleich zu einem Verfahren, welches dynamisch eine Änderung der Temperatur realisieren kann oder diese Zustandsanpassung für die Funktionserfüllung nicht benötigt. Dieses Beispiel kann auf alle Verfahren verallgemeinert werden, welche eine ausgeprägte Hoch- oder Nachlaufphase aufweisen.

Die Steigerung der inhärenten Flexibilität eines Verfahrens kann durch unterschiedliche Möglichkeiten erreicht werden. Ein Beispiel ist die Kinematisierung der Funktionserfüllung. Auch führt die Umsetzung der Verarbeitungsaufgabe ohne eine Abhängigkeit von geometrischen Merkmalen der Werkzeuge bzw. Arbeitsorgane zu einer Steigerung. Ferner weisen Verfahren, die keine Hoch- oder Nachlaufphase aufweisen, eine höhere inhärente Flexibilität auf. Allerdings ist die inhärente Flexibilität eines Verfahrens nur ein Eigenschaftskriterium. Es müssen auch Kriterien wie Geschwindigkeit, Verarbeitungsqualität, Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit erfüllt werden.

Der Begriff Technologie umfasst „(...) Wissen, Kenntnisse und Fertigkeiten zur Lösung technischer Probleme sowie Anlagen und Verfahren zur praktischen Umsetzung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse“ (SCHUH & KLAPPERT 2011, S. 33). Das Abbilden von Funktionen in einem technischen System kann als ein Lösen von technischen Problemen verstanden werden und ein Verfahren als dessen praktische Realisierung. Somit wird der gleiche Blickwinkel mit einer anderen Deutung der Begriffe Verfahren, Technologie und Funktion deutlich. Aus Effizienzgründen wird bei der Entwicklung möglichst auf bereits bekannte und existierende Lösungen zurückgegriffen (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 482). Dies kann damit begründet werden, dass die Produktentwicklung die „(...) Vorgaben hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität (...)“ einzuhalten hat (SCHUH & KLAPPERT 2011, S. 227). Die Technologieentwicklung hingegen verfolgt die Ziele „(...) Kreativität, Kundennutzen und Innovationshöhe (...)“ und hat somit die Aufgabe der Produktentwicklung Technologien für die Entwicklung leistungsfähiger Produkte bereitzustellen (SCHUH & KLAPPERT 2011, S. 227).

## 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

Die Technologieentwicklung ist ein Teil des Innovationsprozesses (WÖRDENWEBER & WICKORD 2008, S. 153 ff.) sowie des Technologiemanagements (SCHUH & KLAPPERT 2011, S. 86). Ein institutionelles Technologiemanagement haben nicht alle Unternehmen des mittelständisch geprägten Verpackungsmaschinenbaus. Oftmals ist dies eine Teilaufgabe der Entwicklungsabteilung und zumeist ausschließlich von Kunden angeregt. Daher wird nachfolgend ein methodisches Vorgehen vorgeschlagen und in Kapitel 5 für die Verfahrensentwicklung eingesetzt. Wie ein solches Wissen im Rahmen einer rechnerintegrierten Lösungssuche im Entwicklungsprozess genutzt werden kann, ist nicht Inhalt dieser Ausführungen. Stattdessen sei auf weitere Arbeiten verwiesen (u. a. MAJSCHAK 1996).

### Gesamtstruktur des Vorgehensmodells

Das Vorgehensmodell des Methodenbausteins Funktionspool kann der Abbildung 31 entnommen werden. Das gewählte Vorgehen orientiert sich an den Phasen des Technologieentwicklungsprozesses, wie dieser in SCHUH & KLAPPERT (2011, S. 230) dargelegt ist. Das allgemein und unspezifisch gehaltene Vorgehen wird im Rahmen dieser Arbeit um Spezifika der Verpackungstechnik, des Verpackungsmaschinenbaus und der Formatflexibilität erweitert und angepasst.

<u>Schritte</u>	<u>Aufgaben</u>
Initialisierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Auswahl der zu flexibilisierenden Funktion</li> <li>▪ Detaillierung des Anforderungsprofils</li> </ul>
Ideengenerierung und -bewertung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sammlung von potenziellen Verfahren</li> <li>▪ Bewertung der grundsätzlichen Eignung</li> </ul>
Technologiebasisstudie	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Detaillierte und erweiterte Informationsbeschaffung</li> <li>▪ Bewertung des Verfahrenspotenzials</li> </ul>
Erweiterte Technologiestudie	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Informationsgenerierung mit praktischen Versuchen</li> <li>▪ Bewertung der praktischen Erkenntnisse</li> </ul>
Transfer	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sammlung der Verfahren und der Informationen</li> <li>▪ Einsatz im Rahmen der Produktentwicklung</li> </ul>

Abbildung 31: Vorgehensmodell des Methodenbausteins Funktionspool in Anlehnung an SCHUH & KLAPPERT (2011, S. 230)

Dieses Vorgehensmodell umfasst insgesamt fünf Schritte. Der fünfte Schritt stellt die Nutzung der entwickelten Verfahren im Rahmen der Produktentwicklung dar.



Im folgenden Abschnitt 4.7.2 werden die einzelnen Schritte detaillierter ausgeführt, wobei der Fokus auf der initialen Anwendung für die Generierung von Verfahrensalternativen für eine ausgewählte Funktion liegt. Die kontinuierliche Erweiterung und Pflege der enthaltenen Informationen wird als weitere notwendige Tätigkeit gesehen. Auf diesen Prozess wird im Weiteren nur auszugsweise eingegangen.

### 4.7.2 Detaillierung des Vorgehensmodells

#### Schritt 1: Initialisierung

Das Ziel des ersten Schrittes ist die Auswahl der zu flexibilisierenden Funktion in Kombination mit einer Beschreibung der zugehörigen Prozess- und Flexibilitätsanforderungen. Die zu flexibilisierende Funktion kann auf vielfältige Weise ausgewählt werden. Eine Möglichkeit stellen die Erkenntnisse des Methodenbausteins Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs dar, vgl. Abschnitt 4.6. Dort wird insbesondere offenkundig, welche Funktionen maßgeblich von einem Formatflexibilitätsbedarf betroffen sind. Eine Ressourceneinheit sollte daher diese Funktion umfassen, welche einen Formatwechsel ohne Rüstprozess realisiert. Der vorherige Einsatz des Methodenbausteins Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs ist allerdings nicht zwingend nötig. Eine weitere Alternative ist die allgemeine Nutzung von Erfahrungswerten aus bereits durchgeführten Rüstprozessoptimierungen und den damit erworbenen Erkenntnissen, welche Funktion einer Verpackungsmaschine besonders lange Rüstzeiten verursacht.

Die folgende ausführliche Beschreibung und Analyse der Prozess- und Flexibilitätsanforderungen ist notwendig, um im Rahmen der weiteren Arbeitsschritte eine fundierte Entscheidungsbasis zugrunde legen zu können. Entscheidend ist hierbei, dass nicht nur die Flexibilitätsanforderungen detailliert analysiert, sondern auch die Prozessanforderungen erfasst werden, z. B. notwendige Prozessgeschwindigkeiten oder die zu erfüllenden Qualitätsmerkmale. Unter Qualität wird der Grad der Erfüllung von Anforderungen verstanden (DIN EN ISO 9000, S. 18). Ein Verfahren, welches eine Steigerung der Formatflexibilität verspricht, jedoch bestimmte notwendige Prozessanforderungen nicht erfüllt, ist für eine weitere Betrachtung ebenfalls ungeeignet.

Die finalen Ergebnisse des ersten Arbeitsschrittes sind die Auswahl der zu flexibilisierenden Funktion sowie die Sammlung der Prozess- und Flexibilitätsanforderungen.

## **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

### **Schritt 2: Ideengenerierung und -bewertung**

Dieser Arbeitsschritt umfasst die Ideengenerierung und deren Bewertung. Für die Sammlung und Erzeugung von potenziellen Lösungsalternativen sind in der Literatur unterschiedlichste Möglichkeiten genannt, vgl. (OPHEY 2005, S. 29 ff.; EHRENSPIEL ET AL. 2007, S. 70 ff.; LINDEMANN 2009, S. 137 ff.; EHRENSPIEL & MEERKAMM 2013, S. 427 ff.). Diese können den Kreativitätstechniken, wie z. B. Brainstorming, zugeordnet werden. Aber auch Methoden der Technologiefrüherkennung können eingesetzt werden, z. B. Technologielandkarten (SCHUH & KLAPPERT 2011, S. 151 ff.). Zusätzlich stellen die Aktivitäten der Marktbegleiter eine Informationsquelle dar, z. B. Patente oder Veröffentlichungen (COHEN ET AL. 2002). Ferner hat die Verarbeitungstechnik hinsichtlich der grundlegenden Verarbeitungsverfahren eine große Schnittmenge zur Fertigungstechnik, bspw. im Bereich Fügen (MAJSCHAK 1996, S. 54 f.). Daher stellt die Fertigungstechnik ein ideales Suchfeld für übertragbare Verfahren dar. Auf eine ausführliche Darstellung des sehr umfangreichen Themengebietes der Generierung von Ideen bzw. Lösungsmöglichkeiten, des angrenzenden Themenbereiches Wissens- und Informationsmanagement, sei an dieser Stelle verzichtet und auf die Fachliteratur verwiesen. Da der Fokus des zweiten Arbeitsschrittes das grundsätzliche Aufspannen eines großen Lösungsraums und das Verdichten auf die vielversprechendsten Alternativen ist, sollte der Zeit- und somit Kostenaufwand für die Recherche und Auswertung ein wirtschaftlich adäquates Maß nicht übersteigen.

Die folgende Ideenbewertung ist bedeutend, da „(...) die richtigen Ideen und Technologien zu priorisieren und Technologieentwicklungen mit geringem Potenzial frühzeitig zu stoppen“ sind (SCHUH & KLAPPERT 2011, S. 227). Daher ist das Potenzial einer identifizierten Verfahrensidee im Hinblick auf eine Steigerung der Formatflexibilität zu analysieren und die Unterschiede zwischen den Verfahren zu erkennen. Um diese Analyse und die Bewertung zu verallgemeinern, werden die dreigliedrige Klassifikation, vgl. Abschnitt 2.4, und die Charakterisierung der inhärenten Flexibilität eines Verfahrens, vgl. Abschnitt 4.7.1, genutzt. Es wird überprüft, ob ein formatunspezifisches bzw. geometrieunabhängiges Werkzeug eingesetzt werden kann. Darüber hinaus ist zu analysieren, ob eine Kinematisierung oder ein Zustandswechsel anhand einer Parametrisierung möglich ist. Des Weiteren sind die ermittelten Alternativen anhand der im ersten Arbeitsschritt dokumentierten Prozess- und Flexibilitätsanforderungen zu überprüfen. Eine Erweiterung der Bewertungskriterien ist möglich, z. B. um den Energieverbrauch. Das Ergebnis des Arbeitsschrittes ist eine reduzierte Anzahl von potenziellen Verfahrensalternativen.

### **Schritt 3: Technologiebasisstudie**

Auf Basis der Erkenntnisse des vorherigen Arbeitsschrittes sind deutlich detailliertere und fundiertere Informationsrecherchen und -analysen durchzuführen. Das Suchfeld der Informationsquellen ist zu erweitern und zu vertiefen. Die grundsätzlichen Informationsquellen sind wie im zweiten Arbeitsschritt z. B. Veröffentlichungen. Auch insbesondere wissenschaftliche Publikationen sind vielversprechende Wissensträger. Ferner können aufwandsarme Untersuchungen anhand von Versuchsaufbauten als Informationsquelle genutzt werden. Detailliertere und somit aufwendigere Untersuchungen sollten allerdings Gegenstand einer erweiterten Technologiestudie sein, da diese mit einem deutlich höheren Aufwand verbunden sind. Anhand der auf diesem Weg gesammelten Erkenntnisse werden die Alternativen nochmals bewertet und auf dieser Basis entschieden, ob eine weitere Betrachtung zielführend ist. Als Resultat des Arbeitsschrittes werden für die folgende erweiterte Technologiestudie nur die potenzialreichsten Verfahren ausgewählt. Eine allgemeine Anzahl der weiter zu betrachtenden Alternativen kann nicht festgelegt werden, da dies von vielfältigen Einflussfaktoren, wie z. B. finanzielles Budget, abhängt. Für eine notwendige Fokussierung ist die Bildung einer Rangfolge ein passendes Mittel.

### **Schritt 4: Erweiterte Technologiestudie**

Der vierte Arbeitsschritt ist die erweiterte Technologiestudie, welche anhand von Funktionsmustern und prototypischen Aufbauten praxisnahe Erkenntnisse generiert. Dies umfasst auch die Auswahl der Prüfmethode für ein Bestimmen der erzielbaren Qualität. Aufgrund des Bedarfs an diesen Experimenten steigt der zeitliche und finanzielle Aufwand gegenüber den vorgelagerten Arbeitsschritten deutlich an. Die notwendigen Haupteigenschaften der erweiterten Technologiestudie sind, inwieweit das untersuchte Verfahren geeignet ist, die Prozessanforderungen zu erfüllen sowie die Formatflexibilität zu steigern. Aufgrund der praxisnahen Validierung sind u. a. auch die Verfahrensgrenzen bekannt.

### **Schritt 5: Transfer**

Die durch das Vorgehen gesammelten Erkenntnisse sind abschließend zu dokumentieren, um bspw. eine Überführung in einen kontinuierlichen aber auch aufwandsarmen Prozess zu ermöglichen. Dies sollte nicht nur die positiven Erkenntnisse umfassen, sondern auch die Entscheidungsfindung, weshalb einzelne Alternativen aus der Betrachtung ausgeschlossen wurden. Zum Beispiel können neue technologische Entwicklungen in angrenzenden Bereichen dazu führen, dass der ursprüngliche Grund hinfällig wird.

## 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

Dieser Arbeitsschritt stellt somit für die geeigneten Verfahren die Schnittstelle zur Produktentwicklung dar. Für den Einsatz der Verfahren sind Ressourceneinheiten zu entwickeln die bspw. im Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs für die Konzeption benötigt werden. Für die Umsetzung der Verfahren in rüstopimierte Ressourceneinheiten kann der Methodenbaustein Gestaltungspool unterstützen.

### 4.7.3 Zusammenfassung und Integration in das Gesamtkonzept

Der Einsatz von Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität ist vielversprechend, um die Formatflexibilität einer Verpackungsmaschine gezielt zu steigern. Um derartige Verfahren zu identifizieren und abschließend der Entwicklung zur Verfügung stellen zu können, wird ein fünfstufiges Vorgehensmodell vorgeschlagen. Die Integration in die Konzeptions- und Entwurfsphase eines Entwicklungsprozesses ist in Abbildung 32 dargestellt. Als Eingangsinformationen benötigt der methodische Baustein eine Vorauswahl von ausgewählten Funktionen einer zu flexibilisierenden Verpackungsmaschine sowie das zugehörige Anforderungsprofil hinsichtlich Flexibilitäts- und Prozessanforderungen. Das Ergebnis des Funktionspools ist die Bereitstellung von Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität und die damit verbundene Möglichkeit, diese Verfahren in Kundenprojekten zu berücksichtigen.

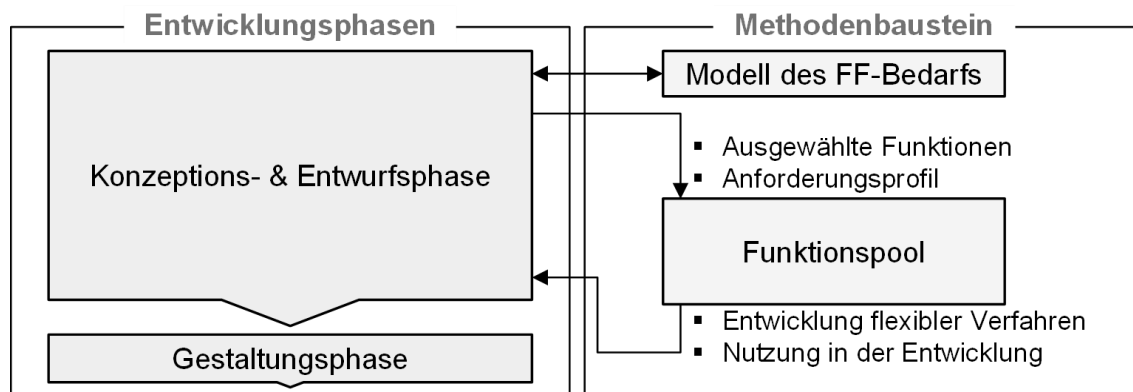


Abbildung 32: Integration des Methodenbausteins Funktionspool in die Phase Konzeption und Entwurf

### 4.8 Methodenbaustein Gestaltungspool

Für die Gestaltungsphase wird im Rahmen dieser Arbeit der Methodenbaustein Gestaltungspool eingeführt. Diese Entwicklungsphase umfasst die „(...) Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit denen die Gestalt von Produkten bestimmt wird, d. h. mit denen die Anordnung von Elementen, geometrischen Formen (...) und Abmessungen sowie Materialien festgelegt und zu einem Ganzen gefügt werden.“ (VDI 2221). Das Gestalten ist ein iterativer Prozess. Daher ist es aus Effizienzgründen unerlässlich mit möglichst wenigen Iterationsschleifen ein qualitäts- und anforderungsgerechtes Ergebnis zu erzielen (VDI 2223). Digitale Werkzeuge, u. a. 3D-CAD/CAM, unterstützen den Gestaltungsprozess (CONRAD 2013, S. 250 ff.). Allerdings sind schöpferisch-kreative Tätigkeiten schwer auf Rechner-systeme übertragbar (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 435). Grundlegende Hilfen für den Entwickler, insbesondere von maschinenbaulichen Produkten, sind noch immer die Grundprinzipien, z. B. Prinzip der Kraftleitung, sowie Grundregeln (CONRAD 2013, S. 264 ff.; FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 493).

Neben diesen Hilfsmitteln stehen für die Erreichung von bestimmten Entwicklungszielen und die Erfüllung von spezifischen Anforderungen Richtlinien zur Verfügung, z. B. für die Gestaltung von fertigungsgerechten Komponenten (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 583). Diese werden auch als Konstruktions- oder Entwicklungsregeln bezeichnet (VDI 2223; SCHÄPPI ET AL. 2005, S. 302 ff.). Im internationalen Umfeld werden diese oftmals in DfX-Methoden eingebettet (SCHÄPPI ET AL. 2005, S. 302 ff.; FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 583). Mit den Entscheidungen des Entwicklers in der Gestaltungsphase, werden gleichzeitig eine Vielzahl von Produkteigenschaften festgelegt, u. a. Funktionalität und Kosten (VDI 2223). Somit werden die Umrüstbarkeit und unmittelbar auch die Formatflexibilität entscheidend beeinflusst. In der nach dem Gestaltungsprozess folgenden Auslegungs- und Dimensionierungsstufe ist der Einfluss gering. Daher soll der Gestaltungspool die Entwickler bei der effizienten Gestaltung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen unterstützen. Ein hinsichtlich der Formatflexibilitätsanforderungen qualitätsgerechtes Gestaltungsergebnis soll effizient und mit möglichst wenigen Iterationsschleifen erreicht werden.

In Abschnitt 4.8.1 werden die Grundannahmen und die Gesamtstruktur des Vorgehensmodells dargelegt. In Abschnitt 4.8.2 folgt die Detaillierung des Vorgehensmodells sowie in Abschnitt 4.8.3 die Integration des Methodenbausteins in das Gesamtkonzept.

## **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

### **4.8.1 Grundannahmen und Gesamtstruktur**

Die Konzeption des Methodenbausteins Gestaltungspool beruht auf zwei grundlegenden Annahmen, welche im Folgenden dargelegt werden.

*Annahme 1 – Der Betrachtungsfokus ist eine tätigkeitsbasierte Analyse und Verbesserung:* Die durchzuführenden Rüsttätigkeiten sind grundsätzlich die primären Verursacher und somit Indikatoren für Maschinenstillstände und Personalarüstkosten. Die Rüstteile sind oftmals die Träger der nicht vorhandenen inhärenten Flexibilität. Im Rahmen der weiteren Betrachtungen wird eine tätigkeitsbasierte Beschreibung, wie dies u. a. in SHINGO (1985) für SMED genutzt wird, als zielführend erachtet. Die ausschließlich auf die Bauteilstruktur bezogene Analyse, wie von OWEN ET AL. (2011) dargelegt, fließt in die Optimierungsphase ein. Die von OWEN ET AL. (2011) beschriebene Problematik der uneinheitlichen und schwierigen Definition von Rüsttätigkeiten wird im Rahmen des hiesigen Vorgehens mit einer inkrementellen Definition von Rüsttätigkeiten begegnet. In der Automobilindustrie ist die Nutzung von syntaktischen Mustern im Rahmen der Anforderungsdefinition ein Mittel um durch eine Standardisierung der Formulierung Fehler zu minimieren (FELDHUSEN & GROTE 2013, S. 338). Auf Basis der Definition von Rüstinkrementen entsteht eine objektive Beschreibung, auf deren Basis nachvollziehbar Verbesserungsmöglichkeiten abgeleitet werden.

*Annahme 2 – Gleichgewichtung der maschinen- und personalbezogenen Anwendungen:* In diesem Konkretisierungsstadium der Entwicklung haben diese beiden Anteile die gleiche Wichtigkeit. Eine fokussierte Externalisierung von Rüsttätigkeiten ist ein entscheidendes Kriterium von SMED, um bspw. die Maschinenstillstandszeit zu reduzieren. Allerdings sind auch die Personalarüstzeiten und -kosten zu vermindern. Daher wird im Gestaltungspool keine derart ausgeprägte Fokussierung auf die Möglichkeit der Externalisierung von Rüsttätigkeiten angedacht. Ein weiterer häufig benannter Ansatz für die Rüstzeitverkürzung ist die Parallelisierung von Arbeiten. Das Parallelisieren ermöglicht grundsätzlich eine Reduzierung der Maschinenstillstandszeiten. Allerdings werden hierfür mindestens zwei Mitarbeiter benötigt. Die Personalarüstkosten werden durch eine Parallelisierung nicht reduziert. Es ist eine Steigung zu erwarten, z. B. aufgrund des Koordinierungsaufwandes. Ferner müssen die zusätzlichen Mitarbeiter vorgehalten und deren Einsatz geplant werden. Dies führt zu einem höheren organisatorischen Aufwand und indirekten Kosten. Zusätzlich entstehen Abhängigkeiten, die sich z. B. in Form von höheren Wartezeiten äußern. Aufgrund dieser Nachteile, wird die Parallelisierung als organisatorische Maßnahme nicht fokussiert. Der gesamte Formatwechsel soll vom Bedienpersonal der Verpackungs-

maschine, zumeist eine Person, durchführbar sein. Außerdem hat dies den Vorteil, dass Maschinenbediener einen niedrigeren Stundenkostensatz aufweisen, als spezielle Rüstmitarbeiter, die teilweise eine höhere Qualifikation haben.

### Gesamtstruktur des Vorgehensmodells

Das Vorgehen für den Gestaltungspool gliedert sich in zwei Schritte, vgl. Abbildung 33. Auf Basis der Eingangsinformationen wird die Analyse durchgeführt. Das Ergebnis der Analyse sind die priorisierten Verbesserungspotenziale. Im zweiten Schritt werden die Verbesserungen erarbeitet. Anhand der Analyse und der kategorisierten Gestaltungsmaßnahmen werden Verbesserungsvorschläge abgeleitet. Anschließend werden die Alternativen bewertet. Diese Schritte sind erneut durchzuführen, falls die generierten Lösungsalternativen die Anforderungen nicht erfüllen. Das Ergebnis ist eine rüstopimierte Maschinengestaltung.

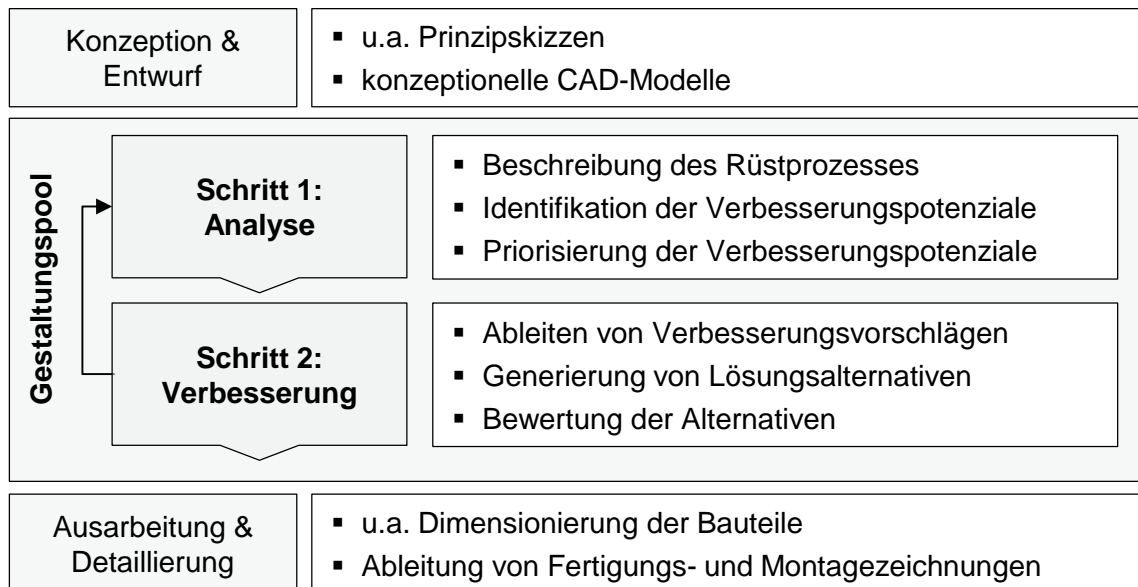


Abbildung 33: Vorgehensmodell des Methodenbausteins Gestaltungspool

### 4.8.2 Detaillierung des Vorgehensmodells

Zunächst werden die Eingangsinformationen für die Anwendung des Vorgehensmodells beschrieben. Für die Analyse wird ein Strukturmodell benötigt. Dies kann z. B. in Form eines konzeptionellen CAD-Modells oder, im Falle einer Änderungskonstruktion, als existierende Referenzmaschine vorliegen. Somit sind unterschiedliche Konkretisierungsstufen möglich, welche zu einer unterschiedlichen Aussagegüte in der Modellierung des Rüstprozesses führen. Im Falle einer Änderungskonstruktion ist eine höhere Aussagegüte zu erwarten. Anhand einer Referenzmaschine können die Rüstinkremente detaillierter bestimmt werden.

## **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

Eine gedankliche Vorbestimmung des Rüstprozesses kann somit entfallen. Bei einer Prinzipskizze liegen mehr Freiheitsgrade vor. Daher können Veränderungen aufwandsärmer vorgenommen werden. Sollte dies bei den Baustrukturmodellen noch nicht eingepflegt worden sein, so werden weitere Informationen zu den Auswirkungen eines Formatwechsels benötigt. Hierfür kann u. a. die Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs, Abschnitt 4.6, genutzt werden. Auch werden die Anforderungen an die Formatwechseldauer benötigt. Diese könnten mit dem Methodenbaustein Szenario-Steckbrief, Abschnitt 4.5, generiert werden.

### **Schritt 1: Analyse**

#### *Beschreibung des Rüstprozesses*

Dieser Arbeitsschritt basiert auf einer Beschreibung der Tätigkeiten, die für einen Formatwechsel notwendig sind. Die Zustandswechsel zwischen einzelnen Produkten sind nicht aufwandsäquivalent (MCINTOSH ET AL. 2001, S. 70). Dies ist auch bei Formatwechseln von Verpackungsmaschinen der Fall. Daher ist ein repräsentativer und umfassender Formatwechsel auszuwählen. Für die Sicherstellung einer objektiven Beschreibung wird der Formatwechselprozess in definierte Rüstinkremente untergliedert. Ein solches Rüstinkrement enthält Informationen zu der jeweiligen Rüsttätigkeit, den Hilfsmitteln und den Rüstobjekten sowie jeweils noch weitere spezifizierende Angaben, z. B. die Anzahl an Rüstobjekten. In Tabelle 1 ist ein beispielhafter Auszug der Analysetabelle dargestellt.

Eine jede Zeile entspricht einem Rüstinkrement. Ein Rüstinkrement ist eine Modifikation des in Frühwald (1990, S. 31) definierten Rüstelements. Die Objektivierung der Rüstinkremente erfordert die standardisierte Definition von Rüsttätigkeiten. Hierfür werden die in Frühwald (1990, S. 32) eingeführten Rüsttätigkeiten adaptiert, vgl. Tabelle 2. Ein jedes Rüstinkrement umfasst nur genau eine Rüsttätigkeit. Somit wird eine Standardisierung der Beschreibung des Rüstprozesses erreicht. Beispiele für notwendige Hilfsmittel sind Handwerkzeuge, Transportmittel sowie Mess- und Prüfmittel. Diese werden nur für den Rüstprozess benötigt und sind zu keiner Zeit Teil der Maschine. Die Rüstobjekte dagegen sind für eine gewisse Dauer ein Element der Maschine. Hierbei wird in Anlehnung an Reik et al. (2006a, 2006b) zwischen primären, sekundären und keinen Rüstobjekten unterschieden. Primäre Rüstobjekte werden während eines Rüstprozesses ein- bzw. ausgebaut und ein Austausch bzw. eine Umstellung ist nötig, da die Funktionserfüllung an die physische, sphärische Schnittstelle der Wirkpaarung gekoppelt ist.



## 4.8 Methodenbaustein Gestaltungspool

Sekundäre Rüstobjekte werden auch ein-/ausgebaut bzw. gehandhabt, allerdings tragen diese nicht zu der Funktionserfüllung bei, z. B. Schrauben oder Scheiben. Objekte, welche der Gruppe kein Rüstobjekt zuzuordnen sind, werden zwar für den Rüstprozess benötigt, allerdings nicht gehandhabt, z. B. Bedienterminal.

*Tabelle 1: Beispielhafter Auszug einer Rüstprozessbeschreibung*

Tätigkeiten						Hilfsmittel		Rüstobjekt			
Vorgangs-Nr.	Bezeichnung	Tätigkeits-Nr.	Externalisierung	Anzahl	Gesamtdauer	Bezeichnung	Abmessung	Bezeichnung	Abmessung	Anzahl	Klassifizierung
1	Rüstinkrement 1	RT2	E	1	5	Hilfsmittel 1	-	Rüstobjekt 1	-	1	P
2	Rüstinkrement 2	RT10	I	5	2	Hilfsmittel 2	Gr. 13	Rüstobjekt 2	M8	5	S
3	Rüstinkrement 3	RT8	I	4	1	-	-	Rüstobjekt 3	M8	4	S
4	...										
<b>Summe</b>				10	8						

**Legende:**

<i>Klassifizierung</i>	<i>Externalisierung</i>
P: primäres Rüstobjekt	E: externe Durchführung
S: sekundäres Rüstobjekt	I: interne Durchführung
K: kein Rüstobjekt	I/E: interne jedoch externalisierbare Durchführung

*Tabelle 2: Übersicht der definierten Rüsttätigkeiten*

Rüsttätigkeiten			
#	Bezeichnung	#	Bezeichnung
RT1	Suchen/Warten	RT11	Spannen/Anziehen
RT2	Bereit-/Zusammenstellen/Holen	RT12	Positionieren
RT3	Aufräumen/Wegbringen	RT13	Ein-/Nachstellen
RT4	Kontrollieren	RT14	Auslösen/Betätigen
RT5	Besprechen	RT15	Prüfen
RT6	Informieren/Lesen	RT16	Messen
RT7	Dokumentieren	RT17	Reinigen
RT8	Aus-/Abbauen	RT18	Daten eingeben/abrufen/einlesen
RT9	Ein-/Aufbauen	RT19	Daten korrigieren/löschen
RT10	Lösen	RT20	Daten ausgeben/auslesen

#### **4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen**

---

Die Beschreibung bezieht sich nicht nur auf manuelle Tätigkeiten, die für einen Formatwechsel notwendig sind, sondern umfasst auch automatisierte Tätigkeiten. Für die Ermittlung der Zeitdauer eines jeden Rüstinkrements können erfahrungsbasierte Schätzwerte genutzt werden. Auch der Einsatz von anderen Verfahren der Zeitbestimmung, vgl. MTM-UAS in Eichhorn (2012), ist möglich. Im Bedarfsfall kann die Beschreibung des Rüstprozesses um weitere bekannte Analyseverfahren erweitert werden, z. B. Erstellung eines Wegediagramms. Die Durchführung der Beschreibung erfolgt in tabellarischer Form, vgl. Tabelle 1. Aus dieser kann für eine Visualisierung bspw. ein Gantt-Diagramm abgeleitet werden.

##### *Identifikation und Priorisierung der Verbesserungspotenziale*

Das Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, aus der Modellierung die Verbesserungspotenziale zu identifizieren und für die Verbesserung zu priorisieren. Hierfür werden zwei Prioritätendiagramme vorgeschlagen. Die beiden zweidimensionalen Prioritätendiagramme haben grundsätzlich den gleichen Aufbau. Die beiden Dimensionen sind die Anzahl der Rüsttätigkeiten sowie die Dauer des jeweiligen Rüstinkrements. Auf eine tätigkeitskumulierte Beschreibung bezieht sich das erste Prioritätendiagramm. Hierfür werden die Rüstinkremente zusammengefasst, die den einzelnen Tätigkeiten zugeordnet werden können. Bei dem zweiten Prioritätendiagramm wird diese Zusammenfassung nicht vorgenommen. Anhand des tätigkeitskumulierten Diagramms kann ermittelt werden, welche der 20 definierten Tätigkeiten maßgeblich die Formatwechselzeit beeinflussen. Dieses dient zunächst ausschließlich der Generierung eines Überblicks und der Identifikation gesamtheitlich, dominierender Verbesserungspotenziale, z. B. wird der größte Anteil der Formatwechselzeit für die Tätigkeiten Lösen oder Messen benötigt. Aus dieser kumulierten Betrachtung lassen sich spezifische Verbesserungsvorschläge nur schwer ableiten. Daher wird für die Bestimmung der detaillierten Verbesserungspotenziale das zweite Prioritätendiagramm genutzt. Hierfür werden die einzelnen Rüstinkremente aufgetragen. Für das Aufzeigen der Verbesserungspotenziale werden zwei Abstraktionsniveaus unterschieden. Abstrakter und damit allgemeingültiger werden Verbesserungen durch eine Reduktion der Rüstobjekte oder mit einer Verkürzung der Rüsttätigkeiten erreicht. Dies spiegelt sich in einer vier Felder umfassenden Segmentierung wider, vgl. Abbildung 34. Die Gestaltungsmaßnahmen, auf die im zweiten Schritt eingegangen wird, sind in die Gestaltungsbereiche 1 und 2 untergliedert, vgl. Abbildung 36.



Abbildung 34: Segmentierung des rüstinkrementbasierten Prioritätendiagramms und Zuordnung zu den beiden Gestaltungsbereichen

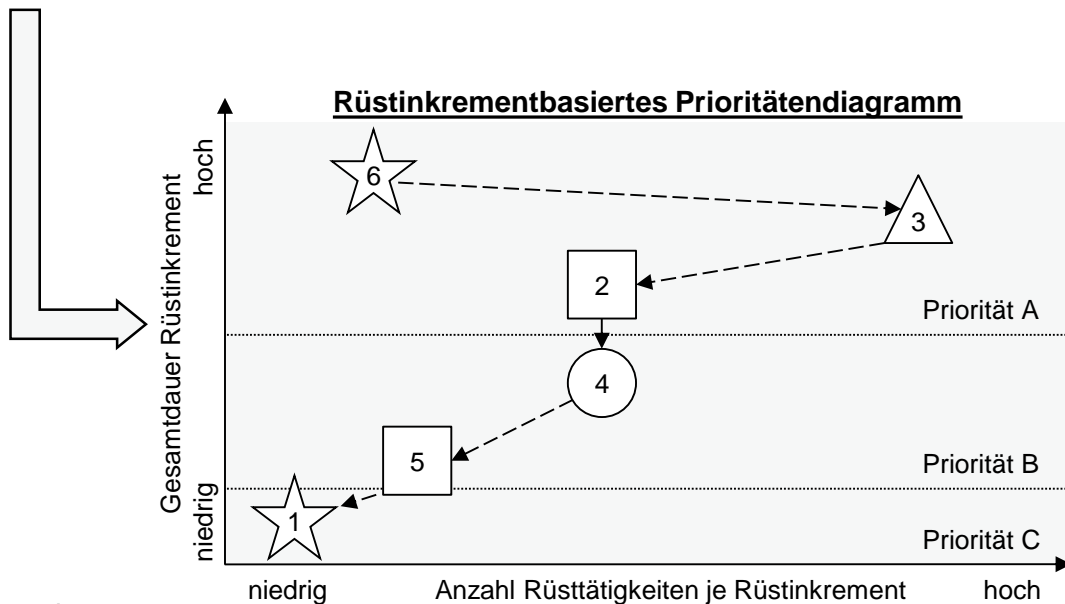
Die Abbildung 35 zeigt ein beispielhaft ausgefülltes Prioritätendiagramm. Dieses ist wie nachfolgend beschrieben zu interpretieren. Der beispielhafte Rüstprozess besteht aus insgesamt sechs Rüstinkrementen, welche durch die Vorgangsnummern 1 bis 6 repräsentiert werden. Es können vier Rüststätigkeiten (RT1, RT2, RT4 und RT12) unterschieden werden, die den sechs Rüstinkrementen zugrunde liegen. Jede Rüststätigkeit wird durch die Form des Kästchens symbolisiert, bspw. Dreieck oder Stern. Die Position eines jeden Rüstinkrements im zweidimensionalen Prioritätendiagramm wird durch die Anzahl der Rüststätigkeiten je Rüstinkrement und der Gesamtdauer des jeweiligen Rüstinkrements festgelegt.

Anschließend wird ein Verbesserungspfad aus den einzelnen Rüstinkrementen abgeleitet. Die dem Verbesserungspfad zugrunde liegende Priorität der einzelnen Rüstinkremente wird mit einem paarweisen Vergleich bestimmt. Hierbei wird die Gesamtdauer des Rüstinkrements höher gewichtet als die Anzahl der Rüststätigkeiten. Beispielsweise nimmt daher das Rüstinkrement mit der Vorgangsnummer 6 im Vergleich zum Rüstinkrement mit der Vorgangsnummer 3 die erste Stelle des Verbesserungspfades ein. Die Rüstinkremente werden zusätzlich hinsichtlich der Notwendigkeit einer Verbesserung klassifiziert. Dies geschieht in Relation der benötigten Dauer eines Rüstinkrements zu der definierten Zielsetzung. Hiermit wird der Verbesserungsbedarf eindeutig aufgezeigt, um die Anzahl an Iterationsschleifen zu reduzieren.

## 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

### Tabellarische Beschreibung des Rüstprozesses

Rüstprozess	Tätigkeiten					Symbol
	Vorgangs-Nr.	Bezeichnung	Tätigkeits-Nr.	Anzahl	Gesamtdauer	
	1	Kontrollieren	RT4 ☆	1	1	☆
	2	Bereit-/Zusammenstellen	RT2 □	3	4	□ <sub>2</sub>
	3	Suchen/Warten	RT1 △	5	5	△ <sub>3</sub>
	4	Positionieren	RT12 ○	3	2,5	○ <sub>4</sub>
	5	Bereit-/Zusammenstellen	RT2 □	2	1,5	□ <sub>5</sub>
	6	Kontrollieren	RT4 ☆	2	7	☆



Legende:

Verbesserungspfad ← –      Vorgangs-Nr. #      △<sub>#</sub>

Abbildung 35: Beispiel eines rüstinkrementbasiertes Prioritätendiagramms (die Elementform signalisiert die Rüsttätigkeit und die eingetragene Nummer die jeweilige Vorgangsnummer)

Folgende drei Prioritätsklassen werden hierbei unterschieden:

- **Priorität A:** Diese Rüstinkremente müssen nahezu vollständig eliminiert werden, um das Gesamtziel zu erreichen. Dies umfasst alle Rüstinkremente, die mindestens benötigt werden, um die prognostizierte Dauer des Formatwechsels auf die gewünschte Dauer zu reduzieren.
- **Priorität B:** Diese Rüstinkremente sind zu reduzieren, da bei den Rüstinkrementen der Priorität A nicht von einer Eliminierung ausgegangen werden kann. Dies umfasst Rüstinkremente, die einen prozentualen Anteil der prognostizierten Dauer des Formatwechsels einnehmen, z. B. 20 %.
- **Priorität C:** Diese Rüstinkremente können reduziert werden, jedoch wird zunächst für die Zielerreichung keine Notwendigkeit gesehen. Dies umfasst die restlichen Rüstinkremente.

Die finale Ergebnisdarstellung des Schritts Analyse erfolgt in tabellarischer Form. Hierfür wird die Analyseliste aus Tabelle 1, um die Angaben Rang der Priorität und Einteilung der Priorität, ergänzt.

### **Schritt 2: Verbesserung**

Im Folgenden wird zunächst dargelegt, wie aus den im ersten Schritt aufgezeigten Potenzialen die spezifischen Verbesserungsvorschläge abgeleitet und auf dieser Basis wiederum Lösungsalternativen entwickelt werden. Diese alternativen Konzepte werden abschließend bewertet.

#### *Generierung von Verbesserungsvorschlägen und Lösungsalternativen*

Bei den in Kapitel 3 aufgeführten Methoden sind zumeist spezifische Verbesserungsratschläge aufgeführt. Jedoch haben diese einen methodenspezifischen Fokus, z. B. Externalisierung bei SMED oder Rüstelementfokussierung bei DFC. Dieses starre Vorgehen für die Ermittlung von Verbesserungen ist zu flexibilisieren, um ein situationsgerechtes Hilfsmittel zu ermöglichen. Das Hilfsmittel für die Generierung von Verbesserungsvorschlägen aus den identifizierten Potenzialen ist die Zuordnungsmatrix. Diese zweidimensionale Matrix weist den einzelnen Schwachstellen spezifische Lösungsvorschläge zu, vgl. Abbildung 36. Hierfür sind die Lösungsvorschläge den jeweils sinnvollen Rüsttätigkeiten zugeordnet. Die Lösungsvorschläge werden als Gestaltungsmaßnahme bezeichnet. Die Verbesserungsvorschläge werden aus der Kombination der Verbesserungspotenziale mit den Gestaltungsmaßnahmen abgeleitet.

Die in der Zuordnungsmatrix hinterlegten Gestaltungsmaßnahmen sind aus den Gestaltungsregeln, Designregeln bzw. Verbesserungshinweisen der Arbeiten von SHINGO (1985), SEKINE & ARAI (1992), MILEHAM ET AL. (1999), MCINTOSH ET AL. (2001), VAN GOUBERGER & VAN LANDEGHEM (2002), REIK ET AL. (2006b) und OWEN ET AL. (2011) abgeleitet. Daher stellen diese Vorarbeiten eine fundierte Datenbasis dar, auf welche mithilfe der Zuordnungsmatrix tätigkeitsspezifisch zugegriffen werden kann. Durch die gewählte Struktur kann die Zuordnungsmatrix aufwandsarm erweitert und modifiziert werden. Als Ergänzung zu den Gestaltungsmaßnahmen in Textform, können Best-Practice-Beispiele und konkretisierte Lösungsvorschläge, z. B. für eine rüstopimierte Schraubverbindung oder Schnellspannsysteme sowie Angaben zu Lieferanten hinterlegt werden.

## 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

Gestaltungsbereich	Rüsttätigkeit				Nr.	Gestaltungsmaßnahmen
	Suchen/Warten	...	Aus-/Abbauen	...		
	RT1	...	RT8	...		
<b>1</b> Anzahl der Rüstobjekte muss reduziert werden	x		x		<b>1</b>	Reduktion der Rüstobjekte und deren Vielfalt
	x		x		<b>1.1</b>	Eliminierung bzw. Minimierung von Rüstobjekten
	x		x		<b>1.2</b>	Zusammenfassen von Rüstobjekten zu einer Baugruppe/Modul
	x		x		<b>1.3</b>	Verwendung universeller Rüstobjekte
					...	...
<b>2</b> Rüsttätigkeit muss optimiert werden	x		x		<b>2.1</b>	Externes Rüsten ermöglichen
	x		x		<b>2.1.1</b>	Externes Vorbereiten von Modulen und Rüstobjekten ermöglichen
					...	...

Abbildung 36: Struktur und Auszug der Zuordnungsmatrix für die Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen

Ferner wird im Folgenden eine Gestaltungsmaßnahme für eine Steigerung der Flexibilität von Werkzeugen bzw. Arbeitsorganen dargelegt, welche in dieser Form nicht Bestandteil der o. g. Vorarbeiten ist. Insbesondere bei stoffformenden Prozessen sind geformte Arbeitsorgane bzw. Werkzeuge notwendig, welche aufgrund ihrer Gestalt die Funktionserfüllung realisieren (MAJSCHAK 1996, S. 39). Die *Diskretisierung der Wirkfläche* stellt eine vielversprechende Gestaltungsmaßnahme dar, um bspw. geometriegebundene Formwerkzeuge flexibler zu gestalten und somit ein bisheriges Rüstobjekt zu eliminieren. Hierfür wird das Arbeitsorgan in einzelne Funktionsinkremente untergliedert und diese Elemente derart flexibilisiert, dass die individuell einstellbaren Diskretisierungselemente zusammen ein flexibles Arbeitsorgan bzw. Werkzeug darstellen. Realisierungs- und Umsetzungsbeispiele für die Flexibilisierung von Werkzeugsystemen für das Umformen und Spannen von Kunststoffen können in SIMON ET AL. (2013), SIMON ET AL. (2014a), SIMON ET AL. (2014b) und GÖTZ & SIMON (2014) nachvollzogen werden. Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz für die Flexibilisierung von Spritzgusswerkzeugen (HAGEMANN 2008).

### Generierung von Alternativen

Das Ergebnis des vorherigen Arbeitsschrittes sind mehrere Verbesserungsvorschläge je Rüsttätigkeit. Diese Verbesserungsvorschläge sollen die Entwickler im weiteren Verlauf bei der schnellen und effizienten Generierung von rüstoptimalen Lösungsalternativen unterstützen. Auf Basis der Verbesserungsvorschläge

und der Berücksichtigung von Wechselwirkungen zu anderen Zielgrößen, z. B. Maschinensicherheit, sind Gestaltungsalternativen zu entwickeln. Mit dem Methodenbaustein Szenario-Steckbrief kann der zielführende finanzielle Kostenrahmen einer Alternative abgeleitet werden, z. B. ist bei einem Kostenrahmen von ca. 5.000 € der Einsatz eines 6-DoF-Knickarmroboters für den Rüstvorgang als Lösungsalternative zu verwerfen. Für diese Tätigkeiten können zusätzlich die bekannten Hilfsmittel eingesetzt werden, z. B. Kreativitätstechniken. Das Ergebnis des Schrittes ist eine Vielzahl von Alternativen für die Verbesserung der identifizierten Schwachstellen unter Berücksichtigung weiterer Zielgrößen.

### *Bewertung der Alternativen*

Wie bereits dargestellt, ist die Formatflexibilität und die Rüstzeit als deren Indikator nur eine von mehreren Zielgrößen einer Entwicklung. Daher sind auch weitere Zielgrößen bei der Bewertung der Alternativen zu berücksichtigen. Hierfür können etablierte Bewertungsmethoden eingesetzt werden, z. B. eine multi-kriterielle Nutzwertanalyse oder ein Scoringmodell. Für die wirtschaftliche Bewertung der Alternativen hinsichtlich der Zielgröße Formatflexibilität kann das Wirtschaftlichkeitsmodell des Methodenbausteins Szenario-Steckbrief eingesetzt werden. Hierfür sind die verbleibenden Rüstzeiten der Alternativen zu prognostizieren. Anschließend sind die Alternativen weiter zu betrachten, welche das gesteckte Ziel der Rüstzeitreduktion erreichen. Darauf folgen eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit der verbleibenden Alternativen und die Auswahl des aus wirtschaftlicher Sicht sinnvollsten Gestaltungskonzeptes. Sollte keine Alternative die gesetzten Ziele erfüllen, so ist die Lösungsgenerierung nochmals durchzuführen.

Das Ergebnis der Arbeitsschritte des Gestaltungspools ist eine Maschinengestaltung, welche die Zielsetzung hinsichtlich Umrüstbarkeit und somit Formatflexibilität aus Sicht der Entwicklung erfüllt. Der Maschinenhersteller kann somit für die Umrüstbarkeit sorgen und das grundsätzliche Potenzial vorsehen, um einen Formatwechsel mit einem bestimmten Reibungsverlust durchzuführen. Die Verantwortung der Umsetzung, z. B. organisatorische Defizite zu vermeiden, verbleibt jedoch beim Betreiber der Verpackungsmaschine. Nachfolgend können auf Basis des Konzeptes die weiteren Stufen des Produktentwicklungsprozesses durchlaufen werden, u. a. Auslegung, FEM-Simulation, Erstellung der Fertigungszeichnungen. Bei diesen Tätigkeiten ist sicherzustellen, dass die Vorgaben der Konzeption umgesetzt werden, z. B. keine zusätzlichen Schraubenvarianten.

## 4 Vorgehen für die Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsmaschinen

### 4.8.3 Zusammenfassung und Integration in das Gesamtkonzept

Für den Entwickler einer formatflexibleren Verpackungsmaschine soll der Methodenbaustein Gestaltungspool bei der effizienten Gestaltung unterstützen. Die Nutzung des Gestaltungspools ist in der Gestaltungsphase eines Entwicklungsprozesses angedacht, vgl. Abbildung 37.

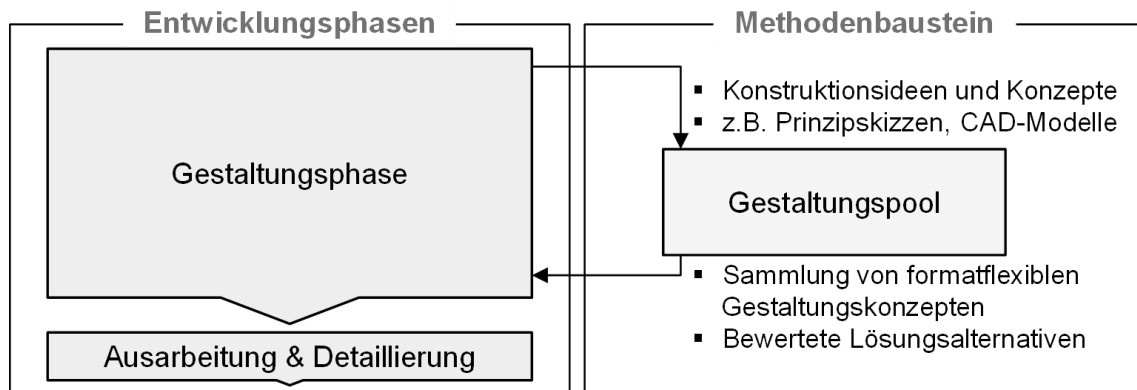


Abbildung 37: Integration des Methodenbausteins Gestaltungspool in die Entwicklungsphase Gestaltung

Als Eingangsinformationen benötigt dieser Methodenbaustein eine Beschreibung der Verpackungsmaschine bzw. einer zu flexibilisierenden Baugruppe in Form einer Referenzmaschine, als Konzeptzeichnungen oder als Prinzipskizzen. Das Ergebnis des Methodenbausteins sind mehrere bewertete Gestaltungskonzepte und die Auswahl einer Maschinengestaltung. Dies ist der Ausgangspunkt für die nachfolgende Entwicklungsphase der Ausarbeitung und Detaillierung.



## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

### 5.1 Überblick

Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität können zu einer Steigerung der Formatflexibilität beitragen. Dieses Potenzial wird aktuell unzureichend in Verpackungsmaschinen genutzt. Der Methodenbaustein Funktionspool hat das Ziel, Verfahren zur Verfügung zu stellen, welche eine höhere inhärente Flexibilität aufweisen. Eine umfassende Betrachtung aller Verarbeitungsprozesse der Verpackungstechnik übersteigt den Rahmen der vorliegenden Arbeit. Die Auswahl der betrachteten Verpackungsmaschinentypen und der Verpackungsvorgänge basiert auf einem morphologischen Ansatz, vgl. Abbildung 38. Es wurden die beiden Maschinentypen Thermoformverpackungsmaschinen und Faltschachtel-Aufrichtemaschinen für die weiteren Betrachtungen abgeleitet.

Kriterien	Ausprägungen				
Verpackungsstufe	Primärverpackung	Sekundärverpackung	Tertiärverpackung	Transportverpackung	Ladeeinheit
Werkstoff/ Packstoff	Kunststoff	Papier, Pappe, Karton	Metall	Glas	Holz
Vorfertigungsgrad	Hoher Vorfertigungsgrad		Mittlerer Vorfertigungsgrad	Niedriger Vorfertigungsgrad	
Hauptvorgang	Formen	Füllen	Verschließen	Einschlagen	
Verpackungsmaschinentyp	Thermoformverpackungsmaschine				
	Faltschachtel-Aufrichtemaschine				

Abbildung 38: Auswahl der betrachteten Verpackungsmaschinentypen anhand eines morphologischen Ansatzes

Je Verpackungsmaschinentyp wurde ein Hauptvorgang, welcher für die Steigerung der Formatflexibilität der jeweiligen Maschine entscheidend ist, ausgewählt. Für Thermoformverpackungsmaschinen ist dies das Verschließen. Das Formen wurde beim zweiten Maschinentyp, einer Faltschachtel-Aufrichtemaschine, ausgewählt. Die in Abbildung 38 hervorgehobenen Ausprägungen verdeutlichen, dass ein breites und repräsentatives Spektrum abgedeckt wird.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

### Thermoformverpackungsmaschinen

Eine Thermoform-, -füll- und -verschließmaschine ist als eine „(...) Maschine (definiert), auf der eine warmverformbare Folienbahn erhitzt und durch Druck und/oder Vakuum verformt, anschließend von oben gefüllt, mit Deckfolie oder einem aus einem Magazin zugeführten Deckel verschlossen und schließlich abgeschnitten wird, um Einzelpackungen herzustellen“ (DIN EN 415-1). In der industriellen Praxis werden solche Verpackungsmaschinen zumeist als Thermoform- bzw. Tiefziehverpackungsmaschinen benannt. Im weiteren Verlauf der schriftlichen Ausarbeitung wird eine solche Maschine als Thermoformverpackungsmaschine bezeichnet. Diese Maschinen stellen zumeist Primärverpackungen her. Daher stehen diese Verpackungen in einem direkten Kontakt zum Kunden, sodass die Treiber der Variation der Füllmenge und die marketinggetriebene Diversifikation zu einem steigenden Bedarf an Formatflexibilität führen. Wie aus der o. g. Definition deutlich wird, umfasst eine Thermoformverpackungsmaschine die Prozessschritte Formen der Unterfolie, das Befüllen der Verpackung, das Verschließen der Verpackung mittels Oberfolie sowie das Trennen der Packung aus dem Folienverbund, vgl. Abbildung 39.

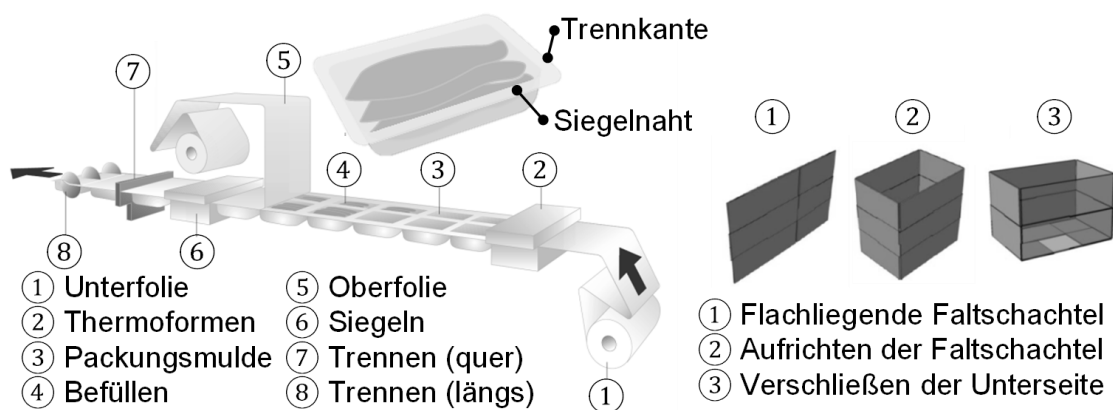


Abbildung 39: Prozessschritte einer Thermoformverpackungsmaschine (links) in Anlehnung an MULTIVAC (2008) sowie Prozessschritte einer Faltschachtel-Aufrichtemaschine bis zum Befüllen eines FEFCO-Typs 0201 (rechts)

Mit diesen Prozessschritten stellt eine Thermoformverpackungsmaschine ein repräsentatives Beispiel für horizontale und flächige Applikationen dar. Weitere Beispiele mit ähnlichen Prozessschritten sind Verschließmaschine für formstabile Behälter, wie Traysealer oder Schalenverschleißautomat (DIN EN 415-1) sowie Becherfüll- und -verschließmaschinen (DIN EN 415-1; NABENHAUER 2010, S. 100). Da alle diese Maschinen einen Prozess des Verschließens haben, wird

dieser im Rahmen der Ausführungen näher untersucht. Ferner wird ein großer Anteil von Fleisch- und Molkereiprodukten in horizontal-flächigen Verpackungsmaschinen abgepackt. Molkereiprodukte waren bspw. im Jahr 2014 die größte Gruppe an verpackten Nahrungsmitteln weltweit (CLAUS 2015). Somit ist eine hohe Relevanz des ausgewählten Verpackungsmaschinentyps sichergestellt.

### **Faltschachtel-Aufrichtemaschinen**

Faltschachtel-Aufrichtemaschinen werden oftmals in den Verpackungsstufen Sekundär-, Tertiär- bzw. Transportverpackung eingesetzt. Für diesen Maschinentyp wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Bezeichnungen verwendet bzw. vorgeschlagen, z. B. Faltschachtel-Aufrichtemaschinen (HENNIG & KÜNZEL 2006; BLEISCH ET AL. 2014, S. 158), Sammelpackungs-Aufrichtemaschinen (DIN EN 415-1) oder Kartonaufrichtmaschinen (DIN EN 415-1). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Bezeichnung Faltschachtel-Aufrichtemaschine verwendet. Diese ist oftmals Teil einer Verpackungsanlage für die Herstellung von Sammelpackungen. Darunter wird eine Packung verstanden, die mehrere gleichartige oder unterschiedliche Einzelpackungen als Packgut umfasst (BLEISCH ET AL. 2014, S. 413 f.). Für einen effizienten Logistikprozess ist die Minimierung des Leervolumens aus ökologischen und ökonomischen Gründen wichtig. Dies ist von besonderer Relevanz bei kundenindividuellen Sammelpackungen, z. B. im Versandhandel. Das durchschnittliche Leervolumen beträgt im Versandhandel ca. 70 % (LANGE 2013). Die Umsätze des Versandhandels in Deutschland sind von ca. 28 Mrd. € im Jahr 2006 auf ca. 49 Mrd. € im Jahr 2014 angestiegen (BÖCKMANN 2015). Der überwiegende Teil der Umsätze werden durch Online-Bestellungen generiert. Dies führt dazu, dass die Kunden noch preissensitiver reagieren und eine schnellere Zustellung der Ware erwarten. Daher wird das Zusammenfassen von Bestellungen, mit der gleichen füllgradoptimierten Verpackung, zu rüstoffreien Losen erschwert. Daraus resultiert in dieser exemplarischen Branche ein steigender Bedarf an formatflexiblen Lösungen.

In Faltschachtel-Aufrichtemaschinen werden vorbereitete Faltschachteln verarbeitet, die einen mittleren Vorfertigungsgrad aufweisen. Ein äußerst gängiges Faltschachtelformat ist der FEFCO-Typ 0201. Dieses wird in hohen Stückzahlen hergestellt und oftmals im preissensitiven Umfeld eingesetzt. Daher ist der zweite Maschinentyp eine Faltschachtel-Aufrichtemaschine für die Verarbeitung von Faltschachteln des FEFCO-Typ 0201. In Abbildung 39 sind die Prozessschritte bis zum Befüllen einer Faltschachtel dargestellt. Nach dem Befüllen folgt das Verschließen der Oberseite. Dies ist äquivalent zu dem Prozessschritt 3.

## **5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool**

---

Nachfolgend werden das Verschließen bei Thermoformverpackungsmaschinen (Abschnitt 5.2) und das Aufrichten bei Faltschachtel-Aufrichtemaschinen (Abschnitt 5.3) untersucht und der Methodenbaustein Funktionspool genutzt. Die Erkenntnisse werden in Abschnitt 5.4 zusammengefasst und ein Fazit gezogen.

### **5.2 Verschließen – Thermoformverpackungsmaschinen**

Für die Funktion Verschließen kann verfahrenstechnisch das Siegeln und das Schweißen eingesetzt werden. Beide werden den stoffschlüssigen Fügeverfahren zugeordnet, wobei Verbundfolien gesiegelt und zwei identische Monopackstoffe verschweißt werden (BLEISCH ET AL. 2011, S. 198). Trotz dieser eindeutigen Differenzierung werden beide Begriffe in der industriellen Praxis der Verpackungstechnik synonym verwendet. Der Begriff Siegeln ist in der Verpackungstechnik gebräuchlicher (NENTWIG 2006, S. 103). Im weiteren Verlauf wird aufgrund des Anwendungsbezugs der Begriff Siegeln gebraucht, wobei das stoffschlüssige Fügen von Verbundstoffen und Monopackstoffen adressiert wird.

#### **5.2.1 Schritt 1: Initialisierung**

In einer Thermoformverpackungsmaschine sind für die Herstellung einer Verpackung zwei bahnförmige Packmittel stoffschlüssig zu verbinden. Der untere Fügepartner ist die sogenannte Unterfolie bzw. -bahn, aus welcher vor dem Siegelvorgang mittels Thermoformen eine Verpackungsmulde hergestellt wurde. Nach dem Befüllvorgang ist diese Verpackungsmulde mit der zumeist ebenen sogenannten Oberfolie bzw. -bahn zu verschließen. Die zweidimensionale Geometrie der Siegelnahtkontur ist unmittelbar von der Geometrie der Verpackung abhängig. Daher ist das Verschließen für die Realisierung einer formatflexiblen Thermoformverpackungsmaschine entscheidend. In der industriellen Praxis haben einige Betreiber dieser Maschinen einen sehr hohen Flexibilitätsbedarf. Daher werden in diesen Fällen Thermoformverpackungsmaschinen teilweise mit mehreren Form-, Siegel- und Trennstationen ausgestattet (MULTIVAC 2012, SCHMID 2014). Dies führt neben deutlich höheren Herstellungs- und Anschaffungskosten auch zu einer Vergrößerung der benötigten Aufstellfläche. Daher wurde die Funktion Verschließen für die hiesige Betrachtung ausgewählt.

Das dauerbeheizte Wärmekontaktsiegelverfahren ist für die Realisierung des Siegelprozesses in der Verpackungstechnik (NENTWIG 2006, S. 103) und insbesondere bei Thermoformverpackungsmaschinen das dominierende Verfahren.

Die Temperatur des Siegelwerkzeuges wird möglichst konstant auf die einstellbare Siegeltemperatur von ca. 110–230 °C geregelt. Diese hohen Temperaturen in Kombination mit der großen thermischen Masse der Siegelwerkzeuge verursachen bei einem Formatwechsel lange Aufheiz- und Abkühlzeiten. Zumeist sind die eingesetzten Werkzeuge als Rahmensiegelplatten gestaltet. Diese sind geometriegebunden und signalisieren das niedrige Niveau an inhärenter Flexibilität. Das Prinzip des Wärmekontaktsiegelverfahrens beruht auf dem physikalischen Effekt der Wärmeleitung. Die Wärmeenergie wird auf der oberen Seite des oberen Fügepartners in die Fügezone eingebracht. Von unten wirkt ein Gegenhalter um den notwendigen Fügedruck aufzubringen. Die Fügepartner werden aufgeschmolzen und unter Druck im hochviskosen Zustand sollen sich die Makromoleküle an den Grenzflächen durchdringen, um eine stoffschlüssige Verbindung zu realisieren (FAHRENWALDT & SCHULER 2011, S. 143; BONTEN 2014, S. 333).

Die *Prozess- und Flexibilitätsanforderungen* werden nachfolgend charakterisiert. Die Prozessanforderungen resultieren aus den Produkteigenschaften, im vorliegenden Falle der Verpackung. Aufgrund der unzähligen Anwendungsfälle werden typische Charakteristika aufgezeigt. Eine Siegelnaht ist im Gegensatz zu einem Stumpfstoß als Überlappstoß ausgeprägt, da die beiden Fügepartner sich flächig überlappen. Die Siegelnähte sind zweidimensional und flächig, vgl. Abbildung 40. Um eine dichte Naht zu erhalten, ist die Kontur geschlossen.

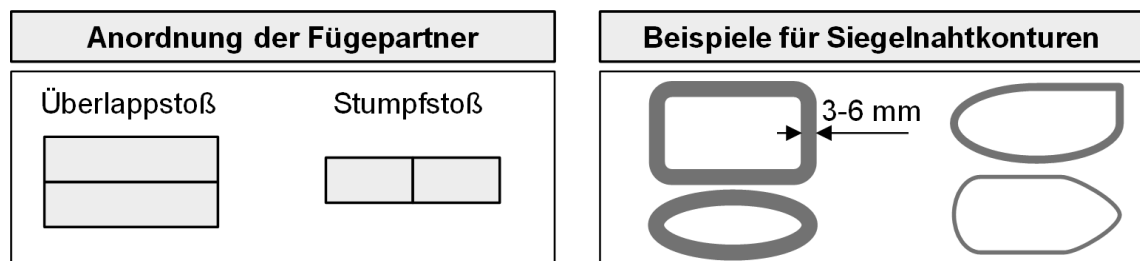


Abbildung 40: Anordnung der Fügepartner (links) und Beispiele für unterschiedliche Geometrien der Siegelnahtkonturen (rechts)

Im Hinblick auf das Verarbeitungsgut, im vorliegenden Fall die beiden Fügepartner, ist die Heterogenität der Eigenschaftsausprägungen sehr groß. Typischerweise haben die Fügepartner eine Materialstärke von weniger als 1 mm. Der Aufbau der Fügepartner ist heterogen. Es kann zwischen Mono- und Verbundfolien unterschieden werden, wobei in der Industrie überwiegend Verbundfolien eingesetzt werden. Die Verbundfolien sind aus mehreren unterschiedlichen Schichten aufgebaut (BLEISCH ET AL. 2014, S. 537 f.). Diese Schichten unterscheiden sich hinsichtlich des Werkstoffes und der Materialstärke. Typische Werkstoffe sind PE als Siegelmedium (NENTWIG 2006, S. 106) in Kombination

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

---

mit einer Trägerschicht aus z. B. Polyethylenterephthalat (PET), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) (BLEISCH ET AL. 2014, S. 537 f.). Ferner werden weitere Schichten für die Funktionserfüllung eingesetzt, z. B. Haftvermittler und Ethylen-Vinylalkohol-Copolymer (EVOH) oder Aluminium als Barrierschicht (BLEISCH ET AL. 2014, S. 537 f.; BERNDT & SELLSCHOPF 2011, S. 90).

Die Siegelnahtqualität, als eine entscheidende Anforderung, hat unterschiedliche Ausprägungen, u. a. Siegelnahtfestigkeit, Dichtigkeit und optische Güte (MAJSCHAK 2008). Die Siegelnahtfestigkeit beschreibt den Widerstand der Siegelnaht gegen mechanische Beanspruchung (BLEISCH ET AL. 2011, S. 201). Oftmals soll die Verpackung an der Siegelnaht geöffnet werden können. Verpackungen, die vom Konsumenten von Hand geöffnet werden können, werden als peelbare Verpackungen bezeichnet (HIRTH 2012). Beim Aufbringen einer Zugkraft löst sich die Ober- von der Unterfolie in der Fügeebene. Da dies dem aktuellen Trend nach Convenience folgt, nimmt der Anteil der peelbaren Verpackungen deutlich zu. Im Bereich der peelbaren Verpackungen werden noch weitere Öffnungscharakteristiken unterschieden, z. B. soft peel oder easy peel. In Tabelle 3 sind die Bereiche der Siegelnahtfestigkeit und die zugehörigen Bezeichnungen aufgeführt. Diese Bezeichnungen sind allerdings nicht vereinheitlicht, sodass eine begriffliche Heterogenität festzustellen ist.

*Tabelle 3: Öffnungscharakteristika von Verpackungen nach STARK (2012)*

<b>Bezeichnung</b>	<b>Siegelnahtfestigkeit</b>	<b>Öffnungscharakteristik</b>
soft peel	(1)-4-6 N/15 mm	Naht schwach und mühelos zu öffnen
easy peel	6-10 N/15 mm	Naht ohne Materialriss leicht zu öffnen
peel	10-15 N/15 mm	Naht nahezu ohne Materialriss zu öffnen
Festverschluss	> 15 N/15 mm	Materialriss, zerstörungsfrei untrennbar

Die Siegelnahtfestigkeit ist gemäß DIN 55529 zu ermitteln. Diese bezieht sich auf eine 15 mm lange Siegelnaht und ist daher nur unter Einschränkungen auf das Öffnen der gesamten Verpackung durch einen Konsumenten geeignet. Hierfür sind Abziehuntersuchungen der gesamten, geschlossenen Verpackung besser geeignet (IVLV 106/2011). Außerdem ist für die Beurteilung der Siegelnaht entscheidend, dass diese über die gesamte Siegelnahtkontur definierte Festigkeiten aufweist. Oftmals ist diese Anforderung mit einer Homogenität der Siegelnahtfestigkeit verbunden. Aktuell wird ein gutes Öffnungsverhalten zumeist über geometrische Merkmale bei der Gestaltung der Siegelnahtkontur realisiert. Zum Beispiel wird ein verbessertes Öffnungsverhalten mit einer Aufziehflasche erreicht (IVLV 106/2011).

Unabhängig von der Öffnungscharakteristik ist die Dichtigkeit eine entscheidende Eigenschaft für die Schutzfunktion einer Verpackung, um einen Füllgutaustritt bzw. einem Eintritt von bspw. Sauerstoff zu verhindern. Eine gute Siegelnahtfestigkeit ist keine Garantie für eine lückenlose Siegelnahtintegrität (NENTWIG 2006, S. 108). Für die Überprüfung der Dichtigkeit können eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren eingesetzt werden, z. B. Differenzdruckmethode oder die Spürgasdetektion (DIN EN 13185, VDMA 2006, IVLV 102/2010). Bei Verkaufsverpackungen ist ebenfalls die optische Güte der Siegelnaht wichtig (MAJSCHAK 2008). Quantitative Prüfverfahren sind nicht bekannt. Verbrennungen oder weitere Ungenzen sind für den Käufer ein Indikator für ein nicht qualitätsgerechtes Produkt, welches im Verkaufsregal zurückgelassen wird.

### 5.2.2 Schritt 2: Ideengenerierung und -bewertung

Zunächst wird die grundsätzliche Funktionsweise anhand des Eingangs- und Ausgangszustandes beschrieben. Im Eingangszustand liegen zwei separate Fügepartner vor, welche im Ausgangszustand stoffschlüssig verbunden sind. Physikalisch müssen für diese Form der stoffschlüssigen Verbindung die Siegelschichten lokal aufgeschmolzen werden, d. h. die Werkstofftemperatur muss oberhalb der Schmelztemperatur und unterhalb der Zersetzungstemperatur liegen (EYERER ET AL. 2008, S. 486). Ferner ist ein Siegeldruck notwendig, um die aufgeschmolzenen Schichten miteinander zu verbinden. Anschließend kühlt die entstandene Siegelnaht ab, bis die Schmelztemperatur unterschritten ist. Dies kann mit oder ohne zusätzliche Druckeinwirkung geschehen. Auf dieser Basis können eine Vielzahl von unterschiedlichen Technologien ermittelt werden, welche prinzipiell zum stoffschlüssigen Fügen, vgl. Schritt 1, einsetzbar sind.

Das Siegeln in der Verpackungstechnik weist sehr große Überschneidungen zum Kunststoffschweißen in anderen Branchen auf. Daher können die dortigen Vorarbeiten genutzt werden. Als Informationsquelle ist allgemeine Fachliteratur herangezogen worden (u. a. MICHEL 1999, GREWELL ET AL. 2003, POTENTE 2004, GREWELL & BENATAR 2007, EYERER ET AL. 2008, FAHRENWALDT & SCHULER 2011, BONTEN 2014). Die ermittelten Verfahren wurden hinsichtlich der beschriebenen Prozessanforderungen bewertet. Ferner wurde die Formatflexibilität als entscheidende Bewertungsgröße betrachtet. Ein Auszug der Bewertungsmatrix ist in Tabelle 4 dargestellt. Die Beschreibung der Funktionsweise der einzelnen Verfahren kann der o. g. Literatur entnommen werden.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

Tabelle 4: Auszug der Bewertungsmatrix von Siegel- bzw. Schweißverfahren für eine Steigerung der Formatflexibilität

Verfahren	Bewertungs- kriterien	Formatflexibilität			Prozess- anfor- derungen
		format- unspez. Wkz.	Kinemati- sierung	Parametri- sierung	
Schweißen durch feste Körper					
Indirektes Heizelementschweißen					
• Dauerbeheiztes Siegelwerkzeug					
• Flächensiegeln		◐	○	○	◐
• Rahmensiegeln		○	○	○	●
• Impulsbeheiztes Siegelwerkzeug					
		◐	●	●	?
Schweißen durch Bewegung					
Reibschweißen					
• Rotationsschweißen		⊖	⊖	⊖ ←	○
Schweißen durch elektrischen Strom					
Hochfrequenzschweißen		⊖	⊖	⊖ ←	○
Schweißen durch Strahlung					
Laserstrahlschweißen		●	●	●	?
Schweißen durch Gas					
Wargassschweißen		⊖	⊖	⊖ ←	○
Legende					
erfüllt ● nicht erfüllt ○ teilweise erfüllt ◐ nicht bekannt ? keine Betrachtung ⊖					

Viele der analysierten Verfahren scheiden für die weitere Betrachtung aus, da diese die im ersten Schritt benannten Anforderungen nicht erfüllen. Das Hochfrequenzschweißen ist bspw. für den Anwendungsfall nach aktuellem Kenntnisstand als ungeeignet einzustufen. Mit diesem Verfahren können nur bipolare Werkstoffe erwärmt werden, wie z. B. PVC oder ABS (HERZAU & HERZAU 2011, S. 172). Als Siegelschicht kommt in der Verpackungstechnik größtenteils PE zum Einsatz (NENTWIG 2006, S. 106). Für die Erwärmungsfähigkeit eines Polymers im Hochfrequenzfeld ist der werkstoffspezifische dielektrische Verlustfaktor entscheidend (MICHEL 1999, S. 7-4). Das unpolare Polymer PE hat nur einen dielektrischen Verlustfaktor von 0,0003 bis 0,0005, wohingegen PVC einen Verlustfaktor von 0,01 bis 0,1 aufweist (EYERER ET AL. 2008, S. 493). Die Prozessanforderungen scheinen aus diesem Grund nicht erreichbar und daher scheidet diese Technologie für eine weitere Betrachtung aus. Eine Bewertung des Potenzials der Formatflexibilität ist somit nicht zweckmäßig.



Das dauerbeheizte Wärmekontaktverfahren ist die Siegeltechnologie, welche in der industriellen Praxis der Verpackungstechnik am weitesten verbreitet ist (NENTWIG 2006, S. 104). Verfahrenstechnisch kann dies auch als indirektes Heizelementeschweißen bezeichnet werden (POTENTE 2004, S. 107; BONTEN 2014, S. 334). Aufgrund des flächendeckenden Einsatzes dieser Technologie wird von der Erfüllung der Prozessanforderungen ausgegangen. Hinsichtlich der Siegelwerkzeuggestaltung für Thermoformverpackungsmaschinen wird zwischen einem Flächen- und einem Rahmensiegeln unterschieden. Diese Varianten sind hinsichtlich der Formatflexibilität differenziert zu bewerten. Das Flächensiegeln wird mit einem Werkzeug realisiert, welches die beheizte Fläche der gesamten Abzugslänge umfasst. Nur im Falle einer Änderung der Abzugslänge ist das Siegelwerkzeug auszutauschen. Für eine Änderung der Siegelnahtkontur ist in diesem Falle der Gegenhalter auszuwechseln. Jedoch weist diese formatunspezifische Gestaltung des beheizten Siegelwerkzeuges den gravierenden Nachteil auf, dass während des Siegelprozesses Wärmeenergie in das Packgut und die Oberfolie eingebracht wird. Daher wird trotz einer Reduzierung der Formatflexibilität zumeist das Rahmensiegeln eingesetzt. Ein Rahmensiegelwerkzeug ist ein geometriespezifisches Arbeitsorgan. Daher ist bei einem Formatwechsel ein kosten- und zeitaufwendiger Austausch nötig. Beide Verfahrensvarianten können weder kinematisiert und daher hinsichtlich der Formatflexibilität auch nicht parametrisiert werden. Verfahrenseitig wird daher kein Potenzial zur Steigerung der Formatflexibilität gesehen. Aus diesem Grund und da bereits bekannt ist, dass die Prozessanforderungen erfüllt werden können, ist eine weitere Betrachtung im Rahmen der Schritte 3 und 4 nicht notwendig.

Auf Basis der durchgeführten Analyse sind zwei Verfahren für eine Steigerung der Formatflexibilität als relevant zu bewerten. Das impulsbeheizte Wärmekontaktsiegeln und das Laserstrahlsiegeln erfüllen nahezu alle Kriterien der Bewertung der Formatflexibilität. Inwiefern diese auch die Prozessanforderungen erfüllen, ist allerdings unklar. Daher werden diese Verfahren im folgenden Schritt 3 detaillierter dargestellt und analysiert.

### 5.2.3 Schritt 3: Technologiebasisstudie

#### **Impulsbeheiztes Wärmekontaktsiegeln**

Das impulsbeheizte Wärmekontaktsiegeln (Kurzform: Impulssiegeln) unterscheidet sich vom dauerbeheizten Verfahren hinsichtlich der Zeitspanne der Wärmeerzeugung und -einbringung. In der Literatur wird dies auch als Wärme-

## **5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool**

---

impulssiegeln bezeichnet und stellt ein eingesetztes Verfahren in der Verpackungstechnik dar (HERZAU & HERZAU 2011, S. 171; BLEISCH ET AL. 2011, S. 201 f.). Im Gegensatz zum dauerbeheizten Verfahren, erreicht das Siegelwerkzeug die für den Prozess notwendige Temperatur nur während des eigentlichen Siegelprozesses (NENTWIG 2006, S. 105). Vor und nach dem Siegelprozess liegt ein auf Umgebungstemperatur befindliches Werkzeug vor. Diese dynamische Erwärmungs- und Abkühlcharakteristik erfordert niedrige thermische Massen.

Die technische Umsetzung, der für dieses Verfahren entscheidende thermische Charakteristik, basiert auf zwei Ansätzen. Die meisten Impulssiegelwerkzeuge haben metallische Heizbänder, z. B. von (JOKE 2016, TOSS 2016). Zum Beispiel wird Chrom-Nickel als Werkstoff für die Heizbänder eingesetzt (POTENTE 2004, S. 153). Derartige Impulssiegelwerkzeuge werden größtenteils für das Herstellen von linearen Siegelnähten eingesetzt. Das dichte Siegeln von geschlossenen Konturen muss zweistufig erfolgen, da sich die Heizbänder nicht kreuzen dürfen. Daher scheidet diese Variante für eine weitere Betrachtung aus.

Eine Alternative zu diesen metallischen Heizbändern stellt der Einsatz von glas-metallischen Werkstoffen als Heizbahnen dar (ROPEX 2016). Die sogenannte CIRUS-Serie (Cermet-Integrated-Resistive-Ultrafast-Sensorless-Heaters) der Firma ROPEX Industrie-Elektronik GmbH nutzt diesen Aufbau für die Herstellung von Impulssiegelwerkzeugen. Die nachfolgenden Informationen sind in RÖBLE (2009) und ROPEX (2016) nachzulesen. Die Impulssiegelwerkzeuge bestehen u. a. aus einem Substrat aus Edelstahl. Auf dieses Substrat ist eine Isolationsschicht aus glas-keramischen Werkstoffen aufgesintert. Auf diese Schicht folgen mehrere weitere Schichten, z. B. glas-metallische und metallische Schichten als Heizbahnen für die Wärmeerzeugung sowie Silberschichten als Stromleiter. Impulssiegelwerkzeuge mit diesem keramischen Schichtaufbau weisen eine hohe thermische Dynamik auf, welche auf den nur 35 bis 40 µm dicken Heizschichten beruht. Aktuell werden mit dieser Technologie ebenfalls hauptsächlich lineare Siegelnähte hergestellt, z. B. bei dem Siegeln von Säcken. Einzelne Applikationen, die zweidimensionale Siegelnähte benötigen, sind bekannt. Jedoch sind diese Siegelnahtkonturen nicht geschlossen. Vorteile dieser keramischen Siegelwerkzeuge anstelle der metallischen Heizbänder wird in einer verbesserten Wärmeabgabe, in kürzeren Aufheizzeiten, in einer besseren Regelbarkeit aufgrund der geringeren thermischen Masse und der Verschleißfestigkeit gesehen (BLEISCH ET AL. 2011, S. 201). Die Entkopplung der Wärmeenergie- und der Druckeinbringung ist ein weiterer Vorteil des Impulssiegeln gegenüber dem dauerbeheizten Verfahren (POTENTE 2004, S. 153).

Nach der grundsätzlichen Beschreibung der glas-keramischen Impulssiegelwerkzeuge werden im Folgenden die Potenziale im Hinblick auf eine Steigerung der Formatflexibilität dargelegt. Der Schichtaufbau dieser Werkzeuge ermöglicht mehrere Heizbahnen übereinander und somit mehrere Siegelkonturen auf einem flächigen Werkzeug hinterlegen zu können. Diese Siegelnahtkonturen können formatabhängig bestromt werden, sodass mit einem Siegelwerkzeug mehrere Formate verschlossen werden können. Ein Austausch des Siegelwerkzeuges im Falle eines Formatwechsels ist somit nicht zwingend notwendig, solange die benötigte Siegelnahtkontur bereits auf dem Werkzeug hinterlegt ist.

Befinden sich mehrere Siegelnahtkonturen auf einem Werkzeug, so führt dies zu einer linien- und/oder punktförmigen Überlagerung einzelner Heizbahnen. Trotz dieser übereinanderliegenden Heizbahnen müssen die definierte Wärmeeinbringung und die damit verbundene Siegelnahtqualität gewährleistet sein. Die geringe Aufheiz- und Abkühlzeit der Impulssiegelwerkzeuge ist ein weiterer Vorteil dieser Technologie im Hinblick auf die Formatflexibilität im Vergleich zum dauerbeheizten Wärmekontaktverfahren. Dieser Vorteil ist vom Multi-Kontur-Ansatz unabhängig. Aufgrund der heutigen Verbreitung dieser Technologie ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die Prozessanforderungen erfüllt werden können. Allerdings fehlen Erkenntnisse zum Multi-Kontur-Aufbau, wie z. B. übereinanderliegende Heizbahnen die Siegelnahtqualität beeinflussen. Diese Potenziale in Kombination mit den fehlenden Informationen begründen eine weitere Betrachtung im Rahmen einer erweiterten Technologiestudie.

### **Laserstrahlsiegeln**

Laserbasierte Verfahren werden in vielen Industriebereichen, z. B. Messtechnik sowie Informations- und Kommunikationstechnik und in der Materialbearbeitung in unterschiedlichsten Applikationen eingesetzt, u. a. Bohren, Beschriften (RUSSEK 2006, S. 3; BLIEDTNER ET AL. 2013, S. 13). Auch zum stoffschlüssigen Fügen von thermoplastischen Kunststoffen ist der Laser geeignet und wird daher in diversen Applikationsfelder genutzt, z. B. Automobilindustrie (POPRAWE 2005, S. 270). Die Vorteile des Laserstrahlfügens sind im Vergleich zu anderen Verfahren u. a. die berührungslose Bearbeitung mit einem abnutzungsfreien Werkzeug, die geringe bis keine thermische oder mechanische Belastung sowie keine Erzeugung von Partikeln (RUSSEK 2006, S. 9). Weiterführende Informationen zur Lasertechnik und insbesondere zum Laserstrahlfügen sind u. a. POPRAWE (2005), HÜGEL & GRAF (2009) und BLIEDTNER ET AL. (2013) zu entnehmen.

## **5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool**

---

Bereits im Jahr 2003 wurden diverse Einsatzpotenziale für die Laserstrahlbearbeitung in der Verpackungstechnik gesehen, jedoch auch die damaligen Hemmnisse, u. a. hohe Investitionskosten, aufgezeigt (MAJSCHAK 2003). Mittlerweile wird der Laserstrahl bereits mit gutem Erfolg in einigen Bereichen der Verpackungstechnik, insbesondere in der Packmittelherstellung, eingesetzt (BLEISCH ET AL. 2011, S. 430). In Thermoformverpackungsmaschinen ist kein kommerzieller Lasereinsatz für das stoffschlüssige Fügen bekannt.

Im Hinblick auf die Steigerung der Formatflexibilität werden die nachfolgend dargestellten Potenziale gesehen. Der Laserstrahl ist ein geometrieungebundenes Werkzeug, welches berührungslos Energie in Form von Strahlung in ein Werkstück einbringt. Für die beim Konturschweißen notwendige Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und der Bearbeitungsstelle können bspw. 6-DoF-Knickarm-Roboterkinematiken eingesetzt werden (BLIEDTNER ET AL. 2013, S. 152). Für das Quasisimultanschweißen werden Scanner verwendet (BLIEDTNER ET AL. 2013, S. 456). Durch den Einsatz dieser flexiblen Bewegungssysteme kann eine Kinematisierung und somit auch eine Parametrisierung abgebildet werden. Daher weist das Verfahren Laserstrahlsiegeln hinsichtlich der Formatflexibilität ein hohes Potenzial auf. Aus diesen Gründen sind die Ziele dieser Technologiebasisstudie die Aufbereitung und Analyse des veröffentlichten Wissens. Im Folgenden wird ein Auszug an wissenschaftlichen Arbeiten aufgezeigt, welche sich mit dem Laserstrahlfügen von Kunststoffen beschäftigen.

In BROWN ET AL. (2000) werden die Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie aufgezeigt. Die untersuchten oberen Fügepartner sind ein Polyamid (Nylon 66) und ein transparentes Verbundmaterial (keine Nennung des Werkstoffs). Der untere Fügepartner ist ein formstabiler Behälter, wobei der Werkstoff nicht genannt wird. Ein CO<sub>2</sub>-Laser wird eingesetzt und unterschiedliche Spanntechniken werden erprobt. Anhand von Dichtigkeitsprüfungen und der Messung der Siegelnahtfestigkeit wird der prinzipielle Beweis der Machbarkeit dargelegt.

Die experimentellen Untersuchungen in COELHO ET AL. (2009) werden an weißen und transparenten Folien aus PP und PE (10-100 µm dick) durchgeführt. Mit einem CO<sub>2</sub>-Laser (max. Laserleistung 2.700 W) können Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s erreicht werden. Die eingesetzte Spanntechnik zeigt, dass die Anwendung auf die Packmittelindustrie abzielt. Die hergestellten Siegelnähte werden optisch mit einem Mikroskop und mechanisch geprüft. Die gezeigten Ergebnisse werden als sehr vielversprechend und aussichtsreich bewertet. Es konnte gezeigt werden, dass ein fehlerhafter Kontakt der Fügepartner zu einem Durchtrennen des oberen Fügepartners führt.

Die in GHORBEL ET AL. (2009) dargelegten Erkenntnisse wurden mit dem Versuchsmaterial PP erzielt. Hierbei sind beide Fügepartner aus PP, wobei diese teilweise mit schwarzen Rußpigmenten versetzt waren. Dies erhöht die Absorptionsefähigkeit des Werkstoffes und vereinfacht den Fügeprozess. Eine Diodenlaserquelle mit einer maximalen Laserleistung von 120 W und einer Wellenlänge von 940 nm wird eingesetzt. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der Analyse der Struktur der Schweißnaht, z. B. Fehlerbilder. Die Auswirkungen der Variation der Laserleistung und der Schweißgeschwindigkeit wird aufgezeigt.

POLSTER (2009) möchte das stoffschlüssige Fügen zweier transparenter Bauteile ohne den Einsatz von Absorptionsmitteln ermöglichen. Dies soll mit einem angepassten Flächenleistungsdichtegradienten erfolgen. Für deren Erzeugung werden zwei Strahlführungskonzepte untersucht. Es werden vier unterschiedliche Laserquellen eingesetzt. Ein Diodenlaser (Wellenlänge 940 nm, maximale Laserleistung 70W), ein Nd:YAG-Laser (Wellenlänge 1.064 nm, maximale Laserleistung 6 W) ein Tm:YAG-Laser (Wellenlänge 2.013 nm, maximale Laserleistung 50 W) und ein CO<sub>2</sub>-Laser (Wellenlänge 10.600 nm, maximale Laserleistung 160 W) kommen zum Einsatz. Für die experimentellen Untersuchungen sind Proben aus den Werkstoffen Polycarbonat (PC) und Polypropylen (PP) verwendet worden. Mit beiden Konzepten ist ein qualitätsgerechtes Fügen möglich.

Der Fokus von DEVRIENT ET AL. (2011) ist das Schweißen von zwei transparenten Fügepartnern, die auch aus dem gleichen Werkstoff sein können. Für die praktischen Untersuchungen wird ein fasergeführter GaAs-Laser mit einer Wellenlänge von 936 nm und einer maximalen Laserleistung von 100 W eingesetzt. Eine neuartige Prozessführung wird dargestellt. Diese beruht auf einer speziellen Strahlformung und -führung sowie einer Modifikation des Temperaturfeldes mit einer Druckluftdüse. Die Werkstoffe PP und Polymethylmethacrylat (PMMA) wurden verarbeitet und die Resultate zeigen eine gute optische Güte auf.

BROWN ET AL. (2012) stellen die Erkenntnisse weiterer experimenteller Untersuchungen vor. Mit einem CO<sub>2</sub>-Laser (Laserleistung 50 W) und einem Galvanometerscanner können 12-15 Verpackungen je Minute gesiegelt werden. Der obere Fügepartner ist eine PE/PET-Verbundfolie (26 µm dick). Ein schwarzer PET-Behälter mit einer klaren PET-Schicht ist der untere Fügepartner. Die Folie wird nicht mechanisch auf den unteren Fügepartner gespannt, sondern ausschließlich über den Behälter gezogen. Somit würde der Bedarf an einer mechanischen Spanntechnik entfallen. In Summe wird wiederum das Einsatzpotenzial aufgezeigt. Es wird auch dargelegt, dass der gleiche Laserstrahl zum Trennen der Oberfolie genutzt werden könnte.

## **5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool**

---

Die Potenziale des Einsatzes eines lasergepumpte Faserlasers mit einer emittierenden Wellenlänge von 2.000 nm, maximale Laserleistung von 27 W, werden in MINGAREEV ET AL. (2012) dargelegt. Alle Versuchsmaterialien, z. B. PE, PMMA oder PP, waren undotiert und hatten eine Dicke von 1,6 mm. Die Laserquelle wurde gewählt, da die o. g. Materialien bei einer Wellenlänge von 2.000 nm eine deutlich höhere Absorption aufweisen als bei den üblichen Dioden- oder Faserlaserwellenlängen von ca. 1.000 nm. Das Laserstrahlstumpfstoß- und das Laserdurchstrahlschweißen wurden untersucht. Beim Stumpfstoßschweißen konnten vor allem mit den Werkstoffen PE und PP sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Wohingegen beim Laserdurchstrahlschweißen keine vollständig stoffschlüssige sondern formschlüssige Verbindungen hergestellt werden. Dies wird mit der niedrigen Durchdringung der Laserstrahlung bei den 1,6 mm dicken Fügepartnern begründet. Die Experimente zeigen das Potenzial von Laserquellen mit einer Wellenlänge von ca. 2.000 nm für das Fügen nicht dotierter Werkstoffe.

DOWDING ET AL. (2013) fokussieren sich in dieser Machbarkeitsstudie auf eine Werkstoffpaarung. Eine 75 µm dicke LLDPE-Folie (engl.: Linear Low Density Polyethylene, dt.: lineares Polyethylen niederer Dichte), zusätzlich mit einer thermisch aktiven Schicht versehen (2-3 µm), als oberer Fügepartner und dem unteren Fügepartner, einem PP (640 µm), bilden die Anordnung der Fügepartner. Dazwischen wird noch eine thermisch reaktive Schicht eingebracht. Die Versuche werden mit einem CO<sub>2</sub>-Laser bei einer Scannergeschwindigkeit von 54,4 mm/s durchgeführt. Das Erzielen von guten Ergebnissen wird dargelegt.

Die experimentellen Untersuchungen des Laserstrahlfügens mit einem Diodenlaser, Wellenlänge 1685 nm, werden in JÄNCHEN (2014), JÄNCHEN ET AL. (2014) und JÄNCHEN & WENDT (2015) dargestellt. Verpackungsmaterialien, wie z. B. PET/PE, PET/Aluminium/PE, PS, werden stoffschlüssig gefügt. Anhand eines Vergleiches der erreichbaren Siegelnahtfestigkeit mit den Verfahren Wärmekontakt- und Ultraschallsiegeln wird die prinzipielle Machbarkeit dargelegt. Bei der Herstellung der lasergefügten Proben wurden die Fügepartner für das Aufbringen der Spannkraft zwischen zwei Glasplatten positioniert. Für das Siegeln geformter Packmittel, z. B. thermogeformte Schalen, ist dies keine flexible Spanntechnik.

Auf Basis dieser Erkenntnisse ist das Laserstrahlfügen für den Einsatz in Thermoformverpackungsmaschinen sehr vielversprechend. Allerdings sind folgende Handlungsfelder identifizierbar. Da in der Verpackungstechnik spezielle Werkstoffkombinationen zu verarbeiten sind, können die Erkenntnisse aus anderen Industriebereichen nur in Grenzen übertragen werden, da bspw. die optischen Eigenschaften der Werkstoffe von der Laserstrahlwellenlänge abhängen.

Ein Beispiel ist der wellenlängenspezifische Absorptionsgrad. Aus diesem Grund ist unklar, inwiefern die Prozessanforderungen erfüllt werden können. Bis auf die Ausführungen von JÄNCHEN (2014), JÄNCHEN ET AL. (2014) sowie JÄNCHEN & WENDT (2015) werden bei den weiteren Vorarbeiten fast ausschließlich Monomaterialien miteinander gefügt. Jedoch sind die meisten Verarbeitungsgüter Verbundfolien. Daher können die bisherigen Erkenntnisse nicht allgemeingültig übertragen werden. Der Einsatz von Additiven für die Verbesserung der optischen Eigenschaften ist in der Verpackungstechnik aufgrund der Migrationsgefahr in das Packgut sowie der zusätzlichen Kosten keine Alternative.

Neben der Einbringung der Wärmeenergie ist das Aufbringen des Fügedrucks entscheidend. Die eingesetzte Spanntechnik, darf die inhärente Flexibilität des Werkzeuges Laserstrahl nicht reduzieren. Die in BROWN ET AL. (2012) dargestellte und in JÄNCHEN ET AL. (2014) prognostizierte Möglichkeit mit der gleichen Laserquelle den Trennvorgang durchzuführen, ist für den Einsatz in Thermoformverpackungsmaschinen äußerst interessant. Dies würde u. a. zu einer Verringerung der Aufstellfläche führen, da die beiden aktuell getrennten Stationen für das Siegeln und Trennen in einer Einheit kombiniert werden könnten. Zudem würde dies teilweise die zusätzlichen Investitionskosten eines Lasersystems kompensieren. Daher ist der Laser äußerst interessant für eine Anwendung in einer Thermoformverpackungsmaschine. Dies begründet eine weitere Betrachtung im Rahmen einer erweiterten Technologiestudie.

### **5.2.4 Schritt 4: Erweiterte Technologiestudie – Impuls- und Laserstrahlsiegeln**

#### **Impulsbeheiztes Wärmekontaktsiegeln**

Der Fokus dieser Technologiestudie ist die Untersuchung von Werkzeugen für das impulsbeheizte Wärmekontaktsiegeln. Die Werkzeuge sind aus mehreren glas-metallischen Schichten aufgebaut. Ferner sind die Abhängigkeiten zwischen dem flexibilitätssteigernden Multi-Kontur-Ansatz und der Erfüllung der Prozessanforderungen zu ermitteln.

#### *Untersuchungsobjekte und Versuchsaufbau*

Für die experimentellen Untersuchungen standen zwei Multi-Kontur-Impulssiegelwerkzeuge (MKISW) zur Verfügung. Für das stoffschlüssige Fügen einer geschlossenen Siegelnahtkontur werden zwei separate Heizbahnen benötigt, da die Stromquelle und -senke nicht an der gleichen Stelle sein können.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

Auf den beiden MKISW sind daher drei Heizbahnen aufgebracht. Somit können zwei geschlossene Konturen gesiegelt werden. Die Abbildung 41 zeigt den Verlauf der Heizbahnen auf den MKISWs. Für die Herstellung der größeren Siegelnaht 1 mit den Abmessungen 70 x 90 mm<sup>2</sup> sind die Heizbahnen A-A2 und B-B zu bestromen. Die kleinere Siegelnaht 2 hat die Maße 60 x 60 mm<sup>2</sup> und wird aus den Heizbahnen A-A1 und B-B gebildet. Die Heizbahnen sind 3 mm breit. Beide MKISWs haben das gleiche zweidimensionale Heizbahnlayout. Hinsichtlich ihres Schichtaufbaus unterscheiden sich die beiden MKISWs.

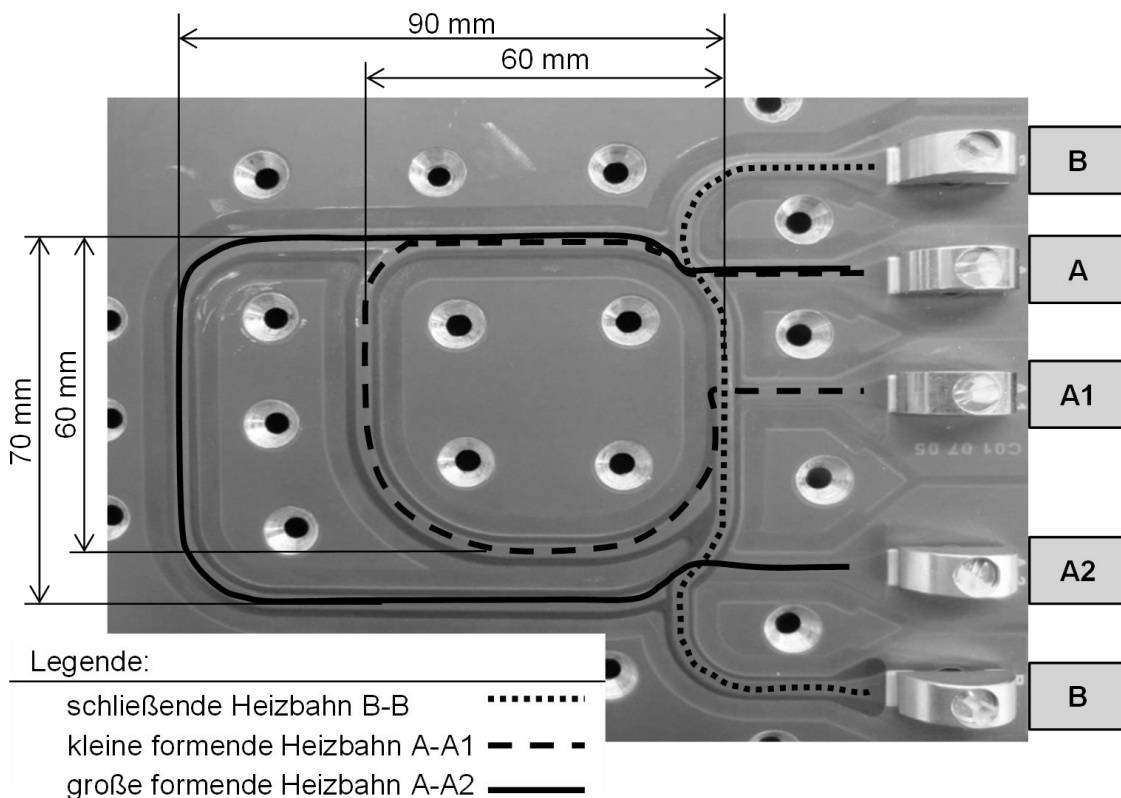


Abbildung 41: Heizbahnlayout der beiden MKISWs

Aufgrund des Multi-Kontur-Ansatzes gibt es Segmente, an welchen sich Heizbahnen kreuzen oder überlappen. Es war zu überprüfen, ob an diesen Stellen qualitätsgerecht gesiegelt werden kann. Diese Punkte sind bei den beiden MKISWs unterschiedlich aufgebaut. Im Vorfeld der Werkzeugherstellung wurden diese Punkte definiert und in Klassen kategorisiert, vgl. Abbildung 42. Aufgrund der Unklarheit der Auswirkungen dieser beschriebenen Bereiche werden diese Punkte im nachfolgenden Verlauf als kritische Punkte bezeichnet. Im Verlauf dieser Technologiestudie sollte ferner erarbeitet werden, welches MKISW und somit welcher Schichtaufbau besser geeignet ist. Dies soll sicherstellen, dass die Erkenntnisse auf die Gestaltung weiterer MKISW übertragen werden können.



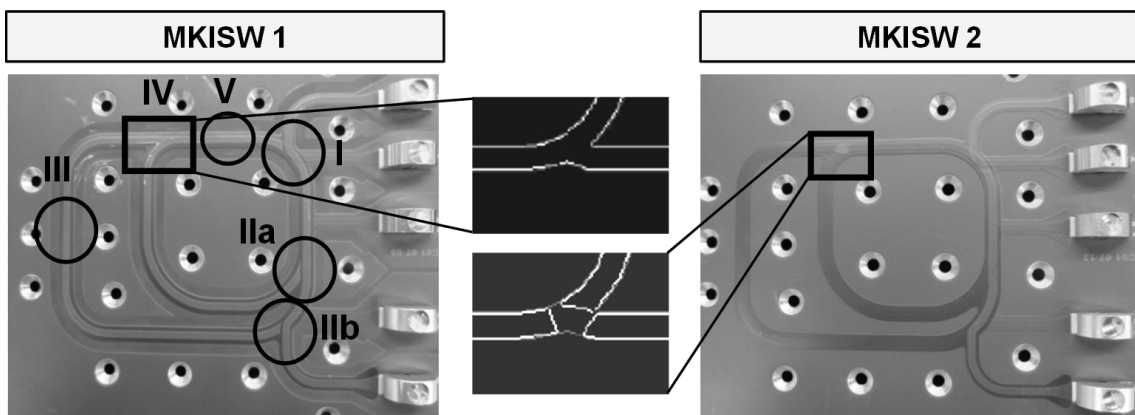
## 5.2 Verschließen – Thermoformverpackungsmaschinen

Die Positionen dieser kritischen Punkte auf den MKISW kann der Abbildung 43 entnommen werden. Zusätzlich ist in Abbildung 43 ein Beispiel für einen Unterschied im Schichtaufbau der MKISW an der Position IV dargestellt.

Klasse	Beschreibung	Skizze	Beispiel
A	Kreuzungspunkt: durchgängig gezeichnete Linien sind Heizleiter, gestrichelte Linie sind Stromleiter		
B	T-förmiger Kreuzungspunkt von zwei unterschiedlichen Heizleitern		
C	Einschichtiger Heizleiter		
D	T-förmige Aufteilung eines Heizleiters in zwei Heizleiter		
E	Zwei Heizleiter übereinander, getrennt durch eine Isolationsschicht		

Bildquelle: Ropex Industrie-Elektronik GmbH

Abbildung 42: Kategorisierung der kritischen Punkte auf einem MKISW



Bildquelle: Ropex Industrie-Elektronik GmbH

Abbildung 43: Lokalisierung der kritischen Punkte auf den MKISW (links) und Darstellung eines Beispiels für einen unterschiedlichen Schichtaufbau an einer kritischen Stelle (mitte und rechts)

Für die Durchführung der Untersuchungen stand folgender Versuchsstand zur Verfügung. Dieser besteht aus einem Pneumatikzylinder, der den notwendigen Siegeldruck aufbringt. Ein MKISW ist zusammen mit einem Aluminium-Kühlkörper am oberen und verfahrbaren Teil des Versuchsstandes montiert.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

---

Der Gegenhalter ist ein Silikonprofil und eine Aufnahme für thermogeformte Verpackungen. Ferner wird der Pneumatikzylinder mit einem Fußtaster verfahren und die für den Siegelprozess notwendigen Stromimpulse manuell per Knopfdruck ausgelöst. Je Heizbahn steht ein Regelgerät UPT-640 des Herstellers ROPEX Industrie-Elektronik GmbH zur Verfügung. An diesem Regelgerät können diverse Einstellungen, wie z. B. Siegelzeit und -temperatur, vorgenommen werden. In Summe wurden aus den vielen Einflussgrößen auf den Siegelprozess vier Faktoren ausgewählt, die einen entscheidenden Einfluss auf die Siegelnahtqualität haben. Der Siegeldruck, die Siegelzeit, die Siegeltemperatur und die Härte des Gegenhalters aus Silikon beeinflussen das Prozessergebnis entscheidend. Die Wertebereiche der Faktoren können der Tabelle 5 entnommen werden.

*Tabelle 5: Wertebereiche der vier Versuchsfaktoren*

<b>Parameter</b>	<b>Bereich</b>
Druck im Pneumatikzylinder	2 – 5 bar
Siegeltemperatur	10 – 300 °C
Zeit	0,01 – 5,00 s
Härte Silikonprofil	60, 70 und 80 Shore

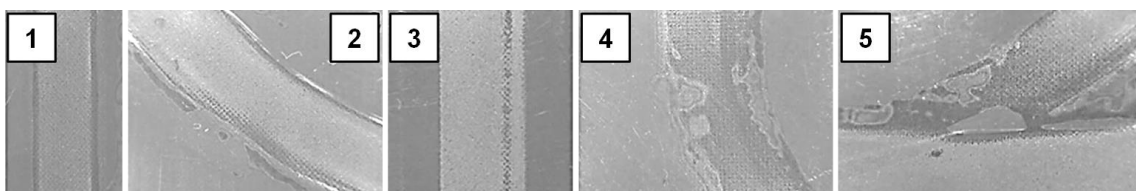
### *Vorversuche zur Temperaturverteilung*

Da die Siegelwerkzeugtemperatur einen Einfluss auf die Siegelnahtqualität hat und die Auswirkungen des Multi-Kontur-Ansatzes auf die Temperaturinhomogenitäten nicht bekannt waren, wurden Vorversuche durchgeführt. Die Temperaturmessungen wurden berührend mittels Kontaktmessungen und berührungslos mittels Wärmebildkamera durchgeführt. Für die Kontaktmessung stand das Ahlborn Messsystem Almemo 2890-9 und der Temperaturfühler Thermo E4 (NiCr) zur Verfügung. Als Wärmebildkamera kam die Ti25 von Fluke zum Einsatz. Die durchgeführten Versuche zeigen Temperaturinhomogenitäten auf. Hierfür wurden zwei Ursachen identifiziert. Diese sind Abweichungen aufgrund des Schichtaufbaus sowie Temperaturinhomogenitäten aufgrund der Temperaturregelung. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden alle weiteren Proben sequenziell gesiegelt, um die Temperaturinhomogenitäten zu reduzieren. Zuerst wurden die Heizbahnen A-A1 bzw. A-A2 und unmittelbar danach die schließende Heizbahn B-B bestromt. Im weiteren Verlauf beziehen sich die angegebenen Siegelzeiten auf einen Heizkreis und die Temperaturangaben auf die eingestellte Soll-Temperatur.

### *Auswahl der Prüfmethode*

Im Rahmen der Vorversuche wurden die Methoden für die Überprüfung der Siegelnahtqualität für den vorliegenden Anwendungsfall der MKISWs ausgewählt. Unterschiedliche Prüfmethode wurden untersucht. Diese waren eine optische Prüfung, das Anfertigen von Mikrotomschnitte, die Bestimmung der Siegelnahtfestigkeit sowie die Überprüfung der Dichtigkeit mittels Differenzdruckverfahren im Wasserbad und mittels Lack-Eindringprüfung. Es war festzustellen, dass das Anfertigen von Mikrotomschnitte und die Ermittlung der Siegelnahtfestigkeit kaum geeignet sind, um für die Untersuchungen eingesetzt zu werden. Zum Beispiel sind die möglichen Fehlstellen an den kritischen Punkten zu klein um die Nahtfestigkeit messbar zu beeinflussen und somit können kaum Rückschlüsse gezogen werden. Zusätzlich liegen die kritischen Punkte teilweise in den Radien der Siegelnahtkonturen. Die genormte Messung der Siegelnahtfestigkeit nach DIN 55529 bezieht sich allerdings auf lineare Siegelnähte, sodass diese Prüfvorschrift nicht angewendet werden kann.

Die optische Prüfung erfolgte an den Positionen I–V, vgl. Abbildung 43. Mithilfe eines Mikroskops (dnt GmbH) wurden vergrößerte Bilder aufgenommen. Für die anschließende Bewertung wurde ein Schema entwickelt, welches auf einer Benotung zwischen 1 und 5 basiert. Optisch fehlerfreie Siegelnähte erhalten die Note 1. Siegelnähte, die optisch offenkundig undicht sind, erhalten die Note 5. Die Abbildung 44 zeigt beispielhafte Referenzsiegelnähte. Die dortige Bildnummer entspricht der jeweiligen Benotung. Eine Verpackung sollte gemäß dieser Benotungsstufen an allen Stellen mindestens die Note 3 erhalten, um anhand der eingeführten Skala als verkaufsfähig eingestuft zu werden.



*Abbildung 44: Bewertungsskala für die optische Bewertung der Siegelnahtqualität: Note 1 (fehlerfrei) bis 5 (optisch undicht)*

Für die Überprüfung der Nahtdichtigkeit wurden das Differenzdruckverfahren mittels Wasserbad und die Lack-Eindringprüfung als zielführend erachtet. Das Prüfsystem für das Differenzdruckverfahren war das Wasserbad Leak-Master Easy der WITT Gastechnik. Für die Lack-Eindringprüfung wurde das Rissprüfungsmittel MR 68 NF der MR Chemie verwendet. Auf Basis der Erkenntnisse der Vorversuche wurde das weitere zweistufige Vorgehen geplant.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

### *Erste Versuchsreihe: Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung*

Mit der ersten Versuchsreihe wurden drei maßgebliche Ziele verfolgt. Die Überprüfung der Eignung der beiden MKISWs für das Fügen von unterschiedlichen Packstoffen. Ferner das Aufzeigen der Siegelergebnisse der beiden MKISWs an den kritischen Stellen sowie die Identifikation der wichtigsten Versuchsfaktoren, um die Anzahl der Versuchsfaktoren zu reduzieren.

Die Versuchsplanung wurde anhand der Methode von Shainin aus der statistischen Versuchsplanung durchgeführt. Das gewählte Vorgehen sieht für die weiteren Versuche je Versuchsfaktor nur zwei Faktorstufen vor. Zwischen den Versuchen wird nur jeweils ein Versuchsfaktor geändert. Mit diesem Verfahren können die wichtigsten Parameter, in der Nomenklatur von Shainin die sogenannten Roten X-Faktoren, ermittelt werden. Weiterführende Details können der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden (z. B. KLEIN 2011, KLEPPMANN 2011). Falls wichtige und weniger wichtige Versuchsfaktoren ermittelt werden, so kann die Anzahl der Faktoren reduziert werden. Die gewählten Packstoffkombinationen decken ein repräsentatives Spektrum ab, vgl. Tabelle 6. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu übersteigen, wird nachfolgend der Fokus auf die Untersuchungen der Packstoffkombination 1 gelegt. Für die Packstoffkombinationen 2, 3 und 4 werden abschließend die Versuchsergebnisse dargestellt.

Tabelle 6: Packstoffkombinationen der Versuchsreihe 1

	Trägerschicht	Siegelschicht
<i>Packstoffkombination 1: PA/PE</i>		
Oberfolie	PA 15 µm	PE 50 µm
Unterfolie	PA 40 µm	PE 110 µm
<i>Packstoffkombination 2: PS-Aluminium</i>		
Oberfolie	Lack/Druck/Alu/Primer 50 µm	Lack 2,5 g/m <sup>2</sup>
Unterfolie	PS 700 µm	nicht vorhanden
<i>Packstoffkombination 3: PS-PET/Papier/PET</i>		
Oberfolie	PET/Papier/PET-Platinen: (Lack/Druck/PET/Kleber/Papier/Kleber/PET/) 85 µm	Lack 2,5 g/m <sup>2</sup>
Unterfolie	PS 700 µm	nicht vorhanden
<i>Packstoffkombination 4: PS- Papier/PET-metallisierte Verbundfolie</i>		
Oberfolie	Papier/PET-metallisierte Verbundfolie: (Lack/Druck/ Papier/Kleber/PET-metallisiert/Primer/Lack) 60 µm	Lack 2,5 g/m <sup>2</sup>
Unterfolie	PS 700 µm	nicht vorhanden

### *Versuchsplanung und -durchführung für Packstoffkombination 1*

Im Hinblick auf die Versuchsplanung nach Shainin sind je Versuchsfaktor eine niedrige und eine hohe Faktorstufe zu wählen. Die Werte für die Faktorstufen wurden den Datenblättern der Packstoffhersteller entnommen bzw. ergeben sich aus den Gegebenheiten des Versuchstandes. Aus den gewählten Faktorstufen wurde der Versuchsplan ermittelt. Da im Rahmen der Vorversuche die Reproduzierbarkeit bestätigt wurde, war ein Versuchsumfang von vier Proben je Parametersatz angemessen.

### *Versuchsauswertung und -ergebnisse für Packstoffkombination 1*

Die Dichtigkeit und die optische Güte der gesiegelten Proben wurden überprüft. Für die Dichtigkeitsmessungen kamen das Differenzdruckverfahren im Wasserbad und das Lack-Eindringverfahren zum Einsatz. Bei den Proben, welche der Faktorstufe ‚hoch‘ zugeordnet werden können, waren fast alle Siegelungen dicht, vgl. Tabelle 7. Abgesehen von Position IV, im Übergang der beiden formenden Konturen A-A1/A2, waren mittels Differenzdruckverfahren im Wasserbad an der Kontur 1-g Undichtigkeiten detektierbar. Die Siegelnähte der Kontur 2-g waren an Position IV alle dicht, sodass das MKISW 2 das bessere Ergebnis aufweist.

*Tabelle 7: Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen für die Versuche mit Faktorstufe ‚hoch‘: W steht für die Prüfung im Wasserbad, L für die Prüfung mit Lack, ‚-‘ für undicht, ‚+‘ für dicht; die Zahl in Klammern steht für die undichte Position*

Parametersatz	Siegelnahtkontur			
	1-k	1-g	2-k	2-g
80 Shore, 140 °C, 1,0 s, 5 bar (alle Parameter ‚hoch‘)	W + L +	W - (IV) L +	W + L +	W + L +
60 Shore, 140 °C, 1,0 s, 5 bar (Härte ‚niedrig‘, Rest ‚hoch‘)	W + L +	W - (IV) L +	W + L +	W + L +
80 Shore, 125 °C, 1,0 s, 5 bar (Temperatur ‚hoch‘, Rest ‚hoch‘)	W + L +	W - (IV) L +	W + L +	W + L +
80 Shore, 140 °C, 0,5 s, 5 bar (Zeit ‚niedrig‘, Rest ‚hoch‘)	W + L +	W - (IV) L +	W + L +	W + L +
80 Shore, 140 °C, 1,0 s, 2 bar (Druck ‚niedrig‘, Rest ‚hoch‘)	W + L +	W - (IV) L +	W + L +	W + L +

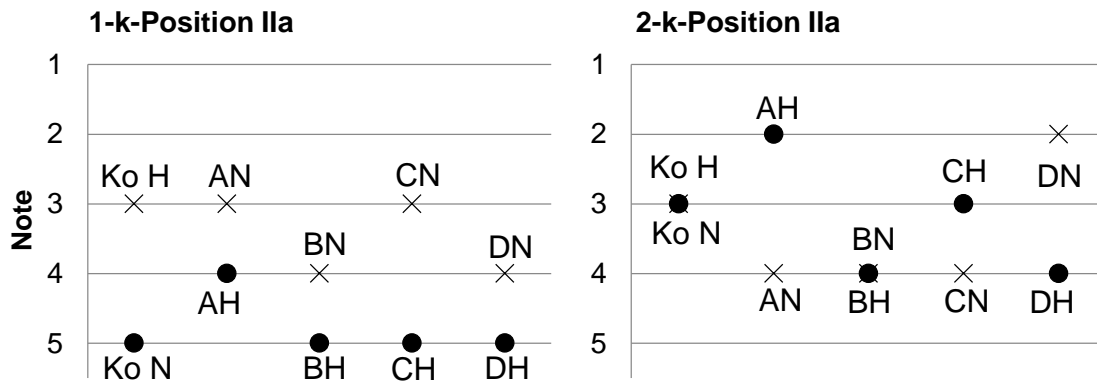
## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

Bei den Siegelnähten der Proben, welche der *Faktorstufe* ‚niedrig‘ zugeordnet werden können, ist ausschließlich die Kontur 2-k unabhängig vom gewählten Parametersatz immer dicht, vgl. Tabelle 8. Alle weiteren Siegelungen konnten ausschließlich bei bestimmten Parametersätzen als dicht eingestuft werden. Ferner waren einige Proben nur bei der Lack-Eindringprüfung dicht, wohingegen diese beim Differenzdruckverfahren im Wasserbad zu Undichtigkeiten neigten. Dies ist wohl auf eine zu niedrige Siegelnahtfestigkeit zurückzuführen. Unter der mechanischen Belastung durch den Unterdruck im Wasserbad wird die Siegelnaht an diesen Stellen getrennt und somit undicht. Insbesondere die Position IIa, der Übergang zwischen der formenden (A-A1) und der schließenden Heizbahn (B-B) bei der Kontur 1-k, ist äußerst kritisch. Nur mit einem Parametersatz konnte hier eine dichte Siegelnaht hergestellt werden. Bei den beiden großen Konturen, 1-g und 2-g, war die Position IV auffällig. Falls die Siegelnaht undicht war, so lag dies an der Position IV.

*Tabelle 8: Ergebnisse der Dichtheitsprüfungen für die Versuche mit Faktorstufe ‚niedrig‘: W steht für die Prüfung im Wasserbad, L für die Prüfung mit Lack, ‚-‘ für undicht, ‚+‘ für dicht; die Zahl in Klammern steht für die undichte Position*

Parametersatz	Siegelnahtkontur			
	1-k	1-g	2-k	2-g
60 Shore, 125 °C, 0,5 s, 2 bar (alle Parameter ‚niedrig‘)	W - (IIa) L - (IIa)	W - (IV) L - (IV)	W + L +	W - (IV) L - (IV)
80 Shore, 125 °C, 0,5 s, 2 bar (Härte ‚hoch‘, Rest ‚niedrig‘)	W + L +	W - (IV) L - (IV)	W + L +	W - (IV) L +
60 Shore, 140 °C, 0,5 s, 2 bar (Temperatur ‚hoch‘, Rest ‚niedrig‘)	W - (IIa) L - (IIa)	W - (IV) L - (IV)	W + L +	W - (IV) L +
60 Shore, 125 °C, 1,0 s, 2 bar (Zeit ‚hoch‘, Rest ‚niedrig‘)	W - (IIa) L - (IIa)	W - (IV) L - (IV)	W + L +	W + L +
60 Shore, 125 °C, 0,5 s, 5 bar (Druck ‚hoch‘, Rest ‚niedrig‘)	W - (IIa) L + (IIa)	W - (IV) L - (IV)	W + L +	W - (IV) L - (IV)

Im Gegensatz zur Überprüfung der Dichtigkeit, welche ein binäres Ergebnis aufweist, konnte mit der Skala für die optische Bewertung eine quantitative Aussage getroffen werden. Dies ermöglicht eine grafische Auswertung gemäß dem Verfahren nach Shainin. Nachfolgend wird eine Auswahl der Auswertungen dargelegt. Die Abbildung 45 zeigt die Bewertung der optischen Güte der Siegelnaht, Heizbahnen A-A1 und B-B, der beiden MKISW an der kritischen Stelle IIa.



Legende:

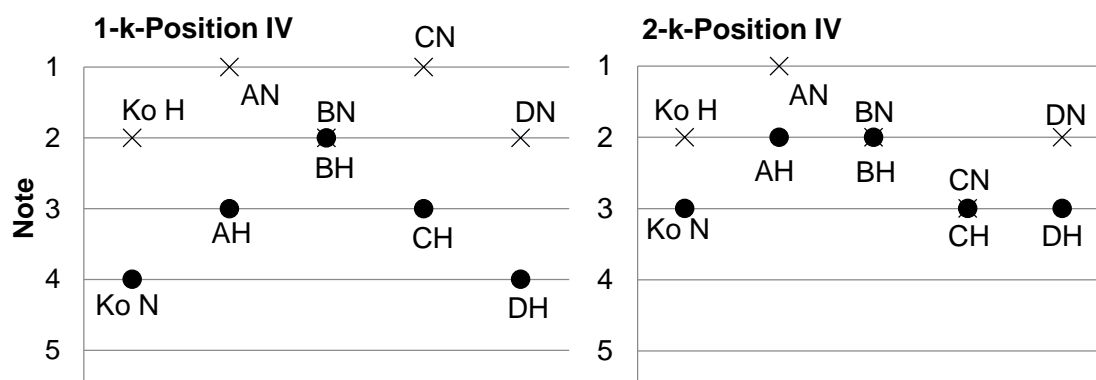
- Kontrollversuch (Ko) mit allen Einstellungen hoch (Ko H) oder niedrig (Ko N)
- A: Härte Silikonprofil, B: Temperatur, C: Zeit, D: Druck
- × Einstellungen hoch (N), z. B. AN (Härte Silikonprofil niedrig, Rest hoch)
- Einstellungen niedrig (H), z. B. AH (Härte Silikonprofil hoch, Rest niedrig)

Abbildung 45: Vergleich der optischen Bewertung an der kritischen Stelle IIa der beiden kleinen Konturen (A-A1 und B-B)

Mit dem MKISW 1 konnten maximal Siegelnähte mit einer Bewertung der Stufe 3 hergestellt werden, vgl. linkes Diagramm in Abbildung 45. Der größere Einfluss der Härte des Gegenhalters und der Einfluss der Zeit auf die erzielbare Qualität wird im Vergleich zu den Parametern Temperatur und Druck deutlich. Bei dem MKISW 2 hat die Härte des Gegenhalters, Faktor A im Diagramm, den größten Einfluss auf die optische Güte. Das optisch beste Ergebnis mit der Note 2 konnte erzielt werden, wenn das Silikonprofil die hohe Faktorstufe aufweist und die anderen Einstellungen die jeweils niedrige Faktorstufe einnehmen, Punkt AH im rechten Diagramm der Abbildung 45. Im Falle eines Vertauschens aller Faktorstufen, d. h. Silikonprofil ‚niedrig‘ und alle weiteren Einstellungen ‚hoch‘, war das Ergebnis mit 4 zu bewerten. Daraus lässt sich in dieser Konstellation ein großer Einfluss der Härte des Gegenhalters ableiten. In Summe zeigt für diese kritische Stelle IIa das MKISW 2 deutlich bessere und robustere Ergebnisse als das MKISW 1. Alle Nähte können optisch als dicht eingestuft werden.

Die Bewertung der Güte der Siegelergebnisse der Heizbahnen A-A1 und B-B an der kritischen Stelle IV sind in Abbildung 46 dargestellt. Mit beiden MKISW sind an der Stelle IV optisch qualitätsgerechte Siegelnähte herstellbar, insbesondere wenn die Faktorstufe ‚hoch‘ gewählt wird. An den beiden anderen kritischen Punkten I und IV der kleinen Siegelkontur, A-A1 und B-B, waren ähnliche Ergebnisse festzustellen. Tendenziell waren die Siegelnähte des MKISW 2 besser, da innerhalb der gewählten Faktorstufen alle Nähte mindestens eine optische Güte von 3 aufweisen. Es konnte kein Versuchsfaktor identifiziert werden, der einen signifikanten bzw. nahezu keinen Einfluss auf die Nahtqualität hat.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool



Legende:

- Kontrollversuch (Ko) mit allen Einstellungen hoch (Ko H) oder niedrig (Ko N)
- A: Härte Silikonprofil, B: Temperatur, C: Zeit, D: Druck
- × Einstellungen hoch (N), z. B. AN (Härte Silikonprofil niedrig, Rest hoch)
- Einstellungen niedrig (H), z. B. AH (Härte Silikonprofil hoch, Rest niedrig)

Abbildung 46: Vergleich der optischen Bewertung an der kritischen Stelle IV der beiden kleinen Konturen (A-A1 und B-B)

Die Abbildung 47 visualisiert die optische Bewertung der Güte der Siegelnaht der Heizbahnen A-A2 und B-B, der beiden MKISW an der Stelle IV. An dieser kritischen Stelle bei dem MKISW 1 kann keine visuell dicht wirkende Siegelnaht hergestellt werden, falls einer der Versuchsfaktoren die Faktorstufe ‚niedrig‘ einnimmt. Dies sind die Messpunkte KoN, AH, BH, CH und DH im linken Diagramm der Abbildung 47. Auch mit den hohen Versuchsparametern sind nur minimale Verbesserungen erzielbar. Ein deutlich anderes Bild zeigt das MKISW 2, rechtes Diagramm. Hier können mit den hohen Versuchsparametern Siegelergebnisse der optischen Güte 2 hergestellt werden, u. a. die Messpunkte AN und DN. Es ist festzustellen, dass mit beiden MKISW qualitätsgerechte Siegelnahten herstellbar sind. Das MKISW 2 scheint tendenziell besser geeignet zu sein.

### Versuchsergebnisse der Packstoffkombination 2

Mit den zur Verfügung stehenden Aluminium-Platinen konnten aufgrund deren Dimension nur Proben mit der kleinen Siegelnahtkontur (A-A1 und B-B) hergestellt werden. Daher basieren die nachfolgenden Erkenntnisse ausschließlich auf den kleinen Siegelnahtkonturen der beiden MKISW. Die Siegeltemperatur stellt den wichtigsten Faktor dar. Allerdings ist dieser nicht signifikant genug, um gemäß dem Vorgehen nach Shainin als Rotes-X deklariert zu werden. Die Siegelergebnisse des MKISWs 2 sind in Summe tendenziell besser. Da die Unterschiede zwischen den hohen und den niedrigen Einstellungen sehr groß sind, ist die Herstellung einer qualitätsgerechten Siegelnaht sehr parameterabhängig.



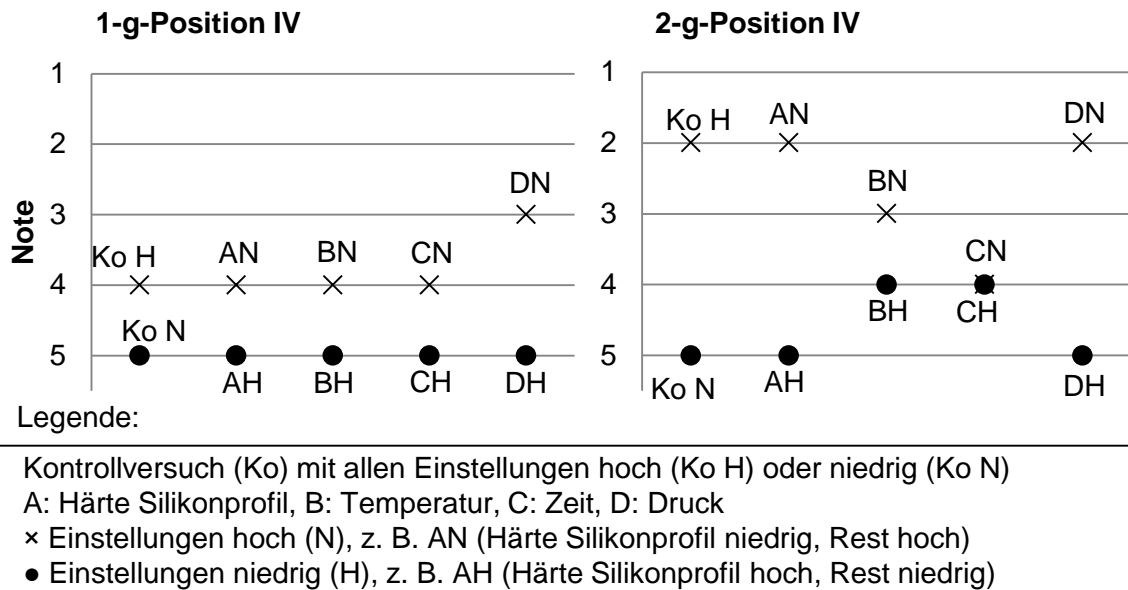


Abbildung 47: Vergleich der optischen Bewertung an der kritischen Stelle IV der beiden großen Konturen (A-A2 und B-B)

### V Versuchsergebnisse der Packstoffkombinationen 3 und 4

Da die Versuchsergebnisse der beiden Packstoffkombinationen 3 und 4 identisch sind, werden diese zusammengefasst dargestellt. Die Herstellung einer qualitätsgerechten Siegelnaht war bei den Packstoffkombinationen 3 und 4 mit den beiden MKISWs nicht möglich. Bei Siegeltemperaturen unterhalb des in den Datenblättern vorgeschlagenen Bereichs waren diverse Fehlstellen die Folge, u. a. eindeutig sichtbare Undichtigkeiten. Im Falle von höheren Temperaturen können zwar dichte Siegelnähte hergestellt werden, allerdings führt die eingebrachte Wärmeenergie zu Verbrennungen. Dies ist aus Kundensicht nicht akzeptabel. Dieses Verhalten wird von den Papierschichten verursacht. Somit zeigen die Packstoffkombinationen 3 und 4 die Grenzen der untersuchten MKISW auf.

### Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der ersten Versuchsreihe

Die Auswirkungen der Temperaturinhomogenitäten auf die erzielbare Siegelnaht sind im besonderen Maße von der Packstoffkombination abhängig. Bei den Packstoffkombinationen 1 und 2 können die Auswirkungen minimiert und qualitätsgerechte Siegelnähte hergestellt werden. Bei den Packstoffkombinationen 3 und 4 konnten die Auswirkungen nicht reduziert werden. Mit den untersuchten MKISWs konnten mit diesen Packstoffkombinationen keine qualitätsgerechte Siegelnähte hergestellt werden. Mit dem MKSIW 2 sind dichte Siegelnähte robuster herstellbar als mit dem MKSIW 1, d. h. die gewählten Prozessparameter haben einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

---

Mit dem Vorgehen nach Shainin war keiner der Versuchsfaktoren als besonders wichtig oder unwichtig identifizierbar. Alle Faktoren haben einen signifikanten Einfluss und wurden daher in der Versuchsreihe 2 berücksichtigt.

### *Zweite Versuchsreihe: Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung*

Für eine detaillierte Untersuchung der kritischen Stellen, vgl. Abbildung 43, wurde eine zweite Versuchsreihe durchgeführt. Die Versuchsreihe 2 hatte das Ziel zu überprüfen, ob den einzelnen Klassen von kritischen Stellen qualitätsbeeinflussende Versuchsfaktoren zugeordnet werden können. Auf dieser Basis sollten verallgemeinerte Rückschlüsse gezogen werden, wie der Schichtaufbau an den kritischen Stellen und die Versuchsfaktoren zusammenwirken. Die folgenden Ausführungen sind in die Abschnitte Versuchsplanung und -durchführung sowie Versuchsauswertung und -ergebnisse gegliedert.

### *Versuchsplanung und -durchführung*

Bei der zweiten Versuchsreihe wurde die Packstoffkombination 1, vgl. Tabelle 6, als Versuchsmaterial gewählt. Für die Ermittlung der Parametersätze wurde ein D-optimaler Versuchsplan erstellt. Die statistischen und mathematischen Hintergründe zu D-optimalen Versuchsplänen sind in der einschlägigen Literatur nachzulesen (z. B. KLEIN 2011, KLEPPMANN 2011). Die gewählten Faktorstufen der vier Versuchsfaktoren können der Tabelle 9 entnommen werden. Für die Erstellung und die Auswertung wurde die Software VisualXSel 13 verwendet.

*Tabelle 9: Versuchsfaktoren und Faktorstufen der Versuchsreihe 2*

<b>Versuchsfaktoren</b>	<b>Faktorstufen</b>
Siegeldruck im Pneumatikzylinder in bar	2; 3; 4; 5
Siegeltemperatur in °C	105; 115; 125; 135; 145; 155; 165
Siegelzeit in s	0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1; 1,3; 1,5
Härte des Silikonprofils in Shore	60; 70; 80

Um die Aussagefähigkeit der Versuche zu verifizieren, wurde zusätzlich eine peelbare Packstoffkombination ausgewählt, vgl. Tabelle 10. Diese Packstoffkombination ist wie die Kombination 1 optisch beurteilbar. Zusätzlich kann die Siegelnahtfestigkeit gemäß DIN 55529 bestimmt werden. Die Ermittlung der Nahtfestigkeit ist bei der Packstoffkombination 1 nicht aussagekräftig, da diese festsigelnd ist. In diesem Fall weist der Packstoff eine geringere Festigkeit als die Siegelnaht auf. Daher würde eine Zugprobe nicht in der Siegelnaht sondern im Packstoff reißen. Für beide Packstoffkombinationen wurden die identischen Faktorstufen gewählt und auf dieser Basis der Versuchsplan ermittelt.

## 5.2 Verschließen – Thermoformverpackungsmaschinen

Die Versuche wurden für die geschlossenen Siegelkonturen (A-A1/B-B bzw. A-A2/B-B) und mit beiden MKISW durchgeführt.

Tabelle 10: Packstoffkombination 5 für die Verifizierungsversuche

	Trägerschicht	Siegelschicht
<i>Packstoffkombination 5: OPA/PE/A-PET</i>		
Oberfolie	OPA 12 µm	PE 60 µm
Unterfolie	A-PET 250 µm	PE 50 µm (peel)

### Versuchsauswertung und -ergebnisse

Zunächst war zu überprüfen, ob die optische Beurteilung mit dem Qualitätskriterium Nahtfestigkeit korreliert, vgl. Abbildung 48. Hierfür wurden die Siegelnähte der Packstoffkombination 5 an den kritischen Stellen optisch geprüft und nach dem bereits eingeführten Schema bewertet sowie die Nahtfestigkeit bestimmt.

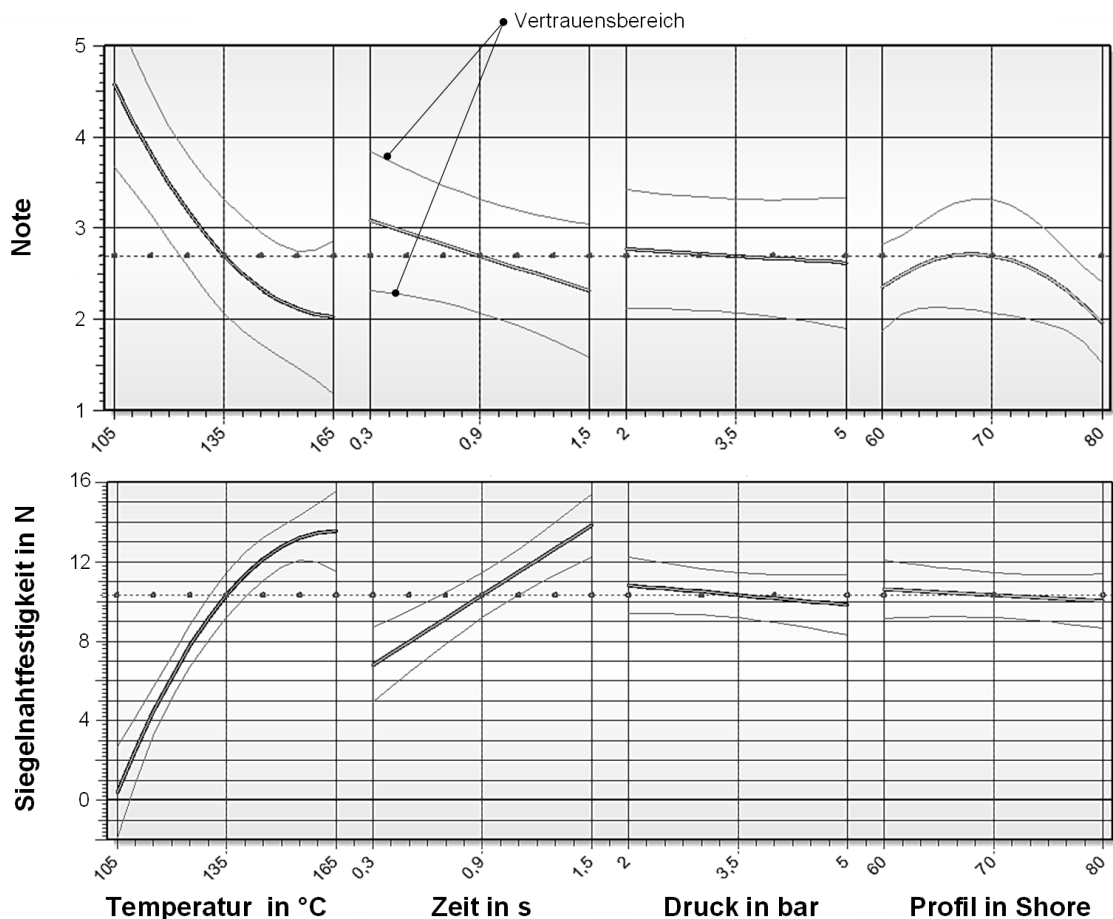


Abbildung 48: Vergleich der optischen Bewertung (oben) und der Nahtfestigkeit (unten); kritische Stelle der Klasse D, Packstoffkombination 5

## **5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool**

---

Im oberen Teil der Abbildung ist die optische Bewertung und im unteren Teil die Messung der Siegelnahtfestigkeit dargestellt. Der ausgewertete Bereich der Siegelnaht war eine Stelle der Klasse D an der großen Kontur (A-A2/B-B) des MKISW 2. In den beiden Diagrammen ist auf der Abszisse der Wertebereich des Versuchsfaktors aufgetragen. Die Ordinaten beziehen sich auf die jeweilige Bewertungsgröße optische Güte bzw. Siegelnahtfestigkeit. Bei dem Vergleich der Diagramme ist zu beachten, dass eine steigende optische Bewertung invers zur Siegelnahtfestigkeit aufgetragen ist. Die Note 1 ist die beste und die Note 5 die schlechteste Bewertung. Die Steigung des Kurvenverlaufs ist ein Indikator für die Signifikanz des jeweiligen Versuchsfaktors und spiegelt somit den Einfluss dieses Faktors auf das Ergebnis wider. Zum Beispiel ist der Graf des Versuchsfaktors Temperatur steiler als der Graf des Versuchsfaktors Druck. Daraus kann gefolgert werden, dass die Temperatur einen höheren Einfluss auf die Siegelnahtgüte hat als der Druck und somit signifikanter ist. In Summe sind die Verläufe der Grafen im paarweisen Vergleich sehr ähnlich, insbesondere bei den Versuchsfaktoren Temperatur und Zeit. Aufgrund der größeren Steigung scheinen diese beiden Parameter den größeren Einfluss auf die Siegelnahtqualität zu haben. Dem Siegeldruck und der Härte des Silikonprofils wird ein geringer Einfluss zugeordnet. Dieser Abgleich zeigt auch, dass das gewählte Bewertungsschema für die optische Güte mit der Siegelnahtfestigkeit korreliert.

Ein repräsentatives Beispiel für den Vergleich der optischen Güten an den kritischen Stellen der MKISW zeigt Abbildung 49. Die Auswertung einer kritischen Stelle der Klasse A ist dargestellt. Bei beiden MKISW sind die qualitativen Verläufe der Grafen nahezu gleich. Insbesondere die Verläufe des Versuchsfaktors Temperatur sind identisch. Der Versuchsfaktor Temperatur hat somit den größten Einfluss auf die optische Güte der Siegelnaht, wohingegen beim Versuchsfaktor Druck kaum ein Einfluss nachgewiesen werden kann. Bei dem MKISW 1 hat die Zeit einen größeren Einfluss als bei dem MKISW 2. Ferner hat die Härte des Silikonprofils beim MKISW 2 einen Einfluss auf die optische Güte. Beim MKISW 1 ist dies nicht der Fall. Tendenziell fällt die optische Bewertung beim MKISW 2 besser aus. Für alle Klassen der kritischen Punkte wurde diese Bewertung nach dem äquivalenten Vorgehen durchgeführt und für eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere MKISW verallgemeinert. Auf dieser Basis wurden die in Tabelle 11 dargestellten Erkenntnisse, die festgestellten Besonderheiten der einzelnen Klassen und ein Vergleich zwischen den beiden MKISW, ermittelt. Bei dieser Betrachtung sind die Kenntnisse des unterschiedlichen Schichtaufbaus der MKISWs berücksichtigt.

## 5.2 Verschließen – Thermoformverpackungsmaschinen

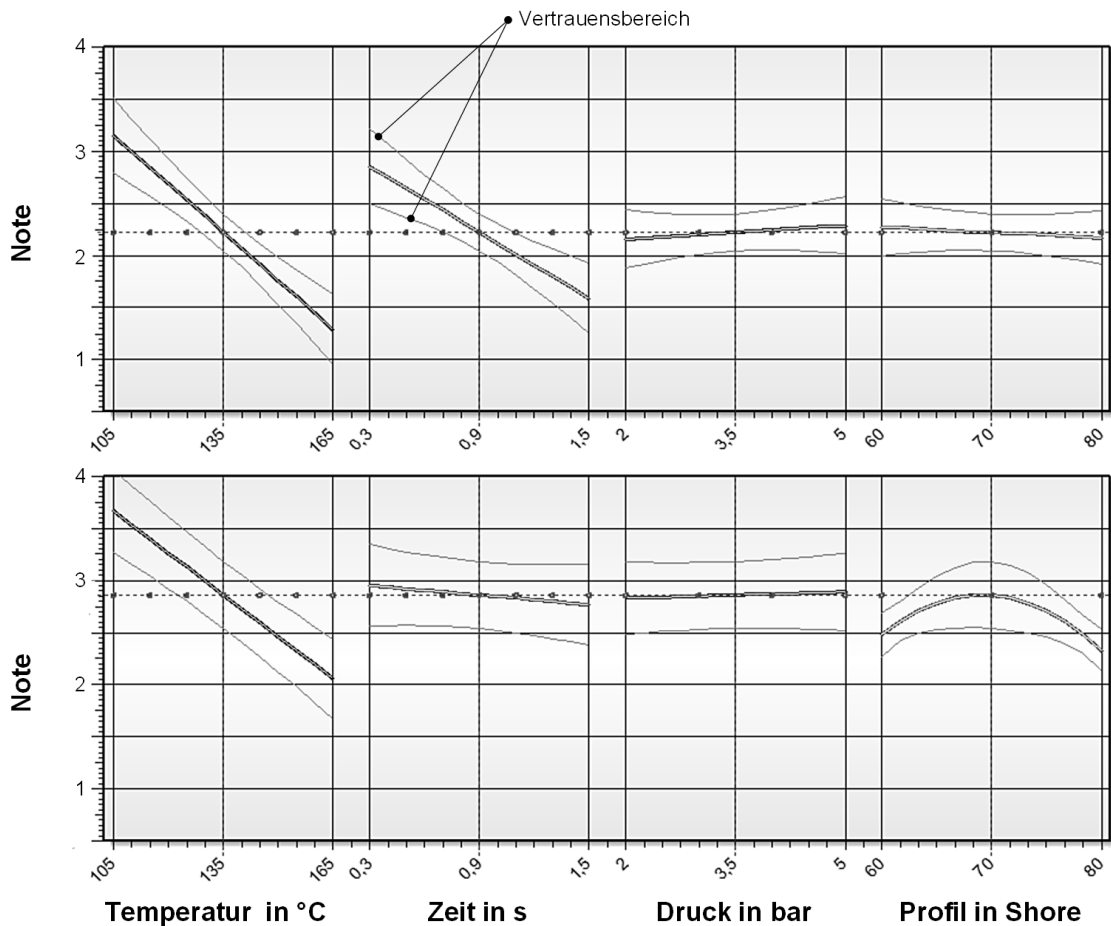


Abbildung 49: Vergleich der optischen Bewertung an einer kritischen Stelle der Klasse A, MKISW 1 (oben), MKISW 2 (unten), Packstoffkombination 1, Siegelkontur A-A1/B-B

Tabelle 11: Besonderheiten und Vergleich der beiden MKISW

Klasse	Besonderheiten und Vergleich der beiden MKISW
A	Durch die Verringerung des Heizbahnquerschnittes hat die Zeit beim MKISW 2 einen geringeren Einfluss. Die Bewertung des MKISW 2 ist etwas besser.
B	Kurvenverläufe sind sehr ähnlich; keine Veränderung der Siegelnaht feststellbar. Die Bewertung des MKISW 2 ist besser.
C	Die Zeit hat bei dem MKISW 1 bei beiden Konturen einen großen Einfluss; bei beiden Konturen vom MKISW 2 allerdings keinen Einfluss. Die Bewertung der kleinen Kontur ist beim MKISW 1 besser; bei der großen Kontur ist sie gleich.
D	Bei der kleinen Kontur des MKISWs 2 hat die Zeit einen etwas geringeren Einfluss. Durch die Verringerung des Heizbahnquerschnittes erfolgt das Aufheizen schneller. Die Bewertung der großen Kontur ist beim MKISW 2 deutlich besser; die kleinen Konturen unterscheiden sich nicht.
E	Bei den kleinen Konturen hat der Druck einen Einfluss; bei niedrigerem Druck wird die Bewertung besser. Die Bewertung der kleinen Kontur beim MKISW 1 ist besser als die beim MKISW 2. Die großen Konturen sind gleich zu bewerten.

## **5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool**

---

Mit der zweiten Versuchsreihe sollte überprüft werden, ob den Klassen von kritischen Stellen qualitätsbeeinflussende Versuchsfaktoren zugeordnet werden können. Auch die Zusammenhänge zwischen dem Schichtaufbau an den kritischen Stellen und den Versuchsfaktoren war zu untersuchen. Die Versuchsreihe hat gezeigt, dass sich die unterschiedlichen Schichtaufbauten der beiden MKISW auf die erzielbare Siegelnahtqualität deutlich auswirken. Mit passend ausgewählten Parametern sind Einflüsse, die aufgrund des Multi-Kontur-Ansatzes zwangsläufig entstehen, auf ein Minimum reduzierbar. Ferner wird deutlich, dass die Gestaltung und die Auslegung des Schichtaufbaus große Freiheitsgrade aufweisen. Im Falle eines besseren Verständnisses, zu dem diese erweiterte Technologiebasisstudie beigetragen hat, kann dieses Wissen in die Entwicklung weiterer MKISW eingebracht werden. Für die Siegelnahtqualität konnte die Siegeltemperatur gefolgt von der Siegelzeit als signifikante Prozessparameter statistisch fundiert ermittelt werden. Der Siegeldruck und die Härte des Silikonprofils als Gegenhalter haben einen geringen Einfluss auf die Siegelnahtqualität gezeigt. Die im Rahmen der erweiterten Technologiestudie ermittelten Erkenntnisse werden zusammenfassend im fünften Schritt Transfer im Hinblick auf die Nutzung in der Entwicklung einer formatflexiblen Verpackungsmaschine dargelegt.

### **Laserstrahlsiegeln**

Im Folgenden werden die Erkenntnisse von experimentellen Untersuchungen zum Laserstrahlsiegeln dargestellt. Zunächst wird auf die eingesetzte Versuchstechnik und anschließend auf zwei Versuchsreihen eingegangen.

#### *Versuchstechnik*

Nachfolgend werden die Systemelemente, welche für die experimentellen Untersuchungen entscheidend sind, der zur Verfügung stehenden Versuchstechnik eingegangen. Die Laserquelle ist ein diodengepumpter Thulium-Faserlaser. Dieser emittiert einen Laserstrahl mit der Wellenlänge von 1.940 nm. Der eingesetzte Scanner ist eine 2-Achsen Ablenkeinheit mit einer Beschleunigungszeit von 0,7 ms und einer Positioniergeschwindigkeit von bis zu 5 m/s. Für den Ausgleich der Fokuslagenverschiebung des Scanners ist ein F-Theta-Objektiv im Strahlengang integriert. Für eine stufenlose Strahlaufweitung, bis zu dem dreifachen des Ursprungsdurchmessers, ist ein Beam Expander vorgesehen.

Während die Laserstrahlung die Wärmeenergie in die Fügeebene einbringt, ist die Spanntechnik für das Sicherstellen des notwendigen Drucks während des Fügeprozesses entscheidend. Der Einsatz laserstrahltransparenter Glasplatten ist

die gängige Methode ein Spannsystem für einseitig ebene Werkstücke zu realisieren. Ein entscheidender Nachteil ist, dass die Glasplatte im Falle einer Verschmutzung die Laserstrahlung deutlich stärker absorbiert. Dies führt zu einem Zerstören der Glasplatte. Mechanische Spannsysteme werden für den Einsatz in Thermoformverpackungsmaschinen als ungeeignet angesehen, da diese u. a. die inhärente Flexibilität des Laserstrahls reduziert. Eine weitere Anforderung ist die Eignung dieses Spannsystems für einen anschließenden Trennprozess. Diese Anforderung ist insbesondere von der Glasspanntechnik kaum zu erfüllen, da die beim Trennprozess entstehenden Dämpfe, Partikel bzw. Schmelze potenzielle Verschmutzungsquellen sind. Daher sind mehrere flexiblere Bearbeitungsvorrichtungen konzipiert worden. Das Konzept, welches abschließend ausgewählt und für die folgenden Versuche eingesetzt wurde, basiert auf Unterdruck. Dieses wird im Folgenden als *Vakuuvorrichtung* bezeichnet und ist in Abbildung 50 schematisch dargestellt.

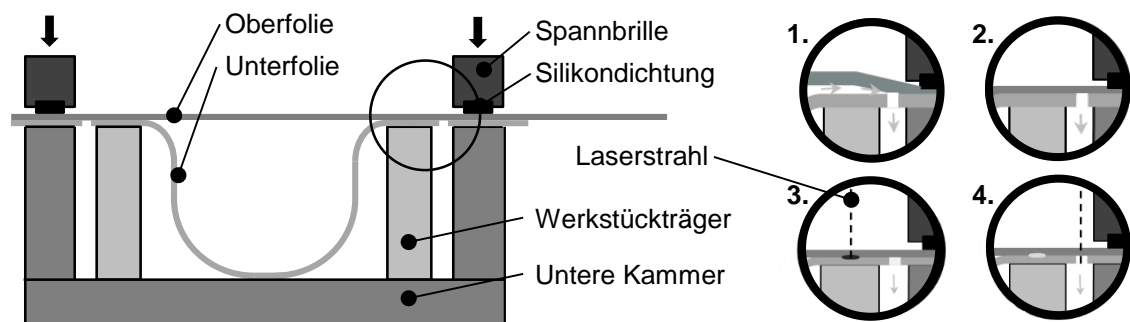


Abbildung 50: Schematischer Aufbau der Vakuuvorrichtung (links) und funktionale Schritte für das Fügen und Trennen (rechts)

Die vier funktionalen Schritte für das sequenzielle Fügen und Trennen gestalten sich wie folgt. Im ersten Schritt fährt die Spannbrille nach unten und dichtet mit der Silikondichtung sowie der Ober- und Unterfolie die untere Kammer der Vorrichtung ab. Anschließend wird dieser Raum über eine Venturidüse evakuiert. Hierfür sind in der Unterfolie Perforationen nötig, welche bereits im Thermoformprozess eingebracht werden können. Durch die Evakuierung der unteren Kammer wird der notwendige Siegedruck zwischen der Ober- und Unterfolie generiert, vgl. zweiter Schritt in Abbildung 50. Anschließend wird mittels Laserstrahlung die für den Siegelprozess notwendige Wärmeenergie eingebracht, vgl. dritter Schritt. Im vierten und abschließenden Schritt erfolgt das Trennen mit dem Laserstrahl. Da unter- und oberhalb der Trennfuge keine Störkontur ist, können die beim Trennprozess entstehenden Dämpfe, Partikel bzw. Schmelze abgesaugt werden. Der weiterhin anliegende Unterdruck unterstützt zusätzlich den Austrieb dieser Nebenprodukte des Trennprozesses.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

### *Erste Versuchsreihe: Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung*

Das Ziel dieser Versuchsreihe war eine Überprüfung von unterschiedlichen, heterogenen Packmittelkombinationen hinsichtlich deren Eignung für das Fügen und Trennen mit der beschriebenen Versuchstechnik. Um die Funktionalität der beschriebenen Vakuumvorrichtung zu untersuchen, wurden zusätzlich Vergleichsversuche mit der Glasspanntechnik durchgeführt. Um die Glasplatte nicht zu verschmutzen, wurde diese vor dem Trennprozess um 20 mm angehoben. Die untersuchten Packmittelkombinationen können der Tabelle 12 und die gewählten Prozessparameter für diese Versuchsreihe der Tabelle 13 entnommen werden.

Tabelle 12: Packstoffkombinationen der ersten Versuchsreihe

	Trägerschicht	Siegelschicht
<i>Packstoffkombination 1: PA/PE</i>		
Oberfolie	PA 15 µm	PE 50 µm
Unterfolie	PA 40 µm	PE 110 µm
<i>Packstoffkombination 2: PET/PE</i>		
Oberfolie	PET 12 µm	PE 50 µm
Unterfolie	A-PET 250 µm	PE 50 µm
<i>Packstoffkombination 3: PA/PE - bedruckt</i>		
Oberfolie	PA 20 µm - bedruckt	PE 70 µm
Unterfolie	PA 40 µm	PE 110 µm
<i>Packstoffkombination 4: PS-Aluminium - bedruckt</i>		
Oberfolie	Lack/Druck/Alu/Primer 50 µm	Lack 2,5 g/m <sup>2</sup>
Unterfolie	PS 700 µm	-
<i>Packstoffkombination 5: PS-PET/Papier/PET - bedruckt</i>		
Oberfolie	Lack/Papier/PET/Primer 60 µm	Lack 2,5 g/m <sup>2</sup>
Unterfolie	PS 700 µm	-

Tabelle 13: Wertebereiche der Parameter für die erste Versuchsreihe

Parameter	Werte
Laserleistung in W	20; 40; 60; 80
Geschwindigkeit in mm/s	31; 48; 63; 125; 188; 250; 375; 500
Umläufe	1

Die Bewertung der erzielten Siegel- und Trennergebnisse erfolgte durch ein Überprüfen der Siegelnahtfestigkeit sowie der optischen Güte einer Siegelnaht, z. B. hinsichtlich Gleichmäßigkeit oder ob Verfärbungen zu erkennen waren. Das Prüfen der Siegelnahtfestigkeit erfolgte manuell. Ferner wurden die Trennfugen



hinsichtlich des optischen Erscheinungsbildes und dem Durchtrennungsgrad bewertet. Die entscheidenden Kriterien und die Bewertungsstufen wurden in einem vorab definierten Bewertungsschema festgehalten.

Im Folgenden werden die Haupteigenschaften dieser Versuchsreihe zusammengefasst. Die Packstoffkombination 1 ist mittels Laserstrahlung gut ffügbar. Mit der Vakuumvorrichtung durfte beim Siegeln die Geschwindigkeit maximal 188 mm/s und beim Trennen maximal 63 mm/s betragen. Eine Laserleistung von mindestens 80 W war für ein Siegeln und Trennen mit der Vakuumvorrichtung zweckmäßig. Bei der Nutzung der Glasvorrichtung kann aufgrund der Absorption der Glasplatte mit einer maximal Geschwindigkeit von 125 mm/s gesiegelt werden. Ein Trennen ist bei 48 mm/s und einer Laserleistung von 80 W möglich.

Auch die Packstoffkombination 2 kann durch einen Laserstrahlprozess gut gesiegelt werden. Eine stoffschlüssige Verbindung zwischen der Ober- und der Unterfolie ist bei der Vakuumvorrichtung mit einer Geschwindigkeit von maximal 125 mm/s möglich. Bei der Glasvorrichtung konnten bei einer Laserleistung von 80 W und einer Geschwindigkeit zwischen 31 und 63 mm/s gute Siegel-ergebnisse erzielt werden. Ein Trennen beider Fügepartner war im gewählten Parameterraum nicht möglich. Der Grund wird darin gesehen, dass die Packstoffkombination 2 doppelt so dick ist wie die Packstoffkombination 1. Ausschließlich die Oberfolie wurde durchtrennt.

Die bedruckte Packstoffkombination 3 zeigt bereits bei Laserleistungen von 20 W und einer Geschwindigkeit von 500 mm/s Verfärbungen der Bedruckung auf, sodass mit dieser keine optisch qualitätsgerechte Siegel- bzw. Trennergebnisse erzielt werden konnten. Dies war unabhängig von der eingesetzten Vorrichtung, wobei Teile der Bedruckung Rückstände auf der Scheibe der Glasvorrichtung hinterlassen haben. Die unterschiedlichen Farben der Bedruckung ändern die optischen Eigenschaften der Folie, sodass mit einer kontinuierlich gleichbleibenden Laserleistung in stark absorbierenden Bereichen zu viel Wärmeenergie erzeugt wird und dies zu Verbrennungen führt.

Da auch der obere Fügepartner der Packstoffkombination 4 bedruckt war, wurde das gleiche Ergebnis festgestellt. Bei einem Drehen der Packstoffkombination, sodass die Laserstrahlung zunächst die PP-Folie durchdringt, konnten auswertbare Ergebnisse realisiert werden. Mit der Vakuumvorrichtung war bei einer Laserleistung von 80 W eine Geschwindigkeit von maximal 63 mm/s möglich. Ein Trennen konnte nicht erzielt werden. Die Packstoffkombination 5 zeigte ein ähnliches Verhalten. Zusätzlich neigte die Papierschicht des oberen Fügepartners ebenfalls, auch bei niedrigen Laserleistungen, zu Verbrennungen.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

In Summe wird ersichtlich, dass die bedruckten Packstoffe aufgrund des lokal unterschiedlichen Absorptionsgrades und den damit verbundenen optischen Eigenschaften nicht für eine Bearbeitung mit einer konstanten Laserleistung geeignet sind. Hierfür ist eine an das Druckbild angepasste Prozessführung nötig. Ferner haben Packstoffe mit nicht thermoplastischen Kunststoffanteilen, z. B. Papier, andere optische und thermische Eigenschaften, die den Laserstrahlfügeprozess erschweren. Unbedruckte thermoplastische Packstoffe wie die Kombinationen 1 und 2 sind für das Laserstrahlsiegeln mit der eingesetzten Versuchstechnik geeignet. Zusätzlich kann durch einen höheren Energieeintrag ein Trennprozess realisiert werden. In der zweiten Versuchsreihe wird auf Basis dieser Erkenntnisse das Laserstrahlsiegeln von thermoplastischen Packstoffen fokussiert.

### *Zweite Versuchsreihe: Versuchsplanung, -durchführung und -auswertung*

Die Ausführungen zur zweiten Versuchsreihe betrachteten einen Verfahrensvergleich zwischen dem Laserstrahlsiegeln und dem dauerbeheizten Wärmekontaktverfahren sowie Untersuchungen zu den beiden Bearbeitungsvorrichtungen.

### *Vergleich der Siegelnahtfestigkeiten zwischen dem dauerbeheizten Wärmekontaktverfahren und dem Laserstrahlsiegeln*

Aufgrund der gravierenden verfahrenstechnischen Unterschiede zwischen dem Laserstrahlsiegeln und dem dauerbeheizten Wärmekontaktverfahren wurden vergleichende Messungen durchgeführt. Die Packstoffkombinationen waren zunächst hinsichtlich der Siegeleigenschaften genauer zu spezifizieren. Hierfür wurde die Siegelnahtposition und -orientierung im Hinblick auf die Rollenbahn variiert, vgl. Abbildung 51.

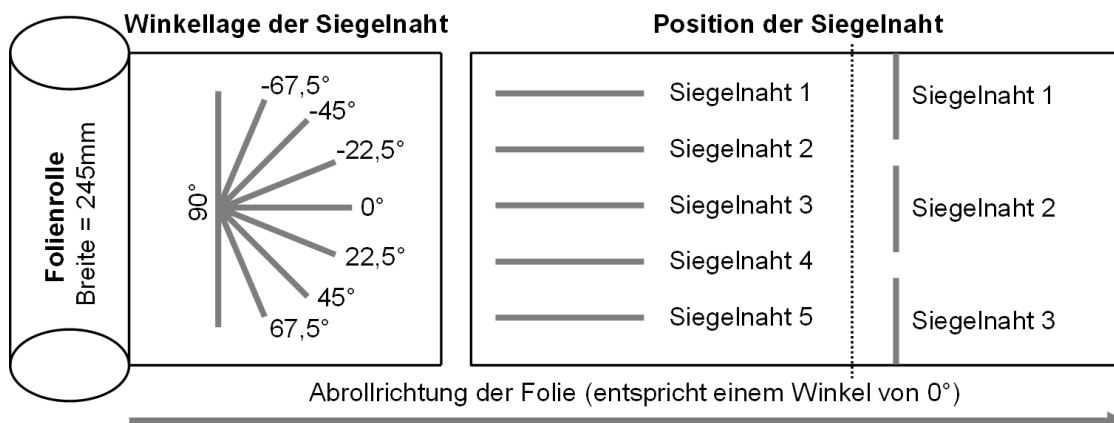


Abbildung 51: Position und Orientierung der Referenzsiegelnähte

## 5.2 Verschließen – Thermoformverpackungsmaschinen

Das Ergebnis der Messungen der Siegelnahtfestigkeit in Bezug auf eine Variation der Winkellage für die Packstoffkombination 1 ist in Tabelle 14 aufgeführt. Bei der Variation der Nahtlage, vgl. rechter Teil in Abbildung 51, wurden Nahtfestigkeiten von  $12,34 \pm 0,80$  N bis  $13,70 \pm 0,67$  N (Siegelnähte 1-5,  $0^\circ$ ) und  $5,58 \pm 1,30$  N bis  $9,19 \pm 1,17$  N (Siegelnähte 1-3,  $90^\circ$ ) erzielt.

Tabelle 14: Nahtfestigkeiten der Referenzversuche, Packstoffkombination 1

Lage	Mittelwert Festigkeit in N	Standardabweichung in N
$\pm 90^\circ$	8,04	1,83
$-67,5^\circ$	7,20	0,75
$-45^\circ$	11,45	1,22
$-22,5^\circ$	12,34	0,80
$\pm 0^\circ$	13,41	0,55
$+22,5^\circ$	12,77	0,58
$+45^\circ$	10,56	0,97
$+67,5^\circ$	6,70	1,09

Anhand dieser Untersuchungsergebnisse wird deutlich, dass die Siegelnahtfestigkeiten der Packstoffkombination 1 maßgeblich von der Orientierung und der Lage der Fügepartner abhängig ist. Dies spiegelt sich allerdings in keinsten Weise in den Datenblättern der Packstoffe wider, da dort nur ein Wert für die erzielbare Siegelnahtfestigkeit dokumentiert ist. Daher ist eine Referenzierung und Erfassung dieser inhomogenen Verteilung der Siegelnahtfestigkeit für die experimentellen Untersuchungen des Laserstrahlsiegeln entscheidend.

Zwei repräsentative grafische Darstellungen des Abziehverhaltens von laserstrahlgesiegelten Nähten sind der Abbildung 52 zu entnehmen. Diese Siegelnähte wurden mit einer Laserleistung von 65 W, einer Lasergeschwindigkeit von 50 mm/s, der Packstoffkombination 1 sowie der Bearbeitungsvorrichtung Glasspanntechnik erzielt. Eine Gegenüberstellung der erzeugten Siegelnahtfestigkeiten der Referenzversuche und des Laserstrahlsiegeln zeigt Tabelle 15.

Die Versuchsauswertungen veranschaulichen, dass mit dem Laserstrahlsiegeln Siegelnähte mit einer vergleichbaren Nahtfestigkeit zum dauerbeheizten Wärmekontaktverfahren hergestellt werden können. Wie die Untersuchungen nahelegen, so weisen die Festigkeiten der laserstrahlgefügt Siegelnähte eine geringere Abhängigkeit von der Orientierung auf. In Summe kann verallgemeinert festgehalten werden, dass mit dem Laserstrahlsiegeln im Vergleich zum dauerbeheizten Wärmekontaktverfahren hinsichtlich Siegelnahtfestigkeit qualitätsgerechte Prozessergebnisse erzielt werden können.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

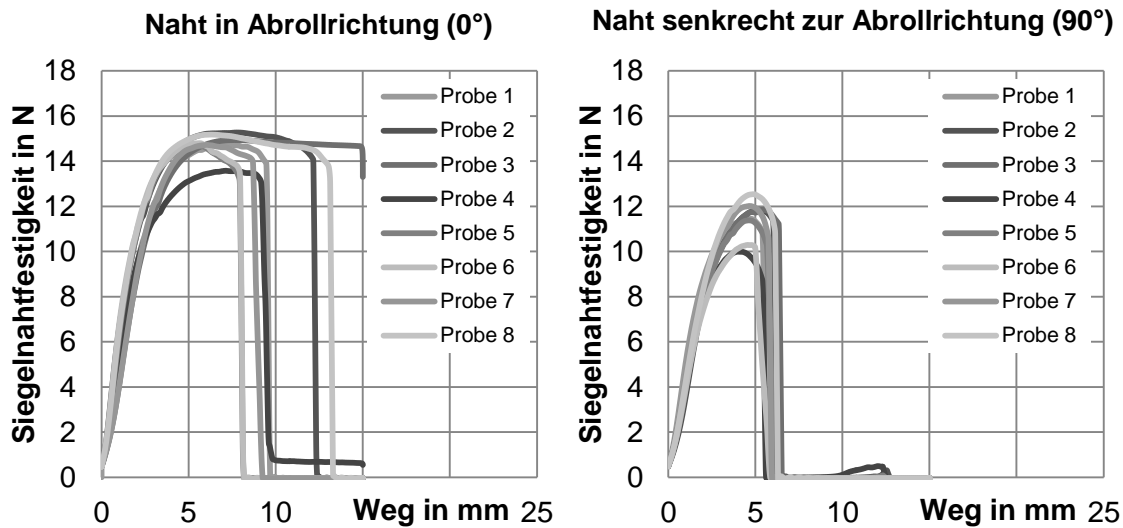


Abbildung 52: Messung der Siegelnahtfestigkeit von laserstrahlgesiegelten Proben, Packstoffkombination 1

Tabelle 15: Gegenüberstellung der Nahtfestigkeiten des dauerbeheizten Wärmekontaktverfahrens und des Laserstrahlsiegeln für Packstoffkombination 1

Lage	Dauerbeheiztes Wärmekontaktsiegeln		Laserstrahlsiegeln	
	Mittelwert Festigkeit in N	Standardab- weichung in N	Mittelwert Festigkeit in N	Standardab- weichung in N
$\pm 90^\circ$	8,04	1,83	11,02	1,03
$\pm 0^\circ$	13,41	0,55	14,75	0,48

### Oberflächenbeschaffenheit des Werkstückträgers

Für das Aufbringen des notwendigen Fügedrucks ist bei beiden Bearbeitungsvorrichtungen ein Gegenhalter notwendig, vgl. Werkstückträger in Abbildung 50. Hierfür sollte untersucht werden, inwiefern die Oberfläche dieses Gegenhalters einen Einfluss auf die erzielbare Siegelnahtfestigkeit hat. Die Untersuchungsobjekte waren Gegenhalter aus Aluminium, wobei deren Oberflächen gefräst bzw. sandgestrahlt waren. Die Ergebnisse der Überprüfung der Siegelnahtfestigkeit können der Abbildung 53 entnommen werden. Die Siegelnähte dieser Versuchreihe wurden mit einer Laserleistung von 65 W, einer Lasergeschwindigkeit von 150 mm/s, der Packstoffkombination 1 und der Bearbeitungsvorrichtung Glasspanntechnik hergestellt. Mit der sandgestrahlten Unterlage konnten Siegelnahtfestigkeiten von  $8,28 \pm 0,32$  N und mit der gefrästen Unterlage Nahtfestigkeiten von  $9,26 \pm 26,58$  N erzielt werden. Die mit der gefrästen Unterlage verbundenen

## 5.2 Verschließen – Thermoformverpackungsmaschinen

Prozessergebnisschwankungen werden durch die im Vergleich hohe Standardabweichung von  $\pm 26,58$  N deutlich. In Summe zeigt sich, dass sich eine sandgestrahlte Oberfläche positiv auf die Siegelnahtqualität und insbesondere auf die Prozessrobustheit auswirkt.

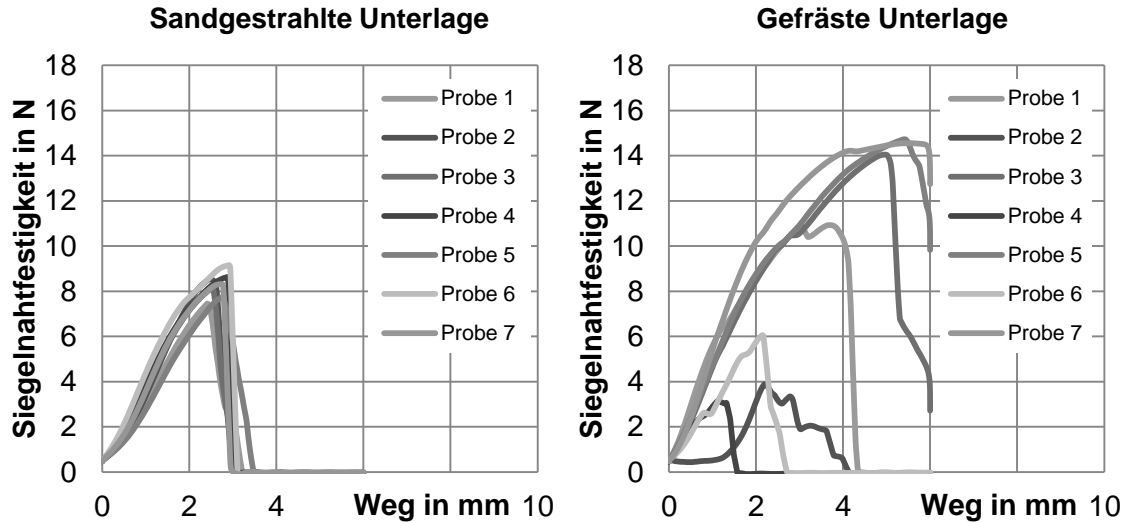


Abbildung 53: Vergleich der Siegelnahtfestigkeiten einer gefrästen mit einer sandgestrahlten Oberfläche des Gegenhalters

### Vergleich der beiden Bearbeitungsvorrichtungen

Ferner wurden die beiden Bearbeitungsvorrichtungen, welche zum einen auf einer Glasplatte und zum anderen auf den Einsatz von Unterdruck basieren, quantitativ verglichen. Hierfür wurden laserbasierte Siegelnähte mit einer Laserleistung von 65 W, einer Lasergeschwindigkeit von 50 mm/s, der Packstoffkombination 1 sowie einem sandgestrahlten Gegenhalter hergestellt.

Tabelle 16: Nahtfestigkeiten des Laserstrahlsiegels bei dem Einsatz der Glasspanntechnik bzw. der Vakuumvorrichtung für Packstoffkombination 1

Lage	Glasspanntechnik		Vakuumvorrichtung	
	Mittelwert Festigkeit in N	Standardab- weichung in N	Mittelwert Festigkeit in N	Standardab- weichung in N
$\pm 0^\circ$	11,91	1,10	15,63	0,38

Die Haupteckdaten des Vergleichs ist, dass mit der Vakuumvorrichtung höhere Festigkeiten erzielt werden können als mit der Glasspanntechnik. Der Grund hierfür wird hauptsächlich im Absorptionsverhalten der Glasplatte gesehen, da mit einem Absorptionsgrad von ca. 10 % zu rechnen ist.

### 5.2.5 Schritt 5: Transfer

Die Möglichkeiten eines Transfers in die Entwicklung einer formatflexiblen Thermoformverpackungsmaschine werden im Folgenden dargestellt. In Thermoformverpackungsmaschinen wird heute flächendeckend das dauerbeheizte Wärmekontaktverfahren mit den beiden Werkzeugvarianten für ein Rahmen- bzw. Flächensiegeln eingesetzt. Das inhärente Flexibilitätspotenzial wird in Bezug auf die Siegelnahtgeometrie als niedrig eingestuft. Allerdings ist dieses Verfahren, aufgrund der Möglichkeit zur Sicherstellung einer homogeneren Temperaturverteilung weniger vom eingesetzten Packmittel abhängig als bspw. das Impuls-siegeln in Form des Multi-Kontur-Ansatzes. Das Verfahren ist ferner nicht von den optischen Eigenschaften der Packmittel abhängig. Daher ist das dauerbeheizte Wärmekontaktverfahren hinsichtlich einer werkstoffbezogenen Flexibilitätsbewertung besser als die beiden anderen Verfahren. Allerdings sind verfahrensseitig für eine Reduzierung der Reibungsverluste für den Formatwechsel beim Einsatz des dauerbeheizten Wärmekontaktverfahrens keine Potenziale erkennbar. Daher hat die Steigerung der Formatflexibilität durch weitere Maßnahmen, wie bspw. einer Rüstprozessverbesserung oder die Möglichkeit eines externalisierten Rüstens, zu erfolgen.

Das impulsbeheizte Wärmekontaktverfahren in Form von Multi-Kontur-Werkzeugen stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um zwischen unterschiedlichen Konturen ohne den Bedarf eines Werkzeugtausches flexibel wechseln zu können. Ein solches Werkzeug benötigt nahezu die identischen Einbauverhältnisse wie ein dauerbeheiztes Werkzeug, sodass hier von keinem größeren Zusatzaufwand auszugehen ist. Ein vom Multi-Kontur-Ansatz unabhängiger Vorteil ist das Entfallen einer Aufwärmzeit. Die mit der erweiterten Technologiestudie untersuchte Auslegung eines Impulssiegelwerkzeuges könnte für Anwendungen mit einer abgestimmten Packmittelauswahl eingesetzt werden. Die Auswirkungen von weiteren Siegelkonturen und die damit verbundenen zusätzlichen Schichten auf das Prozessergebnis sind allerdings unklar. Die aufgezeigten Hotspots sind möglichst zu eliminieren, um von einem sequenziellen auf ein paralleles Siegeln wechseln zu können.

Das *Laserstrahlsiegeln* weist ein großes Potenzial auf, um die auf die Siegelnahtkontur bezogene Formatflexibilität zu steigern. Allerdings sind für einen Einsatz dieses Verfahrens in der industriellen Praxis noch weitere wissenschaftliche Fragestellungen zu beantworten sowie konstruktive Veränderungen des Maschinenaufbaus nötig. Daher kann dieses Verfahren nach dem aktuellen Kenntnisstand noch nicht in Thermoformverpackungsmaschinen eingesetzt werden.

### 5.3 Aufrichten – Faltschachtel-Aufrichtemaschinen

Das Aufrichten ist ein Verarbeitungsvorgang der dem verpackungstechnischen Hauptvorgang des Formens zugeordnet wird (BLEISCH ET AL. 2014, S. 192). Beim Aufrichten wird das vereinzelt Packmittel, welches einen mittleren Vorfertigungsgrad aufweist, zu einer füllfähigen Verpackung verarbeitet, z. B. Beutel, Schachtel (BLEISCH ET AL. 2011, S. 221). Die Funktion Aufrichten einer Faltschachtel-Aufrichtemaschine für den FEFCO-Typ 0201 aus Wellpappe ist die ausgewählte Funktion für eine Steigerung der Formatflexibilität.

#### 5.3.1 Schritt 1: Initialisierung

Zunächst wird im Rahmen der Initialisierung die zu flexibilisierende Funktion ausgewählt. Die Prozess- und Flexibilitätsanforderungen werden anschließend zusammengefasst. Für die Herstellung einer Sammel- bzw. Sortimentspackung mit einer Faltschachtelverpackung FEFCO-0201 sind folgende Schritte nötig:

- Flachliegende Faltschachtel aus dem Magazin entnehmen
- Faltschachtelzuschnitt aufrichten
- Unterseite der Faltschachtel verschließen
  - Falten der Front-, Rück- sowie der beiden Seitenklappen
  - Dauerhaftes Fügen der gefalteten Klappen der Unterseite
- Befüllen
- Oberseite der Faltschachtel verschließen
  - Falten der Front-, Rück- sowie der beiden Seitenklappen
  - Dauerhaftes Fügen der gefalteten Klappen der Oberseite

In Abbildung 54 ist diese Faltschachtelvariante dargestellt, wobei für den Verpackungsprozess der Zuschnitt bereits in der Packmittelherstellung an der Fabrikante dauerhaft gefügt ist. Die beschriebene Prozessfolge ist bei allen Befüllverfahren von oben notwendig, u. a. Toploadingverfahren. Im Falle einer seitlichen Befüllung, kann das Verschließen der beiden Seiten auch nach dem Befüllen erfolgen. Allerdings erschwert ein Verpacken heterogener Füllgüter eine stabile Stapelbildung, sodass bei Sortimentspackungen von einem Befüllen von oben ausgegangen werden kann. Das Verschließen der Faltschachteloberseite gestaltet sich bei dem betrachteten Faltschachteltyp äquivalent zur Unterseite. In der industriellen Praxis werden nicht alle Teilprozesse maschinell durchgeführt (KIRWAN 2013, S. 335). Das Befüllen von kundenindividuellen Bestellungen im Versandhandel ist bspw. aktuell ein manueller Prozess. Das Aufrichten ist daher eine entscheidende Hauptfunktion für das Herstellen von Verpackungen für

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

---

Sammel- bzw. Sortimentspackungen. Das Aufrichten ist funktionsbedingt und aufgrund der Stellung im Verarbeitungsprozess unmittelbar von einer Änderung des Verarbeitungsgutes, insbesondere bei einer Änderung der geometrischen Abmessungen, betroffen. Der flache Zustand von Faltschachteln vor dem Aufrichten ermöglicht eine effiziente und raumsparende Lagerung (KIRWAN 2013, S. 265). Daher wird das Aufrichten am Beispiel des FEFCO-Typs 0201 betrachtet.

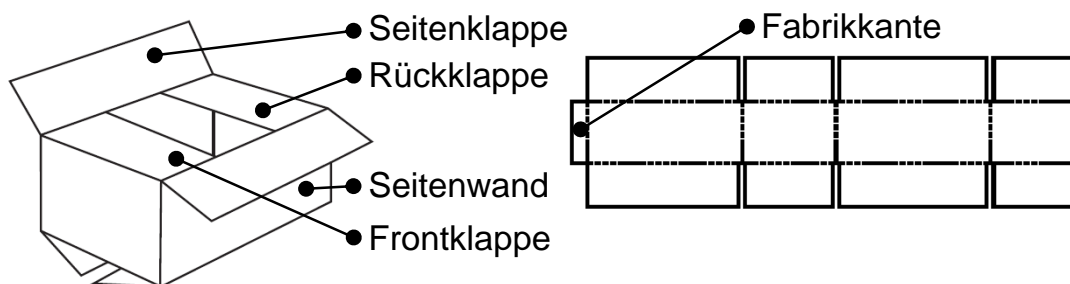


Abbildung 54: Bezeichnungen und Zuschnitt der Faltschachtel FEFCO-Typ 0201 in Anlehnung an FEFCO (2007)

Die grundsätzliche Prozessanforderung an das Aufrichten einer Faltschachtel FEFCO-Typ 0201 ist das Überführen der flach liegenden Faltschachtel in den aufgerichteten Zustand und die Übergabe an die folgende Funktionseinheit für das Verschließen der Faltschachtelunterseite. Während dieses Prozesses darf das Verarbeitungsgut Faltschachtel nicht beschädigt werden.

Die Faltschachtel besteht aus dem Packstoff Wellpappe, wobei unterschiedliche Kriterien die eingesetzte Wellpappe charakterisieren. Zum Beispiel werden diverse Wellpappenarten und -sorten sowie Wellenarten unterschieden (BERNDT & SELLSCHOPF 2011, S. 69 ff.; KIRWAN 2013, S. 313). Hinsichtlich der Verbindung der Fabrikkante werden die Möglichkeiten einer Drahtheftung, eines Klebestreifens und einer Laschenklebung unterschieden (FEFCO 2007, S. 9). Die zu verarbeitenden Dimensionen der Faltschachtel sind stark vom verpackenden Unternehmen und den zu versendenden Produkten abhängig. Am Markt verfügbare Systeme können kumuliert die Abmessungen von ca. (120 bis 1000) x (100 bis 600) x (100 bis 500) mm<sup>3</sup> (lxbxh) verarbeiten (HENNIG 2013, G 3.2 S. 11). Die notwendige Prozessgeschwindigkeit wird ebenfalls anhand von kommerziell verfügbaren Systemen quantifiziert. Die Leistungsspanne von Faltschachtel-Aufrichtemaschinen liegt zwischen wenigen Stück pro Minute bis hin zu Hochleistungsmaschinen mit ca. 50 Stück pro Minute (HENNIG 2013, G 3.2 S. 11). Eine resultierende Flexibilitätsanforderung ist die Notwendigkeit diverse Wellpappenqualitäten verarbeiten zu können. Die Verarbeitbarkeit unterschiedlicher Faltschachtelgrößen ist eine weitere Anforderung. Diese Anforderung wird im



Weiteren vorrangig betrachtet, da diese im besonderen Maße von der Notwendigkeit einer Volumenoptimierung betroffen ist. Die dimensionale Flexibilitätsanforderung resultiert aus einem Bedarf dem Befüllvorgang eine Verpackung zur Verfügung zu stellen, welche ein ausreichend großes Innenvolumen hat. Die Verpackungen unterscheiden sich daher zumeist in allen drei räumlichen Dimensionen. Daraus resultiert ein dimensionsabhängiges Ausgangsmaterial. Diese Aspekte sind im folgenden Arbeitsschritt berücksichtigt.

### 5.3.2 Schritt 2: Ideengenerierung und -bewertung

Die grundsätzliche Funktionsweise wird anhand des Eingangs- und Ausgangszustandes beschrieben. Der Ausgangszustand vor dem Aufrichten ist eine flach liegende Faltschachtel, die eine gefügte Fabrikante aufweist, vgl. Abbildung 55. Die Innenwinkel zwischen den einzelnen Seiten betragen  $0^\circ$  bzw.  $180^\circ$ . Nach dem Prozess des Aufrichtens stehen diese Innenwinkel orthogonal zueinander. Hierfür ist eine Krafteinwirkung notwendig, um den sogenannten Aufrichtewiderstand zu überwinden (BLEISCH ET AL. 2014, S. 30). Die Kraft induziert in Bezug auf die Biegeachsen das notwendige Drehmoment für das Schwenken der Seitenflächen der Faltschachtel.

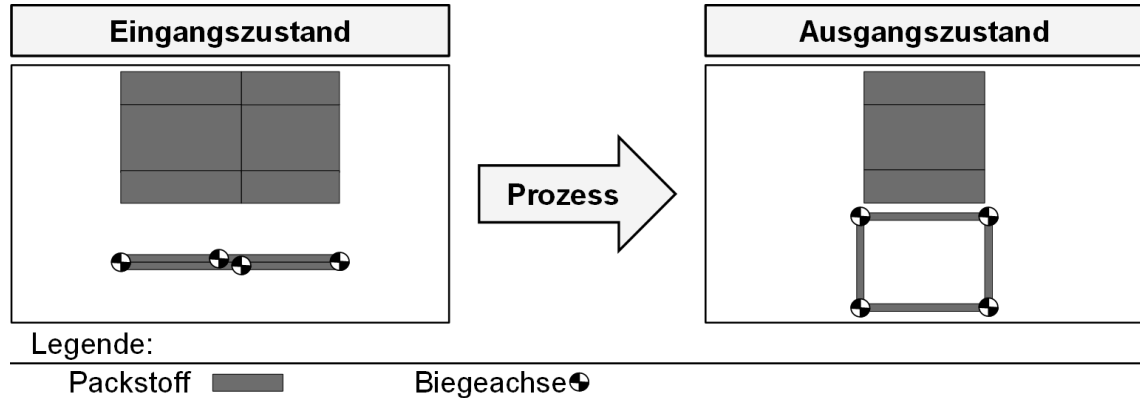


Abbildung 55: Beschreibung des Eingangs- und Ausgangszustandes der Funktion Aufrichten einer Faltschachtel FEFCO-0201

Für die Ideengenerierung ist beim Aufrichten im Gegensatz zum Siegeln kein vergleichbares Verfahren anderer Branchen bekannt. Das Aufrichten ist verpackungsspezifisch. Ferner ist eine größere Vielfalt an Verfahren für das Aufrichten in der industriellen Praxis vorzufinden. Diese beiden Aspekte spiegeln sich in der Ideengenerierung wider. Zunächst werden grundsätzliche Ideen anhand einer abstrahierten und theoretischen Betrachtung dargestellt. Anschließend wird eine Clusterung und Bewertung von industriellen Lösungen aufgezeigt.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

In BLEISCH ET AL. (2011, S. 311 ff.) werden zwei grundsätzliche Prinzipien für das Aufrichten einer Faltschachtel unterschieden. Beim Aufdrücken werden ausreichend steife Packmittel durch Druck auf die Faltkante aufgerichtet. Wohingegen beim Aufziehen eine Zugkraft auf das Packmittel einwirkt und den Prozess des Aufrichtens realisiert. Bei beiden Grundwirkprinzipien wird eine äußere Krafteinwirkung angenommen. Auf eine innere Krafteinwirkung wird nicht hingewiesen. Diese kann anhand der Kreativitätstechnik Variation abgeleitet werden. In diesem Beispiel ist dies eine Verschiebung der Kraftangriffspunkte. Somit können grundsätzlich vier Varianten anhand der beiden Kriterien Krafteinwirkung von innen oder außen sowie Aufziehen oder Aufdrücken unterschieden werden. Allerdings ist eine Bewertung der inhärenten Flexibilität auf diesem Abstraktionsniveau nicht möglich. Eine Kopplung mit den Arbeitsorganen ist notwendig. Dies ist in Abbildung 56 dargestellt.

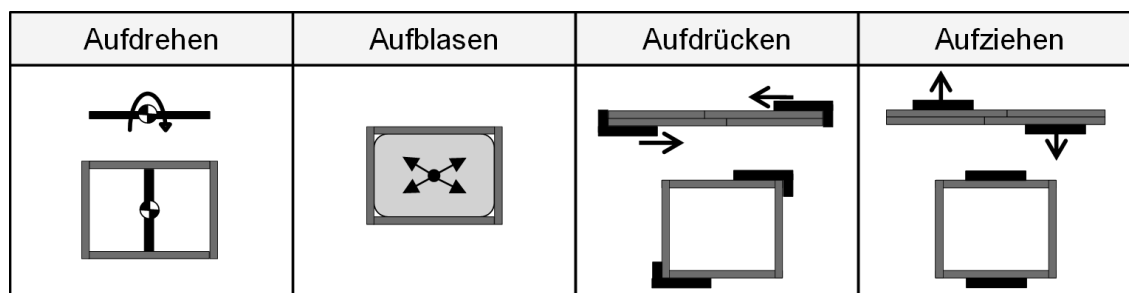


Abbildung 56: Grundwirkprinzipien und mögliche Arbeitsorgane

Aufgrund der Bewertung der Formatflexibilität scheiden die Prinzipien Aufdrehen und Aufblasen für eine weitere Betrachtung aus. Beide Prinzipien benötigen ein geometriegebundenes Werkzeug, welches von der jeweiligen Faltschachteldimension abhängig ist und somit auszutauschen wäre. Bei der Analyse der Wirkprinzipien Aufdrücken und Aufziehen sind keine Restriktionen hinsichtlich Formatflexibilität identifizierbar. Beide Verfahren können mittels einer Kinematisierung flexibilisiert werden. Somit haben beide auf diesem Abstraktionsniveau bzw. dieser Konkretisierungsstufe das gleiche inhärente Flexibilitätspotenzial.

Auf Basis einer Analyse von industrienahen Informationsmaterialien konnten die in Abbildung 57 dargestellten und in der industriellen Praxis genutzten Grundverfahren für das Aufrichten von Faltschachteln des FEFCO-Typs 0201 identifiziert werden. Einige Beispiele der industriellen Praxis zeigen auch Mischformen. Das betrachtete Faltschachtelformat ist für das vertikale und horizontale Befüllen geeignet. Da dies grundsätzlich vom Aufrichteverfahren unabhängig ist, wurden auch Top- und Sidelader in der Betrachtung berücksichtigt.

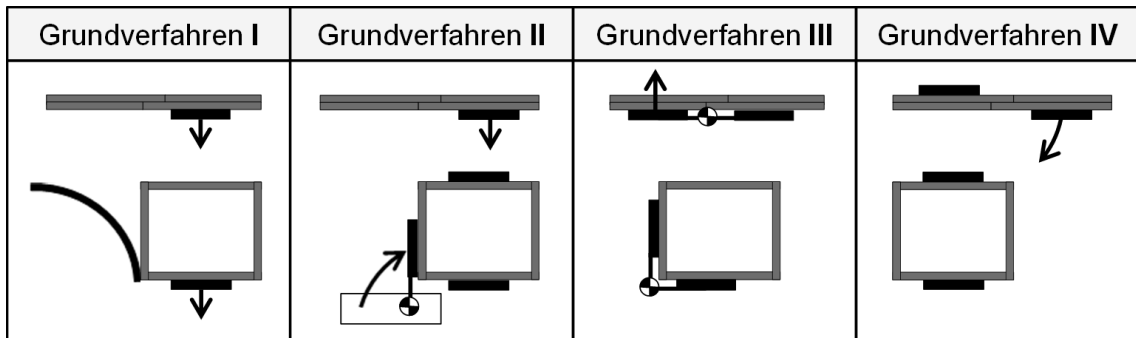


Abbildung 57: Identifizierte Grundverfahren für die Funktion Aufrichten

Die identifizierten Grundprinzipien werden im Folgenden kurz erläutert. Das Grundverfahren I basiert auf einem Arbeitsorgan, welches die Faltschachtel bspw. aus einem Magazin entnimmt und an einer passiven Schiene vorbeiführt. Die nicht gegriffene Seitenfläche wird von dieser Schiene berührt und faltet sich daraufhin sequenziell ein, bis die 90° Innenwinkel erreicht sind. Systeme die dieses Grundverfahren einsetzen sind z. B. SIAT (2016) und SO-MATEC (2016). Für das Grundverfahren II wird diese passive Schiene durch ein aktives Arbeitsorgan ersetzt. Dies ist bspw. eine Schiene, welche durch eine Schwenkbewegung oder eine translatorische Bewegung die nicht gegriffene Fläche berührt. Industrielle Beispiele hierfür sind GRANDI (2016) und SOCO (2016).

Beim Grundverfahren III ist das Arbeitsorgan in zwei Funktionsflächen unterteilt. Diese beiden Teilelemente sind über ein Gelenk miteinander verbunden. Dies ist der signifikante Unterschied zum zweiten Grundverfahren, da dort eine derartige Kopplung nicht vorhanden ist. Im Ausgangszustand sind die beiden Teilfunktionsflächen zueinander parallel. Somit wird die Faltschachtel aus dem Magazin gegriffen. Für das Aufrichten werden eine oder beide Funktionsflächen geschwenkt bis diese senkrecht zueinander stehen. Eine Teilfläche ist zumeist mit Vakuumsaugern ausgestattet. Beispiele für dieses Grundverfahren sind WEXXAR (2016) und THIELE (2016). Beim Grundverfahren IV wird durch eine Krafteinwirkung auf zwei gegenüberliegenden Seiten der Aufrichtevorgang realisiert. Bei den anderen Verfahren werden zwei nebeneinander liegende Seitenflächen für das Aufrichten genutzt. Ein Arbeitsorgan führt beim Aufrichten eine translatorische oder eine schwenkende Bewegung aus. Die zweite Seite ist zumeist ortsfest. Dieses Verfahren ist häufig bei Verpackungsmaschinen mit einem seitlichen Befüllen zu finden. Anwendungen dieses Grundverfahrens sind u. a. COMBI (2016a) und KRONES (2016).

## **5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool**

---

Neben diesen Grundverfahren für das Aufrichten können die Industriebeispiele hinsichtlich deren Maschinenstruktur in zwei weitere Gruppen untergliedert werden. Eine Gruppe ist als spezialisierte Verpackungsmaschinen charakterisierbar. Die zweite Gruppe beruht auf dem Einsatz von 6-DoF-Knickarmrobotern (u. a. ADDE 2016, COMBI 2016b). Während bei den Verpackungsmaschinen alle Grundverfahren zum Einsatz kommen, so werden bei der zweiten Gruppe ausschließlich Greifwerkzeuge gemäß dem Grundverfahren III verwendet. In diesen Arbeitsorganen sind oftmals noch weitere Funktionen integriert, z. B. Greifer für ein Befüllen oder für ein Palettieren. Teilweise werden für alle diese Funktionen die gleichen Saugorgane eingesetzt. Die Maschinenleistung solcher Systeme ist geringer als die der o. g. spezialisierten Verpackungsmaschinen. HENNIG (2013, G 3.2 S. 11) untergliedert den Leistungsbereich bei Faltschachtel-Aufrichtemaschinen in die drei Segmente niedrig (bis zu 15 Faltschachteln pro Minute), mittel (bis zu 30 Faltschachteln pro Minute) und hoch (bis zu 50 Faltschachteln pro Minute). Der Hochleistungsbereich wird durch eine nahezu kontinuierliche Arbeitsweise, bei dem Verschließen der Unterseite und dem Befüllen sowie beim Verschließen der Oberseite erreicht (HENNIG & KÜNZEL 2006). Das Aufrichten findet allerdings quasi stationär statt.

Die Analyse der Grundprinzipien hinsichtlich deren inhärenten Flexibilität zeigt, dass alle Systeme der industriellen Praxis konstruktiv bedingt einen Formatbereich haben. Jedoch sind verfahrensseitig keine signifikanten Unterschiede im Hinblick auf die Formatflexibilität identifizierbar. Zwar ist bspw. die passive Schiene des ersten Grundverfahrens tendenziell flexibilitätshemmend. Allerdings kann die Schiene durch eine passende Auslegung einen gängigen Formatbereich abdecken und ist daher nicht unbedingt ein Rüstteil. Nachfolgend wird ein Verfahren beschrieben, welches im Gegensatz zu den o. g. Verfahren ein quasi kontinuierliches Aufrichten ermöglicht.

Das *Differenzbandverfahren* ermöglicht quasi kontinuierlich und formatflexibel Faltschachteln aufzurichten. Das Differenzbandverfahren stellt ein Aufdrücken mittels zweier Förderbänder dar, vgl. Abbildung 58. Dies konnte in dieser Form nicht als eines der industriellen Grundverfahren identifiziert werden. Zwei seitliche Förderbänder werden teilweise nach dem Aufrichten für den innermaschinellen Transport zu den weiteren Funktionseinheiten genutzt. Somit ist das Differenzbandverfahren eine Kombination aus den folgenden Förderbändern und dem Aufdrücken. Im Folgenden wird dieses Verfahren detaillierter beschrieben.

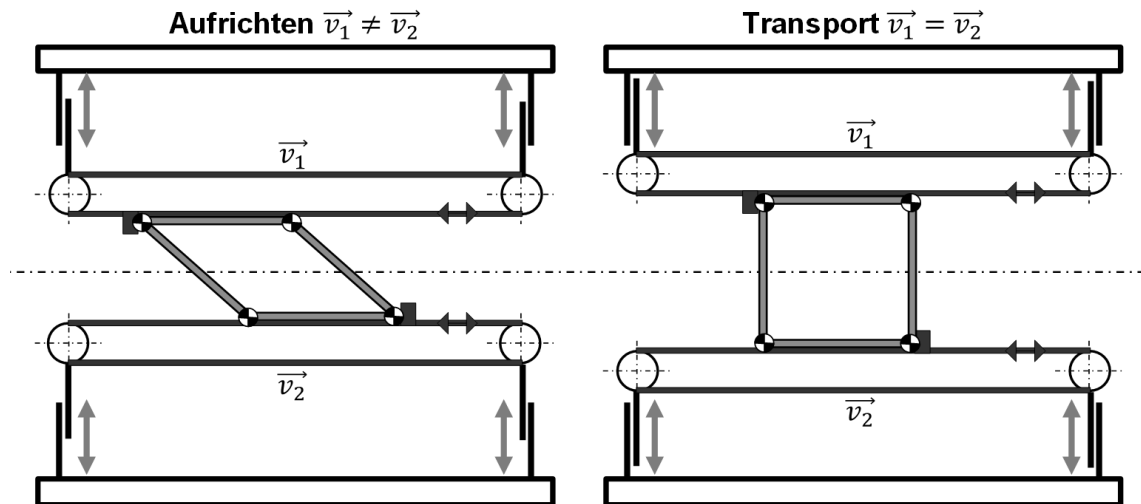


Abbildung 58: Funktionsprinzip des Differenzbandverfahrens

Zu Prozessbeginn befindet sich die ebene Faltschachtel zwischen den beiden sogenannten Differenzbändern. Die Differenzbänder haben jeweils einen mechanischen Gegenhalter. Um das Aufrichten der Faltschachtel zu initiieren, ist der Abstand zwischen den beiden Gegenhaltern zu verkürzen. Für diese notwendige Relativbewegung kann jeweils nur eines der beiden Bänder oder können auch beide Bänder verfahren werden. Falls beide Bänder bewegt werden, so kann dies in die gleiche Richtung jedoch mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfolgen oder in entgegengesetzter Richtung, sodass sich die Gegenhalter aufeinander zubewegen. Hierdurch wird auf die beiden von den Gegenhaltern berührten Faltschachtelkanten die Aufrichtekraft übertragen, welche ein Aufrichten induziert.

Mit dem Aufrichten ist eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den beiden Differenzbändern notwendig, damit der sich öffnenden Faltschachtel ausreichend Freiraum zur Verfügung steht. Der Abstand kann durch ein einseitiges Bewegen eines der beiden Bänder erfolgen oder ein synchronisiertes Auseinanderbewegen, um die Mittelachse konstant zu halten. Dies wird mittels sogenannten Breitenverstellungen realisiert. Der Prozess ist abgeschlossen, wenn die Innenwinkel der Faltschachtel  $90^\circ$  aufweisen. Anschließend wird die Faltschachtel weitertransportiert und -verarbeitet, u. a. beim Verschließen der Unterseite. Für das Aufrichten einer anderen Faltschachtelgröße muss ausschließlich der Abstand der beiden Gegenhalter positioniert werden. Dies ist allerdings flexibel, wie alle anderen Veränderungen, z. B. Endposition der Breitenverstellungen nach dem Aufrichten, durch eine Kinematisierung möglich. Somit stellt das Differenzbandverfahren ein aussichtsreiches Verfahren für ein quasi kontinuierliches und formatflexibles Aufrichten dar. Für eine weitere Beurteilung hinsichtlich der Verfahrenseigenschaften, z. B. Verfahrensgeschwindigkeit, fehlen Erkenntnisse.

## **5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool**

---

### **5.3.3 Schritt 3: Technologiebasisstudie**

Das Differenzbandverfahren ist ein aussichtsreicher Ansatz um formatflexibel und quasi kontinuierlich Faltschachteln vom FEFCO-Typ 0201 aufzurichten zu können. Im Rahmen der Technologiebasisstudie werden weitere Recherchen aufgezeigt. Nachdem im zweiten Schritt der Fokus industrienahes Informationsmaterial war, wurden in diesem Arbeitsschritt Patente und wissenschaftliche Veröffentlichungen analysiert. Zudem wurden anhand eines vereinfachten Funktionsträgers weitere Erkenntnisse erarbeitet.

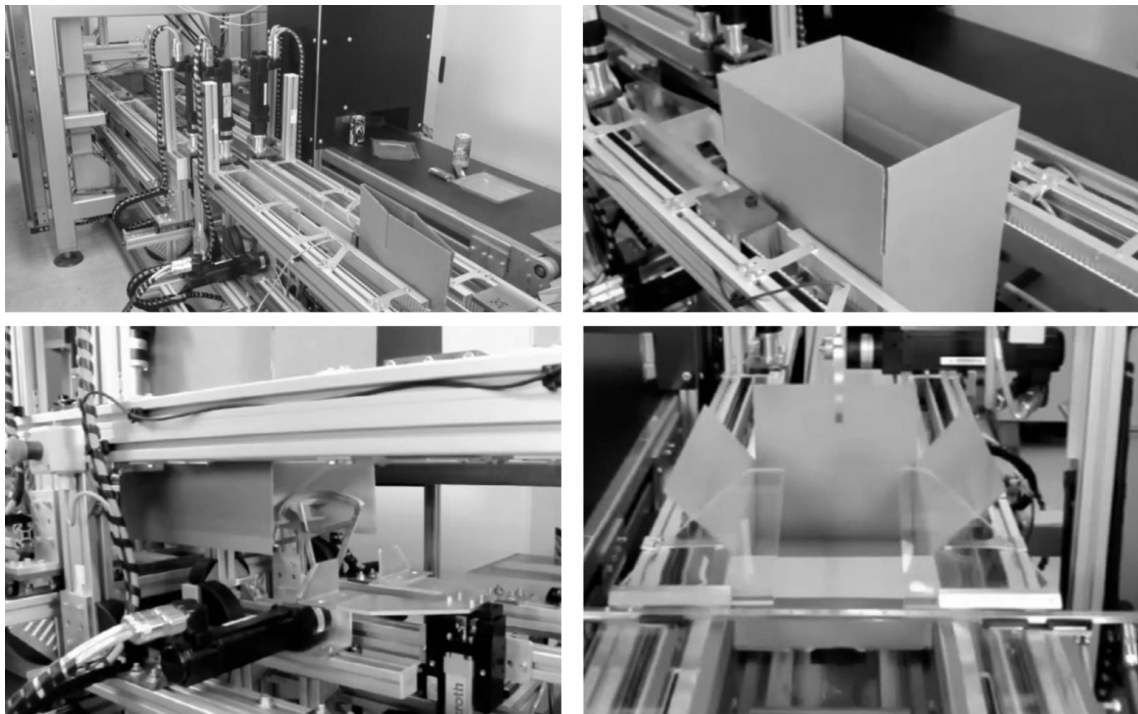
Im Rahmen der Patentrecherche und -analyse konnten Patentschriften ermittelt werden, welche eine inhaltliche Nähe zum Differenzbandverfahren aufweisen (u. a. DE 1022959, DE 3606093, DE 4232956). Jedoch sind die Patente, die zwischen zwei Bändern oder vergleichbaren Systemen eine Faltschachtel aufgrund einer Differenzgeschwindigkeit aufzurichten, bereits ausgelaufen (DE 1101926B, CH 444648, CH 502893). Ferner ist keine Nutzung des Differenzbandverfahrens in der industriellen Praxis bekannt, vgl. Arbeitsschritt 2. Da die Patente keine weiterführenden Erkenntnisse enthalten, wird auf eine detailliertere Darstellung an dieser Stelle verzichtet.

Die Analyse von wissenschaftlichen Arbeiten hat keine zusätzlichen Erkenntnisse bezüglich des Differenzbandverfahrens aufgezeigt. In den Arbeiten DAI & JONES (2002), DUBEY & DAI (2006), DAI ET AL. (2009), DAI & CALDWELL (2010), YAO ET AL. (2010), YAO ET AL. (2011), DAI ET AL. (2012, S. 501 ff.) und YAO & DAI (2012) wird die Entwicklung eines veränderungsfähigen Faltsystems für ebene Faltschachtelzuschnitte dargestellt und auch anhand eines Versuchsaufbaus validiert. Das Kernelement des Versuchsaufbaus sind vier sogenannte Faltfinger. Die dortigen Erkenntnisse sind allerdings nicht auf das Differenzbandverfahren übertragbar. Für die Simulation des Faltvorgangs kann bspw. der von MULLINEUX & MATTHEWS (2010) dargelegte regelbasierte Ansatz genutzt werden.

Anhand eines vereinfachten Funktionsträgers konnte eine erste praktische Validierung des Differenzbandverfahrens durchgeführt werden. Die für das Aufzurichten notwendige Relativbewegung wurde einseitig mit einer elektromechanischen Linearachse erzeugt. In diesem Rahmen konnte die grundsätzliche Funktionsfähigkeit erprobt werden. Die erzielten Erkenntnisse dieser Technologiebasisstudie waren Basis für eine Weiterverfolgung des Differenzbandverfahrens im Rahmen einer erweiterten Technologiestudie.

### 5.3.4 Schritt 4: Erweiterte Technologiestudie – Differenzbandverfahren

Im Folgenden wird der Aufbau eines Funktionsträgers ausgeführt, welcher für die erweiterte Technologiestudie im Rahmen dieser Arbeit realisiert wurde. Ebenfalls werden die durchgeführten Versuche und deren Erkenntnisse dargelegt. Dieser Funktionsträger umfasst das Aufrichten der ebenen Faltschachtel mit dem Differenzbandverfahren, das Verschließen der Faltschachtelunterseite und das Befüllen, vgl. Abbildung 59. Außerhalb der gewählten Realisierungsgrenzen sind das Magazinieren der Faltschachteln und das Verschließen der Oberseite.



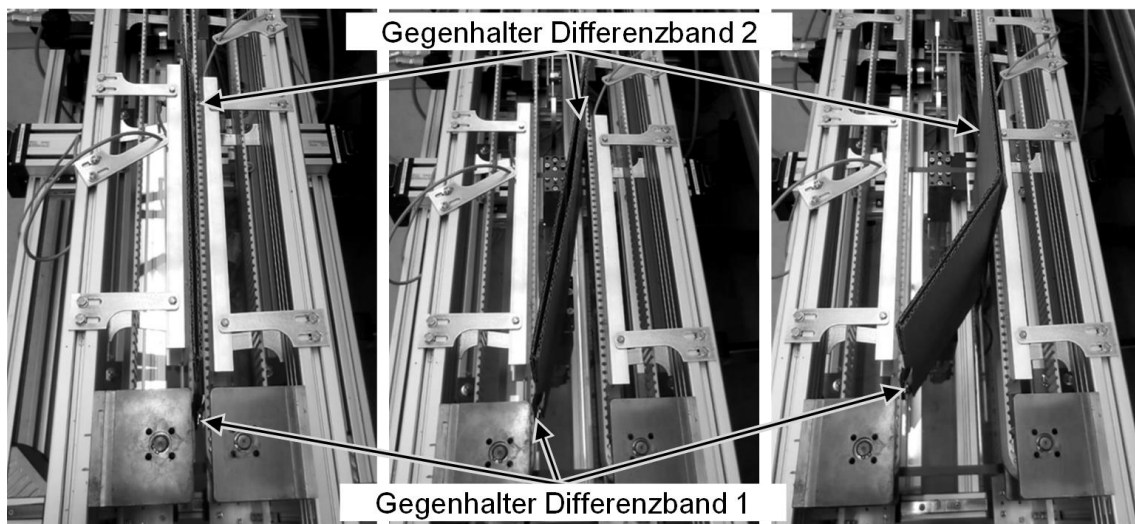
*Abbildung 59: Funktionsträger für die Untersuchung des Differenzbandverfahrens; Gesamtsystem (l. o.); Differenzbandsystem (r. o.); Verschließen der Unterseite (l. u.); Vorbereiten der Oberseite für das automatisierte Befüllen (r. u.)*

Für eine Automatisierung des Befüllens umfasst das Gesamtsystem zusätzlich ein Förderband für die Zuführung der unterschiedlichen Füllgüter, ein Bildverarbeitungssystem sowie ein Parallelroboter- und Greifersystem. Durch die Integration der nach dem Aufrichten folgenden Prozesse, das Falten der Front-, Rück- und Seitenklappen sowie dem Verkleben mittels Klebeband ist sichergestellt, dass die Funktionsfähigkeit nicht nur singular anhand des Differenzbandverfahrens überprüft wird. Der Funktionsträger ist ferner untergliedert in das Differenzbandsystem und in das Transportbandsystem.

## 5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool

---

Die durchgeführten Versuche mit dem Funktionsdemonstrator belegen, dass das Differenzbandverfahren in dieser Form maschinell abbildbar ist. Allerdings zeigte sich auch, dass die Faltschachteln während des Aufrichtens teilweise zum Einknicken neigen, vgl. Abbildung 60. Dieses Verhalten zeigt große Ähnlichkeiten zu den Eulerschen Knickfällen auf (vgl. MAYR 2015, S. 353ff.). Durch die beiden Gegenhalter, den verfahrenen Breitenverstellungen und einem verzögerten Öffnen der Faltschachtel wird ein indifferenter Zustand erzeugt, vgl. mittleres Bild in Abbildung 60. Wie die Theorie hinter den Eulerschen Knickfällen besagt, so steigt die Knickneigung mit einer zunehmenden Objektlänge. Dies bestätigten die durchgeführten Versuche mit unterschiedlichen Faltschachtelgrößen. Im Rahmen der Technologiebasisstudie war dieses Verhalten nicht detektierbar, da der Formatbereich des Funktionsträgers nicht ausreichend groß war.



*Abbildung 60: Beispiel für ein Knicken einer Faltschachtel während des Aufrichtens mit dem Differenzbandverfahren*

Unterschiedliche Gegenmaßnahmen wurden konzeptionell erarbeitet und praktisch erprobt. Zum Beispiel wurden die beiden Gegenhalter hinsichtlich der geometrischen Gestaltung variiert, um ein rechtzeitiges Öffnen vor dem indifferenter Zustand zu erzielen. Ferner wurde untersucht, ob mit einer Modifikation der Bewegungsparameter, z. B. Geschwindigkeit, während des Aufrichtens das rechtzeitige Öffnen sichergestellt werden kann. Jedoch konnte mit keiner dieser Maßnahmen ein vollständig zufriedenstellendes Resultat erzielt werden. Auch wurden Konzepte untersucht, wie zumindest bei einer der beiden Seiten eine flächige Krafteinwirkung erzielt werden kann. Es wurde bspw. ein Material getestet, das für sogenannte Geckogreifer, vgl. FESTO (2012) und BINDER (2013), eingesetzt wird. Jedoch zeigten Versuche, dass dieses Material, welches auf Adhäsion beruht, für raue Werkstoffe wie Wellpappe nicht geeignet ist.



Das abschließend umgesetzte Konzept wird nachfolgend dargestellt, vgl. Abbildung 61. Der mechanische Gegenhalter des Differenzbandes 2 wurde durch Unterdrucksauger ersetzt. Diese sind in dieser Form zunächst ortsfest, wobei der verbleibende Gegenhalter weiterhin durch das Differenzband 1 ortsvariabel bleibt. Der Formatbereich des Funktionsträgers ist durch die Maßnahme nicht reduziert. Der flexible Gegenhalter und die formatunabhängige Positionierung der Unterdrucksauger ermöglicht weiterhin den gesamten Formatbereich ohne Umrüstvorgang abzudecken zu können. Nachteilige Aspekte des Konzepts sind, dass die Unterdrucksauger verschleißbehaftet sind sowie einen Druckluft- bzw. Vakuumverbrauch haben. Das abschließend realisierte Differenzbandverfahren ist somit eine Kombination aus einem Aufdrücken und einem Aufziehen und verbessert die Robustheit und Funktionsfähigkeit deutlich. Die erzielbaren Aufrichtgeschwindigkeiten sind mit denen der industriellen Systeme vergleichbar. Diese sind allerdings abhängig von der aufzurichtenden Faltschachtelgröße.

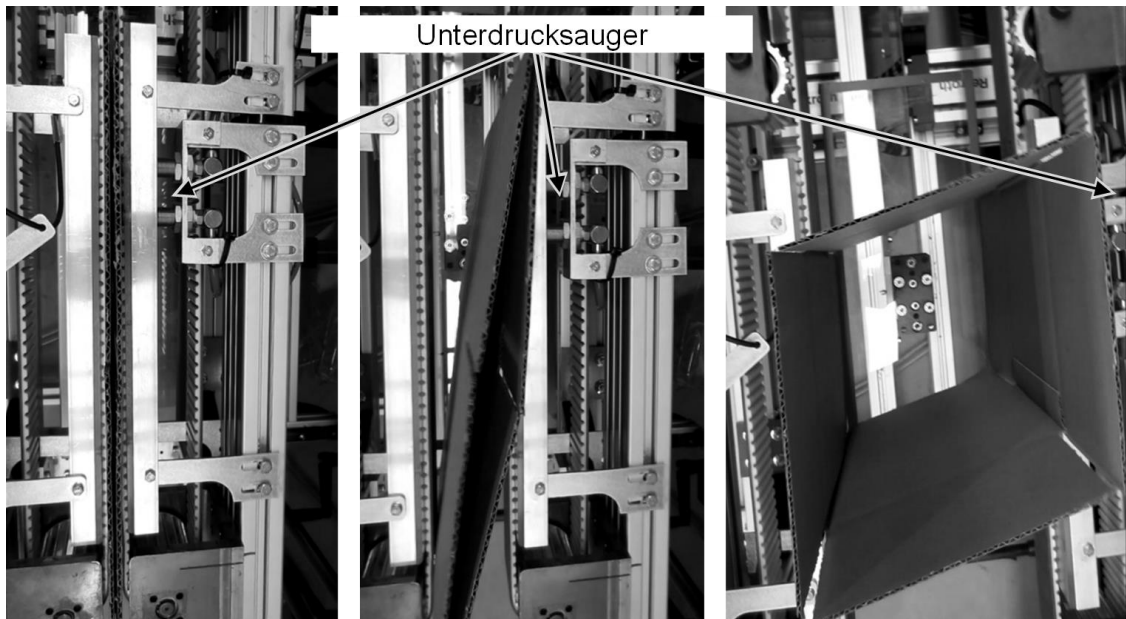


Abbildung 61: Modifiziertes Differenzbandverfahren

### 5.3.5 Schritt 5: Transfer

Im Folgenden werden die Aspekte eines Transfers in die Entwicklung einer formatflexiblen Faltschachtel-Aufrichtemaschine zusammenfassend beschrieben. Die Ausführungen des Arbeitsschrittes Ideengenerierung und -bewertung haben aufgezeigt, dass hinsichtlich der inhärenten Flexibilität von Verfahren für die Funktion Aufrichten keine signifikanten Unterschiede feststellbar sind. Ein ähnlich hohes verfahrensinhärentes Potenzial wie bspw. bei Thermoformverpackungsmaschinen wird nicht gesehen. Daher sind für eine Steigerung der Format-

## **5 Entwicklung formatflexibler Verfahren mit dem Methodenbaustein Funktionspool**

---

flexibilität die Methodenbausteine Modellierung der Formatflexibilität und der Gestaltungspool bedeutsamer. Das Differenzbandverfahren ist grundsätzlich für ein quasi kontinuierliches und formatflexibles Aufrichten geeignet. Der Funktionsbeweis wurde dargelegt. Allerdings war der dargestellte Systemaufbau für eine Sicherstellung der Funktionsfähigkeit zu modifizieren. Der Einsatz von Unterdrucksaugern anstelle eines Gegenhalters ist vielversprechend. In Summe sind weitere Arbeiten nötig, um das Differenzbandverfahren weiterzuentwickeln und in industriellen Entwicklungsprojekten berücksichtigen zu können.

### **5.4 Fazit**

Die Ausführungen zeigen das verfahrensseitige Potenzial für eine Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen. Für zwei typische und aufgrund der Rahmenbedingungen notwendig zu flexibilisierenden Funktionen wurden Verfahren identifiziert, die ein höheres inhärentes Flexibilitätspotenzial aufweisen als die aktuell eingesetzten Verfahren. Es wurde dargelegt, dass ein flexibleres Verfahren nicht zwangsläufig mit Geschwindigkeitseinbußen verbunden sein muss, vgl. das Differenzbandverfahren. Allerdings sind die dargelegten Verfahren hinsichtlich ihrer Technologiereife teilweise noch nicht soweit fortgeschritten, dass aktuell eine Berücksichtigung im Entwicklungsprozess möglich ist. Hier besteht der Bedarf an weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

In der Ideengenerierung und -bewertung zum Verschließen wird deutlich, dass aus der Vielzahl von Verfahren, welche in der Verpackungs- bzw. Fertigungstechnik zum Fügen von Kunststoffen eingesetzt werden, nur wenige für die Anwendung in Thermoformverpackungsmaschinen geeignet sind. Daher können diese Verfahren auch keinen Beitrag für eine Flexibilitätssteigerung leisten. Das den Ausführungen zugrunde liegende Vorgehensmodell und die spezifischen Anpassungen hinsichtlich der Formatflexibilität ermöglichen ein strukturiertes, nachvollzieh- und reproduzierbares Ermitteln und Validieren von neuen Verfahren. Maßgeblich ist die Ermittlung der einschlägigen Suchfelder für die Identifizierung von relevanten Verfahren, vgl. Kunststoffschweißen. Auch ist die Nutzung von bekannten Techniken der Entwicklung, z. B. Kreativitätstechniken, für die Ideengenerierung nötig, da nicht für alle Funktionen von Verpackungsmaschinen in anderen Bereichen ähnliche Verfahren zu finden sind. Anhand der dargelegten Charakterisierung der Treiber bzw. Hemmnisse der inhärenten Flexibilität eines Verfahrens können Verfahrensvarianten abgeleitet werden, die bspw. mit einer Kinematisierung das inhärente Flexibilitätspotenzial steigern.

## 6 Anwendung und Bewertung

### 6.1 Überblick

Im Folgenden wird die Anwendung der Methodenbausteine Szenario-Steckbrief, Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs und Gestaltungspool unabhängig voneinander veranschaulicht. Es soll insbesondere die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Anwendungsfälle und Verpackungsmaschinen gezeigt werden. Daher werden unterschiedliche Fallbeispiele anhand der in Kapitel 5 beschriebenen Verpackungsmaschinentypen ausgewählt. Die Anwendung der Methodenbausteine Szenario-Steckbrief, in Abschnitt 6.2, und Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs, in Abschnitt 6.3, wird anhand von Fallbeispielen des Maschinentyps Thermoformverpackungsmaschine aufgezeigt. Eine Faltschachtel-Aufrichtemaschine ist die Basis für das Fallbeispiel der Anwendung des Gestaltungspools (Abschnitt 6.4). Die Bewertung des Gesamtkonzepts und der Methodenbausteine folgt in Abschnitt 6.5.

### 6.2 Szenario-Steckbrief

Die Anwendung des Methodenbausteins wird in Abschnitt 6.2.1 anhand eines Fallbeispiels des Maschinentyps Thermoformverpackungsmaschine gezeigt. Die Erkenntnisse aus der Anwendung werden in Abschnitt 6.2.2 zusammengefasst.

#### 6.2.1 Fallbeispiel Thermoformverpackungsmaschine

##### Schritt 1: Szenario-Vorbereitung

In der Szenario-Vorbereitung werden das Planungsobjekt und die -situation sowie die Zielsetzung definiert. Das Planungsobjekt ist eine Thermoformverpackungsmaschine. Hinsichtlich der Formatflexibilität werden im Folgenden vier Maschinenvarianten unterschieden. Im Rahmen der Anwendung soll die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Maschinenvarianten im Hinblick auf deren Formatflexibilität bewertet werden. Somit wird deren Eignung für die Bedienung eines Marktsegmentes überprüft, welches dem Fallbeispiel zugrunde liegt. Als Informationsquelle für das Fallbeispiel dienen Erfahrungs- und Schätzwerte, welche im Rahmen von Experteninterviews ermittelt wurden. Abschließend sollen Rückschlüsse auf zukünftige Entwicklungsprojekte gezogen werden, mit der Zielsetzung die Formatflexibilität zu steigern.

Das Fallbeispiel wird zunächst skizziert. Der Betreiber der Verpackungsmaschine hat die Herstellung von mehreren Packungen geplant. Die Formatwechsel erfordern jeweils eine Änderung der Abzugslänge. Die Abzugslänge ist die Folielänge, die innerhalb eines Maschinentaktes verarbeitet wird. Diese ist abhängig von der Anzahl der Reihen sowie der Länge der Verpackung. Eine Änderung der Abzugslänge ist deutlich aufwendiger als z. B. ein Wechsel der Formschalen. Eine Änderung der Abzugslänge wirkt sich auf alle drei Bearbeitungsstationen Formen, Verschließen und Trennen aus. Der manuelle Füllprozess ist außerhalb der Systemgrenze. Hinsichtlich der technischen Ausstattung für die Durchführung des Formatwechsels werden vier Maschinenvarianten unterschieden:

- *Maschinenvariante 1 – Standardformatwechsel:* Bei dieser Variante müssen alle notwendigen Rüsttätigkeiten manuell ausgeführt werden. Besondere Hilfsmittel, vgl. Variante 2, sind nicht vorgesehen. Mit einer Rüstdauer von ca. 40 Minuten ist zu rechnen.
- *Maschinenvariante 2 – Formatwechsel mit mechanischer Unterstützung:* Die Rüsttätigkeiten sind wiederum manuell auszuführen. Aufgrund von konstruktiven Verbesserungen gegenüber der Variante 1 kann die Rüstzeit um ca. 15 Minuten auf ca. 25 Minuten reduziert werden.
- *Maschinenvariante 3 – Automatisierter Formatwechsel:* Teile des Formwerkzeugsystems, z. B. Formschalen, werden bei dieser Variante vollautomatisch gewechselt. Jedoch sind das Siegel- und die Schneidwerkzeuge weiterhin manuell anzupassen. Die Automatisierung kann nur teilweise die Komponenten des Formwerkzeugsystems, die bei einer Abzugslängenänderung zu wechseln sind, tauschen. Das Rüsten dauert ca. 23 min.
- *Maschinenvariante 4 – Multiformatmaschine:* Bei dieser Variante ist eine Formatumstellung in weniger als einer Minute möglich, da alle Werkzeugsysteme mehrfach in der Maschine vorhanden sind. Diese Werkzeugsysteme können je nach Bedarf aktiviert werden. Jedoch müssen Werkzeugsysteme, welche nicht aktiviert sind, weiterhin während eines Maschinenstillstandes umgerüstet werden. Wenn für alle Formate die passenden Werkzeugsysteme vorbereitet sind, kann die notwendige Anpassung der aktiven Werkzeugsysteme ohne einen manuellen Eingriff stattfinden. Diese Multiformatauslegung bedingt einen deutlich höheren Platzbedarf.

Die Angaben zu den allgemeinen Planungsdaten sind der Tabelle 17 zu entnehmen. Ferner wird zunächst angenommen, dass alle Planungsdaten über die Nutzungsdauer konstant bleiben. Die maschinenspezifischen Daten werden in Tabelle 18 aufgeführt.

Tabelle 17: Allgemeine Planungsdaten

	Planungsdaten
Maschinenarbeitszeit	2016 h/Jahr
Anzahl der Formatwechsel	504 Stück/Jahr
Erlös pro Stück	0,10 €/Stück
Stundensatz des Bedienpersonals	50 €/Stück
Stundensatz des Rüstpersonals	50 €/Stück
Kalkulationszinssatz	7 %
Nutzungsdauer	10 Jahre

Tabelle 18: Auszug der maschinenspezifischen Daten

	Maschinenvarianten			
	#1	#2	#3	#4
Anzahl der Betriebsmitarbeiter	1	1	1	1
Anzahl der Rüstmitarbeiter	2	1	1	0
Einstellausbringung	1920 Stk./h	1920 Stk./h	1920 Stk./h	1920 Stk./h
Dauer eines Rüstvorgangs	0,67 h	0,42 h	0,38 h	0,02 h
Maschinenkosten	170.000 €	190.000 €	210.000 €	310.000 €
Formatwerkzeugkosten	50.000 €	50.000 €	50.000 €	50.000 €

## Schritt 2: Szenariofeld-Analyse

Der zweite Schritt umfasst die Berechnung der variantenspezifischen Kapitalwerte. Die Planungsdaten werden hierfür in das Wirtschaftlichkeitsmodell übertragen und der Kapitalwert der einzelnen Varianten ermittelt, vgl. Tabelle 19.

Tabelle 19: Kapitalwerte auf Basis der Planungsdaten

	Maschinenvarianten			
	#1	#2	#3	#4
<b>Kapitalwert</b>	1.018.897 €	1.325.700 €	1.339.014 €	1.542.385 €

Für den vorliegenden Fall und falls keine Abweichungen von den Planzahlen in der geplanten Nutzungsdauer von 10 Jahren auftreten würden, stellt die vierte Variante die wirtschaftlichste Alternative dar.

Auf Basis der nachfolgenden Sensitivitätsanalyse wird überprüft, inwiefern die Güte des Ergebnisses von den Schwankungen der Eingangsgrößen abhängig ist. Die Einflussgrößen sind zu variieren und die Auswirkungen auf den Kapitalwert

## 6 Anwendung und Bewertung

zu ermitteln. Die ausgewählten Stufen sind 50 %, 75 %, 125 % und 150 % der Planungsdaten. Für die Auswertung sind die einzelnen Maschinenvarianten miteinander oder auch die Variation der Eingabewerte in Abhängigkeit von der jeweiligen Maschinenvariante zu vergleichen. Die Einflussfaktoren werden anhand der jeweiligen Sensitivität bewertet und mit einer Priorisierung die Schlüsselfaktoren bestimmt. Für die Ableitung der Schlüsselfaktoren ist in der vorliegenden Planungssituation eine Fallunterscheidung zweckmäßig. Hinsichtlich der Bewertung der Wirtschaftlichkeit weisen folgende drei Einflussfaktoren, unabhängig von der ausgewählten Maschinenvariante, die höchste Signifikanz auf und werden daher im Weiteren als Schlüsselfaktoren angesehen:

- die Erlöse pro Stück,
- die Einstellausbringung und
- die Maschinenarbeitszeit.

Diese Werte haben den größten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit und sollten daher aus Sicht eines Maschinenkäufers, um eine zukunftsrobuste Investitionsentscheidung zu treffen, besonders im Rahmen der Projektions-Entwicklung betrachtet werden. Daher werden die Zukünfte dieser Schlüsselfaktoren im Rahmen des nächsten Schrittes detaillierter beleuchtet. Für die Produktentwicklung ist zudem die Betrachtung der Einflussfaktoren, die mittel- oder unmittelbar mit der Formatflexibilität zusammenhängen, von Interesse, vgl. Abbildung 62.

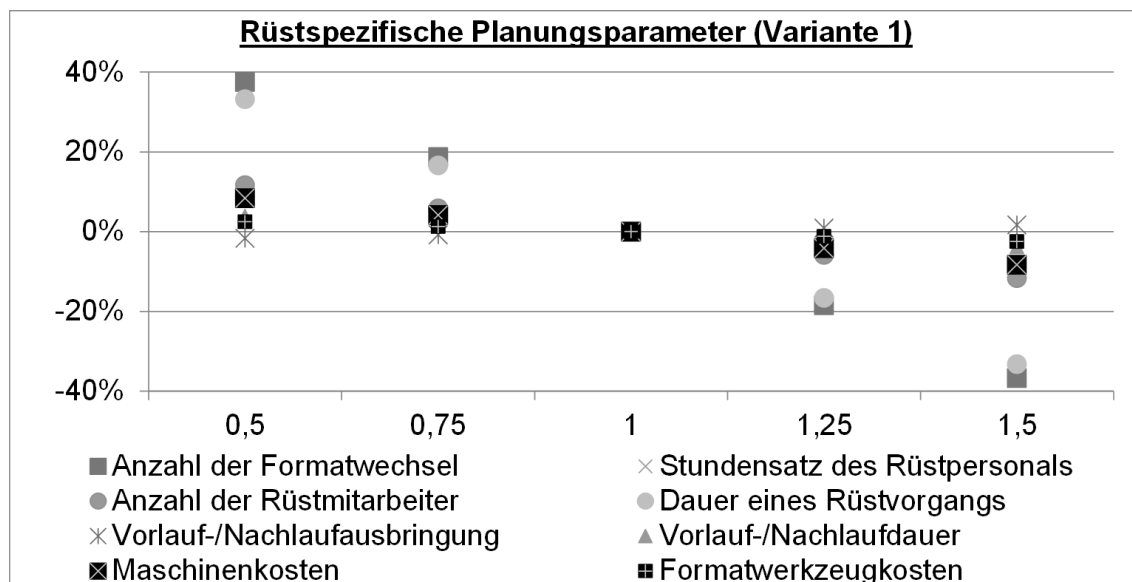


Abbildung 62: Sensitivitätsanalyse der rüstspezifischen Planungsparameter am Beispiel der Maschinenvariante 1

Diese liegen im Gegensatz zu den Rahmenbedingungen, wie Maschinenarbeitszeit oder der Stückerlös, im Einflussbereich der Entwicklung. Bei dieser fokussierteren Betrachtung zeigen insbesondere die Anzahl der Formatwechsel und die Dauer eines Rüstvorgangs eine höhere Signifikanz auf. Die Maschinenkosten und die Formatwerkzeugkosten haben im Vergleich einen geringen Einfluss.

### **Schritt 3: Projektions-Entwicklung**

Im Rahmen der *Projektions-Entwicklung* werden die unterschiedlichen Zukünfte der ermittelten Schlüsselfaktoren vorgedacht und anhand von Szenarien prognostiziert. Im Rahmen dieses Fallbeispiels werden je Schlüsselfaktor zwei heterogene Zukünfte betrachtet. Die schlüsselfaktorspezifischen Zukünfte werden auf Basis fundierter Analysen und potenziellen Einfluss-Auswirkungsbeziehungen ermittelt. Diese sind eine optimistische und eine eher pessimistische Einschätzung. Für das Fallbeispiel werden zwei Fälle je Schlüsselfaktor prognostiziert:

- die Maschinenarbeitszeit:  
positive Entwicklung um +5 % und negative Entwicklung um –10 %
- die Erlöse pro Stück:  
Anhebung um +5 % und Senkung um –20 %
- die Einstellausbringung:  
Steigerung um +5 % und eine um –25 % niedrigere Einstellmenge.

Durch die Kombination der einzelnen Entwicklungen der Schlüsselfaktoren werden acht unterschiedliche Szenarien abgeleitet.

### **Schritt 4: Szenario-Bildung**

Im folgenden Arbeitsschritt *Szenario-Bildung* werden zunächst die Kapitalwerte der einzelnen Szenarien je Variante der Thermoformverpackungsmaschine ermittelt. Die Auswirkungsanalyse erfolgt grafisch, vgl. Abbildung 63. Anhand der Analyse der grafischen Aufbereitung wird deutlich, dass die vierte Variante bei allen Szenarien die wirtschaftlichste Alternative darstellt. In Summe weist die Auswahl der Maschinenvariante 4 somit eine ausreichende Robustheit gegenüber Umfeldveränderungen auf.

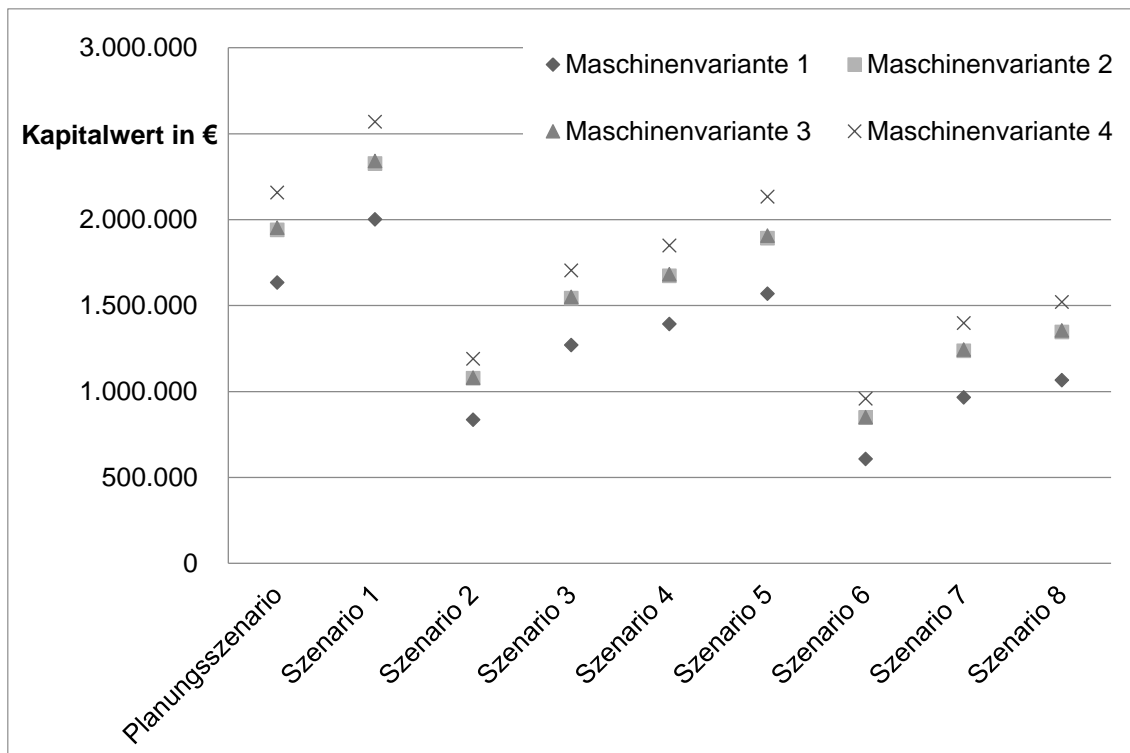


Abbildung 63: Auswirkungsanalyse der acht Szenarien

### Schritt 5: Szenario-Transfer

Der *Szenario-Transfer* ist der abschließende Arbeitsschritt. Wie bereits dargelegt, ist für das Fallbeispiel die vierte Variante die wirtschaftlichste Lösung. Aus diesen Erkenntnissen sind Potenziale für eine weitere Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Verpackungsmaschinen im Hinblick auf die Formatflexibilität im Rahmen von Entwicklungsprojekten abzuleiten. Dies definiert weitere wirtschaftliche Anforderungen. Für deren Beantwortung wird wiederum das Wirtschaftlichkeitsmodell eingesetzt. Es folgen zwei exemplarische Fälle.

#### *Fall 1: Reduktion der Formatwechselzeiten der Maschinenvarianten 1, 2 und 3*

Der Einsatz einer Multiformatmaschine ist mit deutlich höheren Investitionskosten verbunden und teilweise auch nicht möglich, da z. B. nicht genügend Aufstellfläche zur Verfügung steht. Daher soll mit den Maschinenvarianten 1, 2 und 3 die gleiche Wirtschaftlichkeit wie mit Variante 4 erreicht werden. Um welche Zeitspanne ist die Rüstdauer je Vorgang zu reduzieren? Das Berechnungsergebnis kann der Tabelle 20 entnommen werden.

Bei allen Varianten wäre eine Reduzierung der Formatwechselzeiten auf ca. 8 bis 9 Minuten nötig. Dies entspricht mehr als 60%.



Tabelle 20: Notwendige Senkung der Formatwechselzeiten

		Maschinenvarianten			
		#1	#2	#3	#4
<b>Dauer Format- wechsel</b>	<b>Aktueller Wert</b>	0,67 h	0,42 h	0,38 h	0,02 h
	<b>Zielwert</b>	0,15 h	0,16 h	0,14 h	0,02 h
	<b>Reduktionsbedarf</b>	77%	62%	64%	-

Fall 2: Reduktion der Maschinenkosten der Maschinenvarianten 1, 2 und 3

Um mit den Varianten 1, 2 und 3 die gleiche Wirtschaftlichkeit zu erzielen, ist eine Überlegung, die Maschinenkosten zu senken. Auf welchen Betrag sind die Maschinenkosten zu senken, um den Kapitalwert der Maschinenvariante 4 zu erreichen? Die Tabelle 21 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 21: Notwendige Senkung der Maschinenkosten

	Maschinenvarianten			
	#1	#2	#3	#4
<b>Aktuelle Maschinenkosten</b>	170.000 €	190.000 €	210.000 €	310.000 €
<b>Zielkosten</b>	-869.147 €	-678.367 €	-658.919 €	-

Die Berechnungsergebnisse verdeutlichen, dass mit einer Reduzierung der Maschinenkosten die Wirtschaftlichkeit der vierten Variante nicht erreicht werden kann. Daher kann gefolgert werden, dass ein ausschließliches Kostenreduktionsprojekt nicht zielführend ist. Für eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit ist die Formatflexibilität dieser Maschinenvarianten zu steigern. Ferner ist anhand der Abbildung 62 bekannt, dass insbesondere die maschinenspezifischen Einflussfaktoren Dauer eines Formatwechsels sowie die Anzahl der Rüstmitarbeiter einen besonderen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben. Dies hat insbesondere bei der Initiierung weiterer Entwicklungsprojekte Beachtung zu finden.

### 6.2.2 Fazit

Der Einsatz des Wirtschaftlichkeitsmodells und des Vorgehensmodells wurde anhand eines Fallbeispiels veranschaulicht. Das Wirtschaftlichkeitsmodell gestattet durch die Verknüpfung der Beschreibung der Wirtschaftlichkeit mit der Produktivität spezifische Fragestellungen zu beantworten, welche in der Weiterentwicklung zu berücksichtigen sind. Dieses kann für die Ermittlung des investitionsbezogenen Kapitalwerts sowie für die Bestimmung der notwendigen Rüstzeit

verwendet werden. Daneben können u. a. die Maschinenmehrkosten berechnet werden, die unter der Maßgabe einer Flexibilitätssteigerung und einer gleichzeitigen Beibehaltung des Kundennutzens, erzielbar erscheinen. Da alle Phasen eines Formatwechsels in der Modellierung berücksichtigt sind, können auch spezifischere Fragen bei Maschinen, die eine ausgeprägte Hochlauf- bzw. Nachlaufphase aufweisen, beantwortet werden. Die Modellierung scheint auch geeignet zu sein, andere Verarbeitungsmaschinen in ausreichender Güte zu beschreiben. In dieser Form ist das Modell für die frühe Phase eines Entwicklungsprozesses ausgelegt, daher werden vereinfachte Annahmen getroffen, z. B. formatunabhängige Formatwechselzeiten und Einstellausbringungsmengen. Dies sind auch berechtigte Vereinfachungen, um den Aufwand für die Datenerhebung nicht deutlich zu vergrößern. Im Bedarfsfall ist die Modellierung um diese Aspekte zu erweitern. Auf Basis der aktuellen Beschreibung und Implementierung ist dies aufwandsarm möglich.

Bei den benötigten Eingabewerten kann davon ausgegangen werden, dass diese im Rahmen einer Kundenanfrage oder aus den Daten der Produktplanung abgeleitet werden können. Die Maschinendaten sollten bei dem Maschinenhersteller anhand von Erfahrungs- oder Schätzwerten ermittelbar sein. Des Weiteren können zusätzliche Einflussfaktoren integriert werden, z. B. Wartungskosten, Energiekosten. Das Wirtschaftlichkeitsmodell ist nicht ausgelegt, um verkettete Verpackungsanlagen zu beschreiben. Die dortigen Abhängigkeiten sind nicht hinterlegt. Der Fokus ist die Beschreibung einer Verpackungsmaschine, ohne die Abhängigkeit von weiteren Verpackungsmaschinen.

Das Vorgehensmodell ermöglicht strukturiert eine Planungssituation zu analysieren und wirtschaftliche Anforderungen an das Planungsobjekt zu definieren. In Zusammenspiel mit dem Wirtschaftlichkeitsmodell werden die sonst im Rahmen von Projekten des Szenario-Managements üblichen hohen Aufwände deutlich reduziert. Die Vorgehensweise ist flexibel, da nicht unbedingt alle Phasen zu durchlaufen sind, um abschließend die Erkenntnisse ableiten zu können. Durch die Fokussierung auf die Schlüsselfaktoren wird sichergestellt, dass die Planungsaufwände auf ein sinnvolles Maß reduziert werden.

In Summe stellt dieser Methodenbaustein eine zweckmäßige Unterstützung dar. Dieser ermöglicht im Rahmen der frühen Phase der Entwicklung wirtschaftliche Anforderungen an Verpackungsmaschinen mit dem Fokus der Formatflexibilität nachvollziehbar und reproduzierbar zu definieren.

### 6.3 Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs

Die Anwendung des Methodenbausteins Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs wird im folgenden Abschnitt 6.3.1 anhand eines Fallbeispiels veranschaulicht, welches auf dem Maschinentyp Thermoformverpackungsmaschine basiert. In Abschnitt 6.3.2 werden die durch die Anwendung erworbenen Erkenntnisse zusammengefasst und ein Fazit gezogen.

#### 6.3.1 Fallbeispiel Thermoformverpackungsmaschine

Mit einer Verpackungsmaschine sollen sieben Packungen hergestellt werden. Als Verpackung ist eine thermogeformte Schale mit einer Oberfolie als Verschlussmittel geplant. Ein bildhaftes Beispiel für eine solche Art von Verpackung kann Abbildung 39 entnommen werden. Neben dieser Primärpackung werden keine weiteren Verpackungsstufen betrachtet. Auf den vierten Schritt Bewertung und Auswahl wird im Rahmen dieses Fallbeispiels nicht eingegangen, sondern auf die Anwendung des Wirtschaftlichkeitsmodells in Abschnitt 6.2 verwiesen.

##### Schritt 1: Modellierung der Packungsvarianten

Die herzustellenden Packungen weisen eine äquivalente Produktstruktur auf. Das Packgut wird in das Packmittel, eine thermogeformte Kunststoffschale, gelegt und nach dem Befüllen mit der Oberfolie als Packhilfsmittel verschlossen. Diesen einzelnen Packungskomponenten werden unterschiedliche Attribute zugeordnet, bspw. die Masse des zu verpackenden Packgutes, die Werkstoffe der Packungskomponenten und geometrische Informationen. Anschließend werden die einzelnen packungsspezifischen Ausprägungen der Attribute gesammelt. Für die praktische Nutzung des matrixbasierten Hilfsmittels für die Schritte 1 und 2 bietet sich ein Tabellenkalkulationsprogramm wie Microsoft Excel® an, vgl. Abbildung 64.

Die attributspezifischen Merkmalskorridore werden aggregiert und damit der benötigte Formatbereich der herzustellenden Packungen sowie die Häufigkeiten ermittelt. Zum Beispiel weist jede Verpackung eine andere Geometrie der Siegelnaht und der Trennkante auf. Der Werkstoff des Packmittels variiert beispielsweise nicht, allerdings die Materialdicke des Folienverbundes zwischen 350 und 450  $\mu\text{m}$ .

## 6 Anwendung und Bewertung

Packungsstruktur	Varianten			Merkmalskorridore	
	#1	#2	...		
<b>Packung</b>					
<b>Packgut</b>					
Attribut 1	Bezeichnung	Käse A	Käse B	...	[Käse A ... G]
Attribut 2	Masse	125g	200g	...	[100 ... 500g]
...					
<b>Verpackung</b>					
<b>Packmittel - Unterfolie</b>					
Attribut 1	Bezeichnung	Unterfolie I	Unterfolie II	...	-
Attribut 2	Werkstoff	APET/PE	APET/PE	...	[APET/PE]
Attribut 3	Dicke	350µm	400µm	...	[350 ... 450µm]
Attribut 4	Formtemperatur	130°C	130°C	...	[130°C]
Attribut 5	Formwerkzeug-Nr.	3387	2601	...	[2601, ..., 3387]
Attribut 6	Formzeit	1,5 sec.	2 sec.	...	[1,5-2s]
...					
<b>Packhilfsmittel</b>					

Abbildung 64: Auszug des matrixbasierten Hilfsmittels für den Schritt 1

### Schritt 2: Ermittlung der prozessspezifischen Formatbereiche

Aus der Packungsstruktur wird die Funktionsstruktur abgeleitet. Diese ist bei dem gewählten Fallbeispiel zunächst die Herstellung der Verpackungsmulde aus einer ebenen Folienbahn, das Befüllen mit dem Packgut, das stoffschlüssige Verschließen der Verpackungsmulde und das abschließende Vereinzeln der Verpackung. Den jeweiligen Funktionen werden die spezifischen Formatbereiche zugeordnet. Dies umfasst auch die Identifikation der Funktionen, welche von einzelnen Merkmalsbündeln nicht betroffen sind. Beispielsweise hat der Werkstoff des Verschlussmittels keine Auswirkung auf den Vorgang Befüllen.

Die Prozessstruktur und die zugehörigen Formatbereiche werden erstellt. Für die Funktionen können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. Diese Verfahren können u. a. mithilfe des Methodenbausteins Funktionspool entwickelt werden. Bei der Funktion Verschließen der Verpackungsmulde kann nach heutigem Stand der Erkenntnisse nur das dauerbeheizte Wärmekontaktverfahren zum Einsatz kommen, vgl. Kapitel 5. Die beiden untersuchten Verfahren Impulssiegeln und Laserstrahlsiegeln können aktuell noch nicht im Rahmen eines Entwicklungsprojektes berücksichtigt werden, vgl. Abschnitt 5.2.5. Für das Formen der Verpackungsmulden kann aus diversen Varianten des Thermoformens ausgewählt werden. Diese Verfahrensvarianten beziehen sich auf das Erwärmen der Folienbahn, z. B. ein- oder mehrstufiges bzw. ein- oder zweiseitiges Erwärmen, sowie auf das Formgebungsverfahren, z. B. Positiv- oder Negativformen bzw. Einsatz eines Vorstreckstempels sowie Vakuum- und/oder Druckluftformen. Auch beim Vereinzeln der Packungen können unterschiedliche mechanische Trennverfahren eingesetzt werden, z. B. Scher- oder Messerschneiden.

### Schritt 3: Erstellen von Systemkonfigurationen

Die *Systemkonfigurationen* werden anhand der Prozessstruktur und der prozessspezifischen Formatbereiche abgeleitet. Hierfür werden mögliche Ressourceneinheiten, welche bereits entwickelt wurden, ausgewählt. Zum Beispiel können die Prozesse für die initiale Funktion Formen in einer Ressourceneinheit abgebildet werden. Der Zustand der Ressourceneinheit muss bei jedem Formatwechsel in einem anderen Ausmaß angepasst werden. Aus den erarbeiteten Informationen der ersten beiden Schritte ist bekannt, dass die Formwerkzeuge bei jedem Formatwechsel auszutauschen und teilweise die Formwerkzeugsysteme aufgrund einer notwendigen Änderung der Abzugslänge zu wechseln sind. Da diese Umrüstattigkeiten bei Maschinenstillstand erfolgen müssen, wird diese Ressourceneinheit mit dem entsprechenden Grundelement beschrieben.

Ein weiteres Beispiel für die Auswahl der passenden Ressourceneinheiten wird bei dem Prozess Trennen dargelegt. Es kann bei den Ressourceneinheiten für das Trennen zwischen ein- und mehrstufigen Verfahren unterschieden werden. Der sogenannte Komplettschnitt trennt in einem Hub die verschlossene Packung aus dem Folienverbund. Bei einem mehrstufigen Trennen wird zuerst die Folienbahn senkrecht zur Transportrichtung geschnitten, gefolgt von einem Schneiden in Transportrichtung. Aufgrund dieser Schnittreihenfolge und den zugehörigen Werkzeugsystemen, z. B. Rollenmesser für das Trennen in Transportrichtung, können ausschließlich Schnittgeometrien hergestellt werden, welche eine rechteckige Grundform mit optionalen Fasen bzw. Radien an den Ecken aufweisen. Diese Restriktion hat ein Komplettschnitt nicht, sodass grundsätzlich ein größerer Formatbereich im Hinblick auf die Schnittgeometrie möglich ist. Allerdings ist ein Zustandswechsel bei den Werkzeugsystemen, welche für ein mehrstufiges Trennen eingesetzt werden, mit einem niedrigeren Aufwand verbunden. Hinsichtlich der Schnittflächenqualität können unstetige Stellen in Form von Kanten bei einem mehrstufigen Trennen nicht ausgeschlossen werden. Da dies im Fallbeispiel eine Anforderung ist, muss der Komplettschnitt zum Einsatz kommen. Eine beispielhafte Systemkonfiguration ist in Abbildung 65 dargestellt.

Bei der Generierung von alternativen Systemkonfigurationen werden die Grundelemente genutzt. Hierbei werden auch bewusst unkonventionelle Konfigurationen erstellt, um sich von den aktuell hemmenden maschinenbaulichen Bedingungen zu lösen. Allerdings sind Restriktionen nicht gänzlich vernachlässigbar. Eine Parallelschaltung von einzelnen Stationen ist bspw. nicht möglich, da die Folienbahn für den innermaschinellen Transport des Verarbeitungsgutes genutzt wird und daher in Reihe geschaltet und mittig ausgerichtet sein muss.

## 6 Anwendung und Bewertung

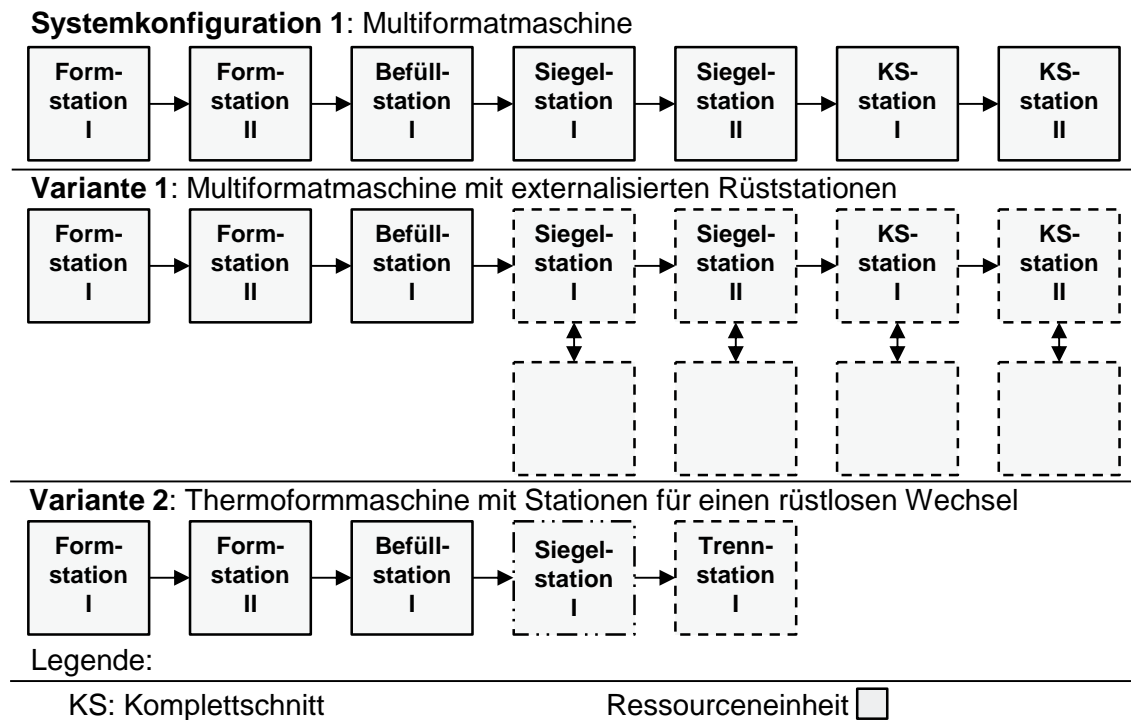


Abbildung 65: Beispielhafte Systemkonfiguration und abgeleitete Varianten

Im Folgenden werden die in Abbildung 65 dargestellten zwei Varianten beschrieben. Bei Variante 1 wird die grundsätzliche Struktur der Multifformatmaschine beibehalten. Allerdings werden die Stationen für das Siegeln und Trennen befähigt, extern umgerüstet zu werden. Hiermit wird der Maschinenstillstand bei einem Formatwechsel minimiert. Die aktuellen Stationen sind noch intern umzurüsten, sodass nur zwischen den beiden Stationen schnell gewechselt werden kann. Entscheidend bei der Entwicklung von extern umrüstbaren Systemen ist, dass u. a. die Einheit ohne internen Aufwand aus dem Arbeitsbereich der Maschine entfernt und wieder in diesen Bereich eingebracht werden kann. Die eingesetzten Verfahren werden hierbei nicht verändert.

Eine solche Veränderung ist bei Variante 2 angedacht. Für die gängigen Verfahren für das Siegeln und Trennen werden geometriegebundene Werkzeuge eingesetzt. Der Einsatz von geometriegebundenen Werkzeugen ist ein Indikator für Verfahren mit einer niedrigeren inhärenten Flexibilität, vgl. Abschnitt 4.7.1. Verfahren, die einen rüstlosen Formatwechsel ermöglichen, müssen allerdings zunächst zur Verfügung stehen, sodass diese von der Entwicklung vorgesehen werden können. Die damit vorgesehenen Potenziale aufzuzeigen ist Inhalt des Methodenbausteins Funktionspool, vgl. Abschnitte 4.7 und 5. Nach der multi-kriteriellen Bewertung der generierten Alternativen können die ausgewählten Konzepte detailliert werden.

### 6.3.2 Fazit

Anhand eines Fallbeispiels wurden das Vorgehen und der Nutzen des Methodenbausteins im Rahmen der Konzeptionsphase aufgezeigt. Das Vorgehensmodell und die dargestellten Hilfsmittel, u. a. für die Visualisierung, unterstützen bei der strukturierten Konzeption. Ausgehend von den herzustellenden Packungen werden unter Berücksichtigung der Sichten des PPR-Modells abschließend die notwendigen Ressourceneinheiten ausgewählt. Durch die Nutzung der Grundelemente für die Beschreibung der Formatflexibilität einer Ressourceneinheit und die gezielte Generierung von Alternativen, werden weitere Potenziale für eine Steigerung der Formatflexibilität aufgezeigt. Die einzelnen Stufen der Konkretisierung sind angefangen von den lösungsneutralen Funktionen bis hin zu den Ressourceneinheiten durchgängig strukturiert. Aufgrund der fließenden Übergänge zwischen den Stufen kann das Vorgehen grundsätzlich komprimiert werden. Aufgrund der Anlehnung an das PPR-Modell ist ein höherer Automatisierungsgrad für die Anwendung des Methodenbausteins unter der Nutzung einer standardisierten Beschreibung möglich.

## 6.4 Gestaltungspool

Die Anwendung des Methodenbausteins Gestaltungspool wird mit einem Fallbeispiel aus der Entwicklung des Funktionsträgers Faltschachtel-Aufrichtemaschine veranschaulicht, Abschnitt 6.4.1. In Abschnitt 6.4.2 werden die aus der Anwendung erzielten Erkenntnisse zusammengefasst.

### 6.4.1 Fallbeispiel Faltschachtel-Aufrichtemaschine

#### Schritt 1: Analyse

Die abgebildeten Arbeitsschritte des Funktionsträgers und insbesondere die Funktion Aufrichten sind bereits in Abschnitt 5.3 beschrieben. Bei der Realisierung des Funktionsträgers sind mehrere Gestaltungshinweise umgesetzt worden, wobei im Folgenden ein exemplarisches Beispiel dargestellt wird. Aufgrund der unterschiedlichen Faltschachtelabmessungen sind bei der Formatanpassung alle drei Raumdimensionen zu beachten. Für die Reduzierung des Umstellaufwandes sind die Faltschachtelmitte in Transportrichtung und die Unterseite der aufgerichteten und verschlossenen Faltschachteln fixiert. Dies führt u. a. dazu, dass die vertikal eingelegten Faltschachteln auf unterschiedlichen Höhen zu positionieren sind. Dies ist in Abbildung 66 dargestellt.

## 6 Anwendung und Bewertung

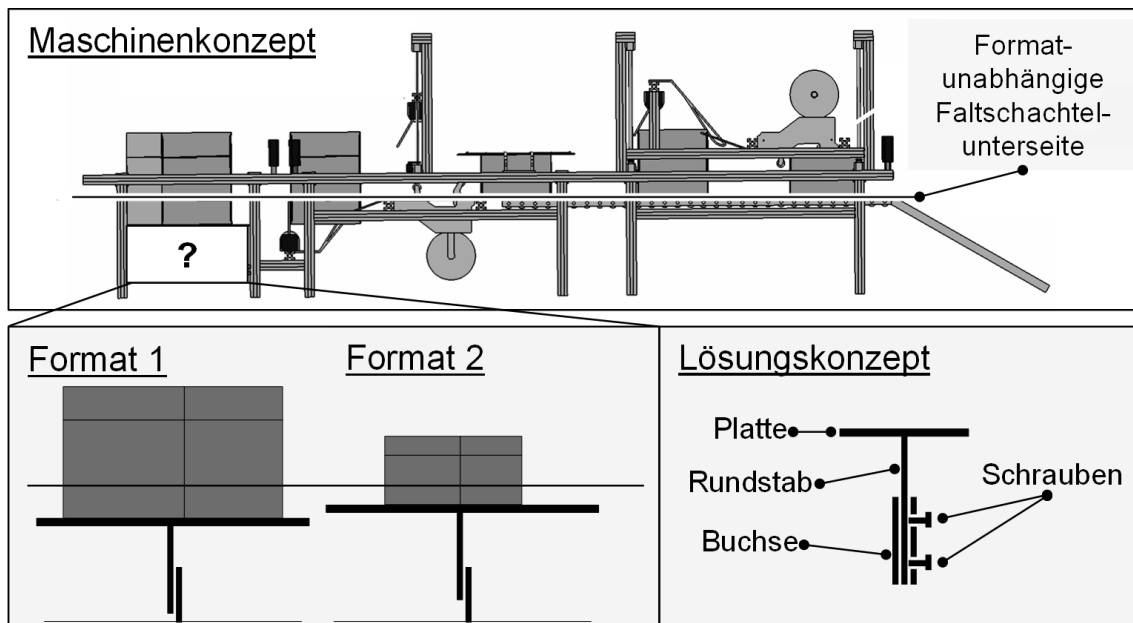


Abbildung 66: Fixierte Faltschachtelunterseite (oben, l. u.) und Detailansicht auf die zu optimierende Funktionseinheit (r. u.)

Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf diese Funktionseinheit für das Positionieren der unverarbeiteten Faltschachtel vor und während des Aufrichtens, um eine kompakte und gut nachvollziehbare Darstellung zu gewährleisten. Ferner ist aufgrund der Zielsetzung, dass ein Bedienmitarbeiter den Umrüstvorgang alleine ausführen soll, jeder einzelne Umstellpunkt separat zu optimieren. Daher entfällt auch die Möglichkeit der Parallelisierung von Arbeiten. Das zunächst angedachte Konzept basiert auf einer Platte, welche über einen Rundstab, eine Buchse und zwei Schrauben in der entsprechenden Position fixiert wird, vgl. Abbildung 66. Für den Umrüst- und Einstellvorgang werden ein Schraubenschlüssel und ein Gliedermaßstab benötigt. Dieses Konzept ist eine äußerst kostengünstige Lösung für ein preissensitives Marktsegment. Es wirken keine signifikanten Prozesskräfte auf diese Einheit. Daher ist dieses Konzept ausreichend prozessrobust. Die Zielsetzung ist eine maschinen- und personalbezogene Umrüstzeit von weniger als eine Minute.

### *Beschreibung des Rüstprozesses*

Auf Basis des beschriebenen Maschinenkonzepts werden die daraus ableitbaren Rüstfähigkeitsinkremente und die jeweiligen Zeitdauern konservativ abgeschätzt. Die Auflistung zeigt Abbildung 67. In Summe ist damit zu rechnen, dass der Umrüstvorgang für diese Einheit eine Personalrüstzeit von ca. 13 Minuten benötigt und eine Maschinenstillstandszeit von ca. 7 Minuten anfallen wird. Anhand der aufgelisteten Rüstfähigkeiten wird die Schwachstellenanalyse durchgeführt.



Tätigkeiten						Hilfsmittel		Rüstobjekt			
Vorgangs-Nr.	Bezeichnung	Tätigkeits-Nr.	Externalisierung	Anzahl	Gesamtdauer in min.	Bezeichnung	Abmessung	Bezeichnung	Abmessung	Anzahl	Klassifizierung
1	Bereit-/Zusammenstellen/Holen	RT2	E	1	1,5	Schraubenschlüssel	-	-			
2	Bereit-/Zusammenstellen/Holen	RT2	E	1	1,5	Gliedermaßstab	-	-			
3	Lösen	RT10	I	2	1,5	Schraubenschlüssel	-	Schraube	-	2	S
4	Informieren/Lesen	RT6	VE	1	0,5	Einstellliste	-	-			
5	Ein-/Nachstellen	RT13	I	1	2,0	Gliedermaßstab	-	Platte	-	1	P
6	Spannen/Anziehen	RT11	I	2	1,5	Schraubenschlüssel	-	Schraube	-	2	S
7	Messen (Abstand)	RT16	I	1	1,0	Gliedermaßstab	-	Platte	-	1	P
8	Prüfen (Ausrichtung)	RT15	I	1	0,5	-	-	Platte	-	1	P
9	Aufräumen/Wegbringen	RT3	E	1	1,5	Schraubenschlüssel	-	-			
10	Aufräumen/Wegbringen	RT3	E	1	1,5	Gliedermaßstab	-	-			
<b>Summe</b>				12	13						
<b>Legende:</b>											
Klassifizierung						Externalisierung					
P: primäres Rüstobjekt						E: externe Durchführung					
S: sekundäres Rüstobjekt						I: interne Durchführung					
K: kein Rüstobjekt						VE: interne jedoch externalisierbare Durchführung					

Abbildung 67: Auflistung der Rüsttätigkeiten

### Identifikation und Priorisierung der Verbesserungspotenziale

Mithilfe der beiden Prioritätendiagramme werden die vorhandenen Verbesserungspotenziale identifiziert und priorisiert. Anhand des kumulierten Prioritäten-  
diagramms wird deutlich, dass keine dominanten Rüsttätigkeiten den absolut betrachtet größten Anteil der Rüstzeiten verursachen. Größere Anteile entfallen auf die beiden externalisierten bzw. externalisierbaren Tätigkeiten Bereit-/Zusammenstellen/Holen sowie Aufräumen/Wegbringen. Das rüstinkrementbasierte Prioritätendiagramm ist in Abbildung 68 dargestellt.

Anhand des rüstinkrementbasierten Prioritätendiagramms wurde der eingetragene Verbesserungspfad abgeleitet. Gemäß dem Verbesserungspfad wurden im folgenden Schritt strukturiert einzelne Verbesserungsmaßnahmen ermittelt. Die Priorisierung der Tätigkeiten verdeutlicht, dass die Zielerreichung mit kleineren sowie inkrementellen Verbesserungen kaum möglich ist. Aus dem tätigkeitsaufgelösten Prioritätendiagramm wurde eine Liste der zu verbessernden Rüsttätigkeiten erstellt, welche die Eingangsinformationen für den zweiten Schritt Verbesserung sind.

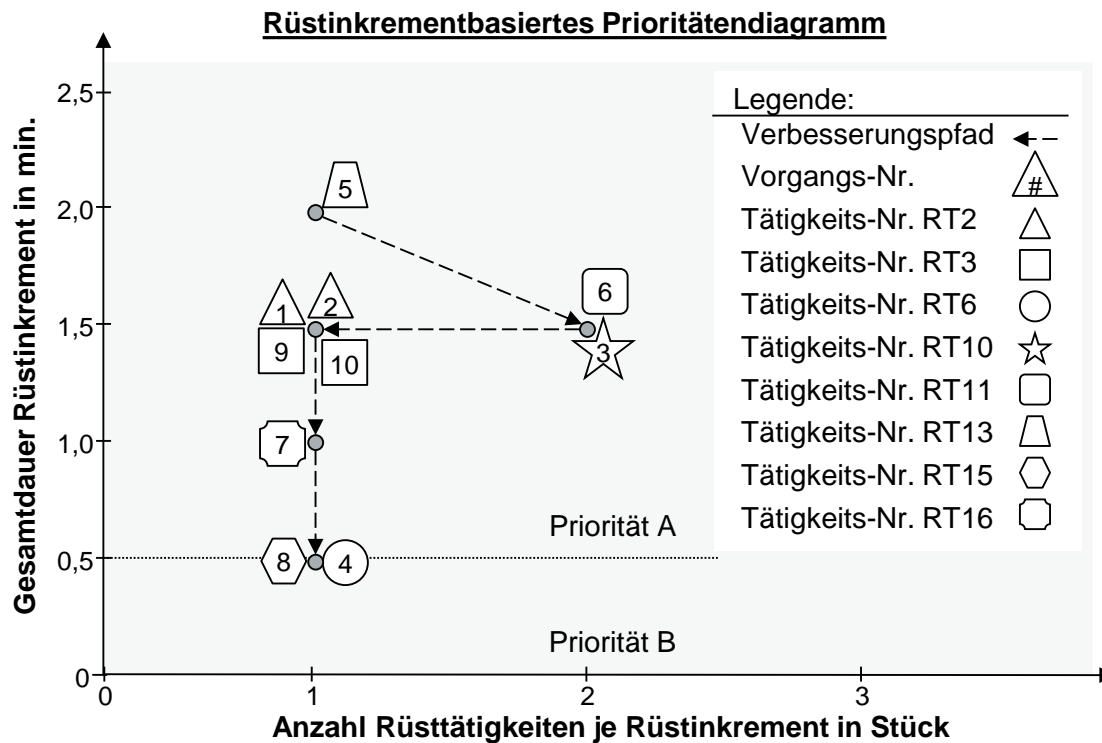


Abbildung 68: Rüstinkrementbasiertes Prioritätendiagramm

### Schritt 2: Verbesserung

Anhand der identifizierten Schwachstellen werden Lösungsvorschläge abgeleitet und Gestaltungsalternativen entwickelt sowie abschließend bewertet.

#### *Identifikation von Verbesserungsideen und Generierung von Lösungsalternativen*

Mit der Zuordnungsmatrix wurden Gestaltungsmaßnahmen abgeleitet, z. B. wenn Einstellungen notwendig, dann Automatisierung und Überwachung durch digitale Messmittel. Anhand dieser wurden Gestaltungsvarianten entwickelt.

#### *Bewertung der Alternativen*

Diese generierten Alternativen wurden anhand von unterschiedlichen Zielkriterien bewertet. Auf eine detaillierte Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet. Abschließend wurde die in Abbildung 69 dargestellte Lösungsalternative im Funktionsträger einer formatflexiblen Faltschachtel-Aufrichtemaschine umgesetzt. Bei dieser Alternative wird der Einstellvorgang vollautomatisch durchgeführt und der zugehörige elektromechanische Antrieb ist für ein Einstellen in weniger als eine Minute dimensioniert.

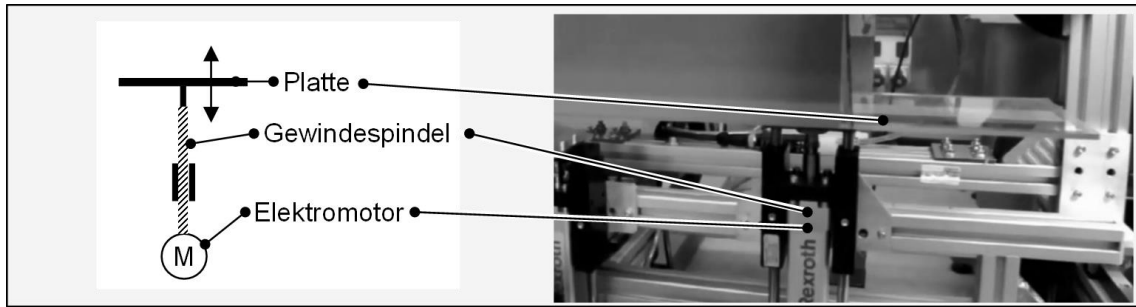


Abbildung 69: Umgesetzte Lösungsalternative

## 6.4.2 Fazit

Die Anwendbarkeit und der praktische Nutzen des Methodenbausteins Gestaltungspool konnte mit diesen Ausführungen aufgezeigt werden. Durch den strukturierten Aufbau wird die Nachvollziehbarkeit sichergestellt, welche insbesondere geeignet erscheint, um im Rahmen einer Teamarbeit eine einheitliche Kommunikationsbasis darzustellen. Durch das Vorgehen wird ausreichend Freiraum für das Kreieren von zusätzlichen und neuartigen Ideen erhalten. Mit den Gestaltungsmaßnahmen wird ein Beitrag zur Effizienzsteigerung im Rahmen des Gestaltungsprozesses sichergestellt. Die Struktur orientiert sich an den Grundtätigkeiten des Gestaltens, u. a. dem Analysieren und Verbessern sowie dem Bewerten und Auswählen. Daher lässt sich dieser Methodenbaustein in die gewohnte Arbeitsweise des Gestaltens integrieren.

## 6.5 Bewertung

### 6.5.1 Beurteilung des Gesamtkonzepts und der Methodenbausteine

Die in Abschnitt 3.4 aufgezeigten Handlungsfelder und die in Abschnitt 4.3 dargelegten Anforderungen sind vom Vorgehen, bestehend aus dem Gesamtkonzept und den vier Methodenbausteinen, zu erfüllen.

Das Gesamtkonzept zeigt die Integration der vier entwickelten Methodenbausteine in einen verallgemeinerten Entwicklungsprozess auf. Für die Integration der Methodenbausteine ist die Klasse Phasen/Arbeitsschritte aus der Summe der Produktentwicklungsmethoden vorgesehen. Dies gewährleistet, dass die Methodenbausteine in das Vorgehensmodell des jeweiligen Unternehmens aufwandsarm eingebettet werden können. Das Gesamtkonzept sieht kein separates Vorgehen vor, da dieses zusätzlich zum bisherigen Entwicklungsvorgehen anzuwenden wäre und somit losgelöst vom unternehmensspezifischen Vorgehensmodell ist.

Durch diesen auf Integration und Adaption basierenden Ansatz werden die notwendigen Aufwendungen verringert und ein wirtschaftliches Aufwand-Nutzen-Verhältnis im Sinne der Anforderung einer praxisorientierten Anwendbarkeit ermöglicht. Aufgrund der Modularität des Vorgehens in Form von unabhängigen Methodenbausteinen ist die Anforderung der Integrationsfähigkeit und Übertragbarkeit sichergestellt. Die Methodenbausteine kombinieren methodische Vorgehensweisen mit Faktenwissen. Dies gewährleistet die Nachvollziehbarkeit und die Transparenz der Methodenbausteine sowie wiederum eine Verbesserung der Effizienz, da auf aufbereitetes Wissen zurückgegriffen werden kann.

Der Methodenbaustein Szenario-Steckbrief ermöglicht eine wirtschaftliche Bewertung der Formatflexibilität einer Verpackungsmaschine. Durch die Kombination mit dem Vorgehensmodell ist die Anwendung für die frühen Phasen der Entwicklung ausgelegt. Durch die frühzeitige Ermittlung von entscheidenden Größen eines Projektes für die Steigerung der Formatflexibilität, z. B. notwendige Rüstzeiten und möglicher finanzieller Rahmen, kann das Risiko von Fehlentwicklungen reduziert werden. Da das Wirtschaftlichkeitsmodell zwei akzeptierte Verfahren vereint, wird von einer hohen Akzeptanz des Modells ausgegangen. Dies gewährleistet die Erfüllung der Anforderung nach einer praxisorientierten Anwendbarkeit. Neben der Planungs- und Anforderungsphase kann das Wirtschaftlichkeitsmodell auch in weiteren Phasen für die Alternativenauswahl eingesetzt werden und die wirtschaftliche Dimension einer multikriteriellen Bewertung abbilden. Da dies keine Notwendigkeit darstellt, sind die Unabhängigkeit der Methodenbausteine untereinander und die Modularität gewährleistet. Somit wird die Anforderung nach Integrierbarkeit und Übertragbarkeit erfüllt.

Für die Konzeptions- und Entwurfsphase ist der Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs vorgesehen. Ausgehend von den herzustellenden Packungen wird systematisch der Flexibilitätsbedarf ermittelt, die Lösungsstruktur und abschließend die Struktur der Ressourceneinheiten abgeleitet. Durch das gewählte Abstraktionsniveau wird ermöglicht, konzeptionelle Potenziale für eine Steigerung der Formatflexibilität zu ermitteln. Dies wird nicht durch gedankliche Vorbehalte in deren Identifikation beeinträchtigt. Die gewählte Adaption des PPR-Modells der Digitalen Fabrik gewährleistet eine grundsätzliche und zukünftige Übertragbarkeit und Integration in ein rechnergestütztes Konfigurationssystem. Die dargelegten Hilfsmittel reduzieren den Aufwand für die Anwendung und stellen eine hohe Transparenz sicher. Damit wird eine Erfüllung der Anforderung nach einer praxisorientierten Anwendbarkeit sichergestellt.

Mit dem Methodenbaustein Funktionspool sollen dem Entwicklungsprozess von Verpackungsmaschinen mehr Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität zur Verfügung gestellt werden. Das adaptierte Vorgehensmodell aus dem Technologiemanagement wurde verschlankt und auf die Besonderheiten von Verfahren für die Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen angepasst. Somit wird das Aufwand-Nutzen-Verhältnis positiv beeinflusst und die Anforderung einer Übertragbarkeit sichergestellt. Durch die theoretischen und praktischen Untersuchungen zu den Funktionen Verschließen mittels stoffschlüssigem Fügen sowie dem Aufrichten einer Faltschachtel wurden Informationen erarbeitet, die im Rahmen von Entwicklungsprojekten genutzt werden können und sich auf die Anforderung einer praxisorientierten Anwendbarkeit positiv auswirken. Ferner sind die im Rahmen von erweiterten Technologiestudien betrachteten Verfahren vielversprechend für eine Steigerung der Formatflexibilität.

Der *Gestaltungspool* führt die bisher heterogen verteilten Gestaltungsregeln zusammen und ermöglicht mit einer tätigkeitsbasierten und flexibilisierten Zuordnung die situationsangepasste Bereitstellung von Gestaltungsmaßnahmen. Es wird den Entwicklern in der Gestaltungsphase einer formatflexiblen Verpackungsmaschine eine Vielzahl von erprobten Verbesserungsvorschlägen aufwandsarm zur Verfügung gestellt. Dies trägt zu einer Erfüllung der Anforderung einer praxisorientierten Anwendbarkeit bei. Aufgrund der problemlosen Erweiterbarkeit der Wissensbasis wird gewährleistet, dass auch der jeweilige Anwender Verbesserungsmaßnahmen aufwandsarm integrieren kann und dies die Akzeptanz steigert. Auch ermöglicht die gewählte Struktur, dass weitere Informationen, z. B. Hersteller von Schnellspannsystemen, hinterlegt werden können, um die Informationsdichte zu erhöhen und eine noch effizientere Hilfe zu sein. Somit kann das vorhandene Wissen des Anwenders aufwandsarm integriert werden.

In Summe werden die gestellten Anforderungen und Handlungsfelder erfüllt.

### 6.5.2 Aufwand und Nutzen

Die Aufwände, der erstmaligen Implementierung und des regelmäßigen Einsatzes, sind kaum pauschalisierbar. Der Initialaufwand ist u. a. vom Integrationsaufwand in das unternehmensspezifische Vorgehensmodell abhängig. Der einmalige Schulungsaufwand ist maßgeblich von der Anzahl der zu schulenden Mitarbeiter abhängig. Da für die Anwendung der Methodenbausteine nur Standardsoftware, u. a. Microsoft Excel®, notwendig ist, entstehen keine zusätzlichen Kosten. Die Aufwände für die laufende Anwendung der Methodenbausteine sind differenziert zu betrachten. Die Nutzung des Methodenbausteins Funktionspool

ist insbesondere aufgrund des vierten Schrittes, der erweiterten Technologiestudie, deutlich kostenintensiver als der Einsatz der anderen drei Methodenbausteine. Dies liegt u. a. daran, dass Funktionsträger für eine praktische Validierung realisiert werden müssen. Die Anwendung der Methodenbausteine Szenario-Steckbrief, Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs und der Gestaltungspool ist mit einer Nutzung der erarbeiteten Hilfsmittel innerhalb weniger Arbeitsstunden möglich. Diese Aufwände werden nachfolgenden mit dem Nutzen durch die Anwendung der Methodenbausteine abgeglichen.

Die potenziellen Nutzen sind monetär kaum quantifizierbar. Beispielsweise ermöglicht der Szenario-Steckbrief eine Minimierung des Projektrisikos, da schon frühzeitig die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen einer Steigerung der Formatflexibilität betrachtet werden. Dies minimiert das Risiko, eine nicht wettbewerbsfähige Verpackungsmaschine im Hinblick auf die Formatflexibilität zu entwickeln. Ferner tragen diese klaren Rahmenbedingungen, u. a. zu erzielenden Maschinenstillstandszeiten, dazu bei, dass aufwendige Iterationsschleifen vermieden werden können. Wie das Beispiel in Abschnitt 6.2.1 verdeutlicht, so ist eine um 140.000 € teurere Verpackungsmaschine, welche allerdings nur noch 3 % der ursprünglichen Formatwechselzeit benötigt, wirtschaftlicher als die formatunflexiblere Maschine. Dies zeigt das wirtschaftliche Potenzial von formatflexiblen Verpackungsmaschinen und den finanziellen Rahmen für Maßnahmen für eine Steigerung der Formatflexibilität. Mit der Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs werden insbesondere Potenziale strukturiert abgeleitet, welche mit rüstlosen und externalisierten Ressourceneinheiten verbunden sind. Werden diese Potenziale berücksichtigt, so sind damit wirtschaftliche Nutzen verbunden. Insbesondere die Möglichkeit eines externen Rüstens einer Ressourceneinheit und nicht nur das Externalisieren einzelner Rüsttätigkeiten sind aktuell unzureichend genutzt. Die Entwicklung von Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität ist zwar mit hohen Aufwänden verbunden, jedoch sind auch die wirtschaftlichen Potenziale sehr hoch. Erst solche Verfahren ermöglichen die Entwicklung von rüstoffreien Ressourceneinheiten. Beispielsweise könnte mit einem flexiblen Verfahren wie dem Impuls- oder dem Laserstrahlsiegeln die Dauer eines Formatwechsels im gleichen Rahmen wie mit dem teuren Ansatz einer Multiformatmaschine erreicht werden. Durch die Nutzung des Gestaltungspools kann diese Entwicklungsphase deutlich beschleunigt werden, da zielgerichtet die passenden Gestaltungsmaßnahmen bereitgestellt werden. Die kostenwirksame Arbeitszeit für das Generieren von Lösungsalternativen wird deutlich reduziert.

In Anbetracht dieser Gegenüberstellung kann bei allen Methodenbausteinen von einem wirtschaftlichen Aufwand-Nutzen-Verhältnis ausgegangen werden.

# 7 Schlussbetrachtung

## 7.1 Zusammenfassung

Die aktuellen Marktveränderungen, u. a. das variierende Konsumverhalten, führen zu einer Zunahme der Variantenvielfalt, einer Verkürzung der Produktlebenszyklen, einer Reduktion der variantenbezogenen Stückzahlen, häufigeren Produktwechslern sowie sinkenden Losgrößen. Diese Dynamisierung der Märkte wirkt sich insbesondere auf die Betreiber von Verpackungsmaschinen aus. Um trotz dieser Auswirkungen die Produktion und das Verpacken zu marktfähigen Preisen anbieten zu können, bedarf es einer hohen Produktivität und einer damit verbundenen hohen Maschinenverfügbarkeit und -auslastung. Insbesondere die häufigeren Formatwechsel aufgrund der steigenden Variantenvielfalt und der sinkenden Losgrößen führen zu einer Zunahme der unproduktiven Rüstzeiten. Um diesen Veränderungen zu begegnen, benötigt die abpackende Industrie Maschinen mit einer gesteigerten Formatflexibilität. Die Potenziale zur Steigerung der Formatflexibilität in der Entwicklungsphase übersteigen deutlich die in der Nutzungsphase. Daher muss diese Fähigkeit einer Maschine eine Zielgröße des mittelständisch geprägten Verpackungsmaschinenbaus sein.

Für ein einheitliches Verständnis dieser Arbeit wurden zunächst wichtige Begriffsdefinitionen eingeführt und die Formatflexibilität anhand der drei Dimensionen Kosten, Zeit und Zustand charakterisiert. Mit der entwickelten Klassifikation von Befähigern für eine Steigerung der Formatflexibilität wird die Vielschichtigkeit der Potenziale deutlich. Da die parametrische und die kinematische Flexibilität aufgrund von technischen Entwicklungen, z. B. Steuerungstechnik oder industrieller Robotik, bereits entscheidend gesteigert werden konnte, wurde der Fokus auf die dritte Klasse der geometriebasierten Formatflexibilitätssteigerung gelegt. Anhand der Darstellung des Stands der Wissenschaft und Technik wird deutlich, dass eine umfassende wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Zielsetzung dieser Arbeit bisher fehlte. Für eine zukünftige Steigerung der Formatflexibilität konnten Handlungsfelder identifiziert werden.

Auf Basis dieser Handlungsfelder und weiterer Anforderungen wurde das Gesamtkonzept für eine Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen durch eine gezielte Berücksichtigung in den einzelnen Phasen eines Entwicklungsprozesses abgeleitet. Ein ausschließlich auf die Formatflexibilitätssteigerung fokussiertes singuläres Vorgehen wurde als nicht zielführend erachtet. Daher basiert das Gesamtkonzept auf vier Methodenbausteinen, welche aufgrund

ihrer Modularität in den jeweiligen unternehmensspezifischen Entwicklungsprozess integriert werden können.

Der Methodenbaustein Szenario-Steckbrief zielt auf eine wirtschaftliche Bewertung der Formatflexibilität einer Verpackungsmaschine bereits in der frühen Phase der Entwicklung ab. Der Szenario-Steckbrief kombiniert ein Wirtschaftlichkeits- und ein Vorgehensmodell. Bei der Konzeption einer formatflexibleren Verpackungsmaschine unterstützt der Methodenbaustein Modellierung des Formatflexibilitätsbedarfs mit einem Vorgehensmodell und den zugehörigen Hilfsmitteln. Der vermehrte Einsatz von Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität ist das Ziel des Methodenbausteins Funktionspool. Damit wird insbesondere zu einer Steigerung der geometriebasierten Flexibilität beigetragen. Anhand eines aus dem Technologiemanagement abgeleiteten Vorgehensmodells wird die strukturierte Generierung und Entwicklung von Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität gefördert. Für eine Unterstützung in der Entwicklungsphase Gestaltung ist ebenfalls ein Methodenbaustein vorgesehen. Der Gestaltungspool vereint ein Vorgehensmodell mit einer Systematisierung der in der Literatur heterogen verteilten Gestaltungsmaßnahmen.

Die Anwendung der Methodenbausteine wurde mit Fallbeispielen dargestellt, welche anhand der Maschinentypen Thermoformverpackungsmaschine und Faltschachtel-Aufrichtemaschine abgeleitet wurden. Ein Schwerpunkt lag auf dem Methodenbaustein Funktionspool und den zugehörigen Technologiestudien zu den Verfahren Impuls- und Laserstrahlsiegeln sowie dem Differenzbandverfahren für das Aufrichten von Faltschachteln des FEFCO-Typs 0201. Abschließend wurden das Vorgehen und die Methodenbausteine anhand der aufgezeigten Handlungsfelder sowie der definierten Anforderungen bewertet.

### 7.2 Ausblick

In Erweiterung dieser Arbeit werden die folgenden Handlungsfelder gesehen. Die Arbeiten zum Technologiepool zeigen die Potenziale von Verfahren mit einer höheren inhärenten Flexibilität auf. Allerdings musste im Rahmen der Arbeit der Fokus auf einen Ausschnitt der Vielzahl an Funktionen und potenziellen Verfahren gelegt werden. Daher ist dies ebenfalls für weitere Funktionen notwendig, z. B. Thermoformen oder Trennen. Auch eine Ausdehnung auf weitere Maschinentypen und deren spezifischen Funktionen ist notwendig.

Durch eine Erweiterung des Gesamtkonzepts und der Methodenbausteine um eine Integrationsstrategie mit dem Fokus auf mittelständisch geprägte Strukturen



könnte eine aufwandsärmere Einbettung in die unternehmensspezifischen Entwicklungsvorgehensmodelle ermöglicht werden. Ferner sollten die Methodenbausteine für eine Entwicklung von formatflexiblen Verpackungsanlagen erweitert und modifiziert werden. Insbesondere die heutige starre Verkettung von Verpackungsmaschinen zu einer -anlage ist im Sinne eines formatflexibleren Materialflusses auch physisch in eine flexible Vernetzung zu überführen. Da die Marktdynamik zu einer weiteren Zunahme der Variantenvielfalt führen wird, werden folgende Auswirkungen auf die Veränderungsfähigkeit von Verpackungsmaschinen erwartet.

Die Bedeutung der Wandlungsfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit wird, wie Beispiele anderer Maschinenbaubranchen zeigen, auch im Verpackungsmaschinenbau zunehmen. Hiermit soll ermöglicht werden, auch auf Veränderungen wirtschaftlich reagieren zu können, welche in der Planungs- und Entwicklungsphase nicht prognostiziert wurden. Für die Rekonfigurierbarkeit von Werkzeugmaschinen ist bspw. die Modularität eine erforderliche Eigenschaft (LORENZER 2010, S. 12). Bei weiterhin sinkenden Losgrößen, bis hin zu einem Verpacken in Losgröße 1, ist ein rüstzeitbehaftetes Umstellen zunehmend wirtschaftlich schwieriger abbildbar. Dies ist insbesondere bei kundeninnovierten Packungen der Fall, da der Konsument nun bestimmte Packungsmerkmale vorgeben kann, welche einen Veränderungsbedarf verursachen. Die technologischen Entwicklungen, welche die direkte Kommunikation zwischen Endkunden und Produzent ermöglicht, werden allerdings auch zu einer zunehmenden Transparenz führen, z. B. hinsichtlich Preis und Lieferzeit. Eine Verkürzung der Lieferzeiten verhindert zunehmend die Möglichkeiten einer Losgrößenbildung und somit -optimierung. Eine generelle Sicht auf Losgrößen wird damit hinfällig. Die Produktion und das Verpacken wird die Summe von Aufträgen in Losgröße 1. Dies erfordert Verpackungsmaschinen und im Allgemeinen Betriebsmittel, die ein paralleles bzw. zeitsynchrones und wirtschaftliches Herstellen und Verpacken von unterschiedlichen Produkten ermöglichen.



## 8 Literaturverzeichnis

ABELE ET AL. 2006

Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 55 (2006) 1, S. 433-436.

ABELE ET AL. 2007

Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: Flexibilität im Investitionsentscheidungsprozess - Bestimmen der Flexibilität für Investitionsentscheidungen in Fertigungssysteme. wt Werkstattstechnik online 97 (2007) 1/2, S. 85-89.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ADDE 2016

Andrew Donald Design Engineering Pty Ltd. (Hrsg.): Case packing and palletising cells at AstraZeneca in Sydney. < <http://www.adde.com.au/> > - 07.06.2016.

AFZ 2004

afz-Journal (Hrsg.): Kurze Umrüstzeiten schaffen Flexibilität. afz-Journal (2004) Dezember (Sonderdruck).

AIOE 2012

Alliance for Innovation and Operational Excellence (Hrsg.): Overall Equipment Effectiveness - Guidelines for the CPG Industry And Its Suppliers. Reston: Februar 2012.

ALEXOPOULOSA ET AL. 2007

Alexopoulou, K.; Mourtzisa, D.; Papakostas, N.; Chryssolouris, G.: DESYMA – assessing flexibility for the lifecycle of manufacturing systems. In: International Journal of Production Research 45 (2007) 7, S. 1683-1694.

ALMOMANI ET AL. 2013

Almomani, M.; Aladeemy, M.; Abdelhadi, A.; Mumani, A.: A proposed approach for setup time reduction through integrating conventional SMED method with multiple criteria decision-making techniques. In: Computers & Industrial Engineering 66 (2013), S. 461-469.

BAUERNFEIND 2013

Bauernfeind, D.: Kleine Chargen? Kein Problem! - Blisterlinien für eine wirtschaftliche Verpackung. Pharma+Food (2013) September, S. 19-21.

BBVERPACKUNGSMASCHINEN 2015

BBVerpackungsmaschinen GmbH (Hrsg.): Flexible Beutelmaschinen. Verpackung-Rundschau (2015) 9, S. 100.

## 8 Literaturverzeichnis

---

### BERNDT & SELLSCHOPF 2011

Berndt, D.; Sellschopf, L.: Packstoffe, Packmittel und Packhilfsmittel. In: Kaßmann, M. (Hrsg.): Grundlagen der Verpackung - Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung. Berlin: Beuth 2011, S. 19-99. ISBN: ISBN 978-3-410-20492-3.

### BEUTNER & KLAUS 2012

Beutner, K.; Klaus, S.: Die zehn wichtigsten Trends in der Verpackungsindustrie. Veröffentlichung am 19.10.2012. <<http://www.neue-verpackung.de/12205/die-zehn-wichtigsten-trends-in-der-verpackungsindustrie/>> - 22.02.2013.

### BIG DRUM ENGINEERING 2013

Big Drum Engineering GmbH (Hrsg.): Big Drum präsentiert 4-bahnige Abfüllmaschine. <<http://www.neue-verpackung.de/32755/big-drum-praesentiert-eine-4-bahnige-abfuellmaschine-der-baureihe-smart-filler-speziell-fuer-das-abfuellen-von-quetschhuelsen/>> - 10.04.2015.

### BINDER 2013

Gottlieb Binder GmbH & Co. KG (Hrsg.): GECKO®-Nanoplast®. Vorläufiges Datenblatt. Holzgerlingen: 2013.

### BLEISCH ET AL. 2003

Bleisch, G.; Goldhan, H.; Schricker, G.; Vogt, H. (Hrsg.): Lexikon Verpackungstechnik. 1. Aufl. Hamburg: B. Behr's 2003. ISBN: 3-7785-2916-1.

### BLEISCH ET AL. 2011

Bleisch, G.; Majschak, J.-P.; Weiß, U.: Verpackungstechnische Prozesse Lebensmittel-, Pharma- und Chemieindustrie - Theorie und Praxis. 1. Aufl. Hamburg: B. Behr's 2011. ISBN: 978-3-89947-281-3.

### BLEISCH ET AL. 2014

Bleisch, G.; Langowski, H.-C.; Majschak, J.-P. (Hrsg.): Lexikon Verpackungstechnik. 2. Aufl. Hamburg: B. Behr's 2014. ISBN: 978-3-95468-034-4.

### BLIEDTNER ET AL. 2013

Bliedtner, J.; Müller, H.; Barz, A.: Lasermaterialbearbeitung - Grundlagen – Verfahren – Anwendungen – Beispiele. München: Carl Hanser 2013. ISBN 978-3-446-42168-4.

### BLOM 2007

Blom Product Development Team (Hrsg.): Schnellrüsten: Auf dem Weg zur verlustfreien Produktion mit Single Minute Exchange of Die (SMED). Ansbach: CETPM Publishing 2007. ISBN-10: 3940775029.

### BOECKLE 1994

Boeckle, U.: Modelle von Verpackungssystemen - Lebenszyklusorientierte Untersuchung. Diss. TU München (1994). Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl. 1994. ISBN: 3-8244-6070-X.

### BÖCKMANN 2015

Böckmann, I.: Welche Verpackung braucht der eCommerce?. Vortrag. Verpackungskongress Dresden. 03.-04. Dezember 2015.

---

**BÖGE 2009**

Böge, A. (Hrsg.): Handbuch Maschinenbau - Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. 19. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009. ISBN 978-3-8348-0487-7.

**BONTEN 2014**

Bonten, C.: Kunststofftechnik - Einführung und Grundlagen. München: Carl Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-44093-7.

**BOSCH PACKAGING 2015**

Bosch Packaging Systems GmbH (Hrsg.): Unilever verpackt Knorr-Produkte mit Bosch-Sammelpacker. <<http://www.neue-verpackung.de/37119/unilever-verpackt-knorr-produkte-mit-bosch-sammelpacker/>> - 21.09.2015.

**BOSCH REXROTH 2014**

Bosch Rexroth Electric Drives and Controls GmbH (Hrsg.): Bosch-Thermoformmaschine mit Technik von Rexroth wechselt Formate auf Knopfdruck. <<http://www.neue-verpackung.de/28801/bosch-thermoformmaschine-mit-antriebs-und-steuerungstechnik-von-rexroth-wechselt-formate-auf-knopfdruck/>> - 10.11.2014.

**BRAGLIA ET AL. 2016**

Braglia, M.; Frosolini, M.; Gallo, M.: Enhancing SMED: Changeover Out of Machine Evaluation Technique to implement the duplication strategy. In: Production Planning & Control 27 (2016) 4, S. 328-342.

**BRAUN 2005**

Braun, T.: Methodische Unterstützung der strategischen Produktplanung in einem mittelständisch geprägten Umfeld. Diss. TU München (2005). München: Verlag Dr. Hut 2005. ISBN 3-89963-274-5.

**BRAUN 2007**

Braun, W.: Umwege vermeiden mit Direktaufspannung - Schnelles und vielseitiges Spannen für kostengünstiges Rüsten. WB Werkstatt + Betrieb (2007) 3, S. 24-26.

**BRUNNER 2014**

Brunner Engineering GmbH & Co. KG (Hrsg.): Schnellstmögliche Formatwechsel. <<http://www.neue-verpackung.de/26258/schnellstmoegliche-formatwechsel/>> - 07.08.2014.

**BRILL & MANDELBAUM 1989**

Brill, P.; Mandelbaum, M.: On measures of flexibility in manufacturing systems. In: International Journal of Production Research 27 (1989) 5, S. 747-756.

**BROWN ET AL. 2000**

Brown, N.; Kerr, D.; Jackson, M.; Parkin, R.: Laser welding of thin polymer films to container substrates for aseptic packaging. In: Optics & Laser Technology 32 (2000), S. 139-146.

## 8 Literaturverzeichnis

---

BROWN ET AL. 2012

Brown, N.; Kerr, D.; Parkin, R. M.; Jackson, M. R.; Shi, F.: Non-contact laser sealing of thin polyester food packaging films. In: Optics and Lasers in Engineering 50 (2012), S. 1466-1473.

BÜCKLE & HUBER 2005

Bücker, J.; Huber, W.: Handbuch der Pack- und Palettiertechnik - Der moderne Trockenteil in Theorie und Praxis. 1. Aufl. Hamburg: Behr's 2005. ISBN-10: 3899472101.

CAKMAKCI & KARASU 2007

Cakmakci, M.; Karasu, M. K.: Set-up time reduction process and integrated predetermined time system MTM-UAS: A study of application in a large size company of automobile industry. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 33 (2007), S. 334-344.

CAKMAKCI 2009

Cakmakci, M.: Process improvement: performance analysis of the setup time reduction-SMED in the automobile industry. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 41 (2009), S. 168-179.

CARRIZO-MOREIRA 2014

Carrizo-Moreira, A.: Single Minute Exchange of Die and Organizational Innovation in Seven Small and Medium-Sized Firms. In: García-Alcaraz, J. L.; Maldonado-Macías, A. A.; Cortes-Robles, G. (Hrsg.): Lean Manufacturing in the Developing World. Heidelberg: Springer International Publishing 2014, S. 483-499. ISBN: 978-3-319-04950-2.

CERMEX 2015

Cermex S.A. (Hrsg.): Schnelle Formatwechsel - Neue Wrap-around-Verpackungsmaschine von Gebo Cermex. <<http://www.neueverpackung.de/31817/gebo-cermex-praesentiert-die-wrap-around-verpackungsmaschine-der-naechsten-generation/>> - 26.02.2015.

CH 444648

Schutzrecht CH 444648. Patentschrift (29.02.1968). Unilever N. V. Pr.: 5546/64 10.11.1964. - Jorgensen, A. Maschine zum Aufrichten zusammengefalteter Kartons.

CH 502893

Schutzrecht CH 502893. Patentschrift (31.03.1971). Theodor Seufert Kartongefabrik. Pr.: P 19 38 938.9 31.07.1969. - Seufert, G. Verfahren und Vorrichtung zum Aufrichten von Faltschachteln aus Kunststoff.

CHANDRA & TOMBAK 1992

Chandra, P.; Tombak, M.: Models for the evaluation of routing and machine flexibility. In: European Journal of Operational Research 60 (1992), S. 156-165.

---

CHIARINI 2013

Chiarini, A.: Lean Organization - from the Tools of the Toyota Production System to Lean Office. Mailand: Springer Italia 2013. ISBN 978-88-470-2509-7.

CLAUS 2015

Claus, M.: Markttrends und technologische Herausforderungen für Packmittelhersteller und Maschinenbauer. Vortrag. ZLV Verpackungssymposium Kempten. 17.-18. September 2015.

COELHO ET AL. 2009

Coelho, J.; Abreu, M.; Pires, M.: High-speed laser welding of plastic films. In: Optics and Lasers in Engineering 34 (2000), S. 385-395.

COHEN ET AL. 2002

Cohen, W.; Goto, A; Nagata, A; Nelson, R.; Walsh, J.: R&D spillovers, patents and the incentives to innovate in Japan and the United States. In: Research Policy 31 (2002), S. 1349-1367.

COMBI 2016a

Combi Packaging Systems LLC (Hrsg.): Hot Melt Case Erectors. <<http://www.combi.com/hot-melt-case-erectors/>> - 07.06.2016.

COMBI 2016b

Combi Packaging Systems LLC (Hrsg.): RCE Robotic Random Case Erector. <<http://www.combi.com/rce-random-case-erector/>> - 07.06.2016.

CONRAD 2013

Conrad, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre - Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik©, 6. Aufl. München: Carl Hanser 2013. ISBN 978-3-446-43533-9.

COX 1989

Cox, T.: Toward the measurement of manufacturing flexibility. In: Production and Inventory Management Journal 30 (1989) 1, S. 68-72.

DAI & JONES 2002

Dai, J.; Jones, J.: Kinematics and mobility analysis of carton folds in packing manipulation based on the mechanism equivalent. In: Journal of Mechanical Engineering Science 216 (2002), S. 959-970.

DAI ET AL. 2009

Dai, J.; Medland, A.; Mullineux, G.: Carton Erection using Reconfigurable Folder Mechanisms, In: Packaging Technology and Science 22 (2009), S. 385-395.

DAI & CALDWELL 2010

Dai, J.; Caldwell, D.: Origami-based robotic paper-and -board packaging for food industry. In: Trends in Food Science & Technology 21 (2010), S. 153-157.

## 8 Literaturverzeichnis

---

DAI ET AL. 2012

Dai, J.; Zoppi, M.; Kong, X.: *Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots I*. London: Springer 2012. ISBN 978-1-4471-4140-2.

DAUM ET AL. 2014

Daum, A.; Greife, W.; Przywara, R.: *BWL für Ingenieurstudium und -praxis – Was man über Betriebswirtschaft wissen sollte*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. ISBN 978-3-658-05361-1.

DE 1022959

Schutzrecht DE 1022959. Auslegeschrift (19.01.1958). Fr. Hesser Maschinenfabrik-Aktiengesellschaft. Schwinger, H.; Kühnle, P. Vorrichtung zum Vereinzeln und Öffnen von flach zusammengelegten Faltschachtelhülsen aus einem Stapel.

DE 1101926B

Schutzrecht DE 1101926B. Auslegeschrift (09.03.1961). Unilever N.V. Pr.: 20.06.1955. Newall, S.; Davies, H. Maschine zum Öffnen oder Vorbrechen von Faltschachtelhülsen.

DE 3606093

Schutzrecht DE 3606093 A1. Offenlegungsschrift (27.08.87). Robert Bosch GmbH. Drewke, W.; Weller, O. Vorrichtung zum Vereinzeln und Aufrichten von Faltschachteln.

DE 4232956

Schutzrecht DE 4232956 C2. Patentschrift (21.02.2002). Jagenberg Diana GmbH, 41468. Hermann, N. Verfahren und Vorrichtung zum Nachbrechen der Längsrilllinien bei der Herstellung von quaderförmigen Faltschachteln.

DE TONI & TONCHIA 1998

De Toni, A.; Tonchia, S.: *Manufacturing flexibility - A literature review*. In: *International Journal of Production Research* 36 (1998) 6, S. 1587-1617.

DEVRIENT ET AL. 2011

Devrient, M.; Frick, T.; Schmidt, M.: *Laser transmission welding of optical transparent thermoplastics*. In: *Physics Procedia* 12 (2011), S. 157-165.

DIN EN 415-1

DIN EN 415-1: *Sicherheit von Verpackungsmaschinen - Teil 1: Terminologie und Klassifikation von Verpackungsmaschinen und zugehörigen Ausrüstungen*. Berlin: Beuth 2014.

DIN 8580

DIN 8580: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth 2003.

DIN 8743

DIN 8743: *Verpackungsmaschinen und Verpackungsanlagen – Kennzahlen zur Charakterisierung des Betriebsverhaltens und Bedingungen für deren Ermittlung im Rahmen eines Abnahmelaufs*. Berlin: Beuth 2014.



---

DIN EN ISO 9000

DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2005.

DIN EN 13185

DIN EN 13185: Dichtheitsprüfung - Zerstörungsfreie Prüfung - Prüfgasverfahren. Berlin: Beuth 2001.

DIN 55405

DIN 55405: Verpackung - Terminologie - Begriffe. Berlin: Beuth 2014.

DIN 55529

DIN 55529: Verpackung - Bestimmung der Siegelnahtfestigkeit von Siegelungen aus flexiblen Packstoffen. Berlin: Beuth 2012.

DOWDING ET AL. 2013

Dowding, C.; Dowding, R.; Griffiths, J.; Lawrence, J.: Peel resistance characterization of localized polymer film bonding via thin film adhesive thermally activated by scanned CO2 laser. In: Optics & Laser Technology 48 (2013), S. 358-365.

DRAHT 2010

Drath, R.: Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML - Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3642046735.

DUBEY & DAI 2006

Dubey, V.; Dai, J.: Complex Carton Packaging with Dexterous Robot Hands. S. 584 - 594. In: Huat, K. L. (Hrsg.): Industrial Robotics - Programming, Simulation and Applications. Rijeka, Kroatien: InTech 2006, S. 583-594. ISBN 3-86611-286-6.

DÜRRSCHMIDT 2001

Dürschmidt, S.: Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion. Diss. TU München (2001). München: Utz 2001. ISBN 3-8316-0023-6. (Forschungsberichte *iwb* 152).

EHRENSPIEL ET AL. 2007

Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 6. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN 978-3-540-74222-7.

EHRENSPIEL & MEERKAMM 2013

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5. Aufl. München: Carl Hanser 2013. ISBN 978-3-446-43548-3.

EICHHORN 2012

Eichhorn, N.: Rüstprozessoptimierung in der Zerspannung - Methode zur Effizienzsteigerung beim Rüsten von Bearbeitungszentren in der Kleinserienfertigung. Diss. Technische Universität Darmstadt (2010). Aachen: Shaker 2012. ISBN 978-3-8440-0722-0.

## 8 Literaturverzeichnis

---

ENGEL & QUADAJACOB 2016

Engel, C.; Quadejacob, N.: Fünf Erfolgsfaktoren für Projekte - Studie von GPM und PA Consulting. <<https://www.projektmagazin.de/fuenf-Erfolgsfaktoren>> - 15.04.2016.

ERLACH 2010

Erlach, K.: Wertstromdesign – Der Weg zur schlanken Fabrik. 2. Aufl. Heidelberg: Springer 2010. ISBN 978-3-540-89866-5.

ERNST & YOUNG 2014

Ernst & Young GmbH (Hrsg.): Revolution im Lebensmittelhandel - Cross Channel. 2014.  
<[http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY\\_Studie\\_Cross\\_Channel\\_-\\_Die\\_Revolution\\_im\\_Lebensmittelhandel/\\$FILE/EY-Cross-Channel-Die-Revolution-im-Lebensmittelhandel.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY_Studie_Cross_Channel_-_Die_Revolution_im_Lebensmittelhandel/$FILE/EY-Cross-Channel-Die-Revolution-im-Lebensmittelhandel.pdf)> - 09.10.2016.

ERMSCHEL ET AL. 2011

Ermschel, U.; Möbius, C.; Wengert, H.: Investition und Finanzierung. 2. Aufl. Heidelberg: Springer 2011. ISBN 978-3-7908-2744-6.

EYERER ET AL. 2008

Eyerer, Peter; Hirth, Thomas; Elsner, Peter (Hrsg.): Polymer Engineering - Technologien und Praxis. Berlin: Springer 2008. ISBN 978-3-540-72402-5.

FACCIO 2013

Faccio, M.: Setup time reduction: SMED-balancing integrated model for manufacturing systems with automated transfer. In: International Journal of Engineering and Technology 5 (2013) 5, S. 4075-4084.

FAHRENWALDT & SCHULER 2011

Fahrenwaldt, H.; Schuler, V.: Praxiswissen Schweißtechnik - Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2011. ISBN: 978-3-8348-1523-1.

FEFCO 2007

FEFCO European Federation of Corrugated Board Manufacturers (Hrsg.): Internationaler Code für Versandverpackung. 11. Aufl. Hague, Niederlande: ESBO 2007.

FELDHUSEN & GROTE 2013

Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. Berlin: Springer 2013. ISBN 978-3-642-29568-3.

FELDMANN ET AL. 2008

Feldmann, K.; Schmuck, T., Brossog, M., Dreyer, J.: Beschreibungsmodell zur Planung von Produktionssystemen – Entwicklung eines Beschreibungsmodells für Produkte, Prozesse und Ressourcen zur rechnergestützten Planung produktionstechnischer Systeme. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 3, S. 156-162.

---

FELK 2013

Felk, G.: Die bedienerfreundliche Verpackungsanlage. Vortrag. ZLV Verpackungssymposium Kempten. 19.-20. September 2013.

FERRADAS & SALONITIS 2013

Ferradas, P.; Salonitis, K.: Improving changeover time: a tailored SMED approach for welding cells. In: Procedia CIRP 7 (2013), S. 598-603.

FESTO 2012

Festo AG & Co. KG (Hrsg.): NanoForceGripper. Broschüre. Esslingen: April 2012.

FLEISCHER ET AL. 2005

Fleischer, J.; Weismann, U.; Schmalzried, S.; Wawerla, M.: Life-Cycle-Performance: partnerschaftlich zum Ziel. WB Werkstatt + Betrieb (2005) 5, S. 75-78.

FRITZ & SCHULZE 2010

Fritz, A.; Schulze, G. (Hrsg.): Fertigungstechnik. 9. Aufl. Heidelberg: Springer 2010. ISBN 978-3-642-12878-3.

FRÜHWALD 1990

Frühwald, C.: Analyse und Planung produktionstechnischer Rüstabläufe. Diss. Universität Hannover (1990). Zugl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990. ISBN: 3-18-401034-1

GADV 2016

GADV Gemeinschaftsausschuss deutscher Verpackungshersteller (Hrsg.): Daten & Fakten - Der Markt für Verpackungen 2013. <[http://www.gadv-online.de/?page\\_id=126](http://www.gadv-online.de/?page_id=126)> - 09.06.2016.

GAUSEMEIER ET AL. 1998

Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: Scenario Management - An Approach to Develop Future Potentials. In: Technological Forecasting and Social Change 59 (1998), S. 111-130.

GAUSEMEIER & KÖCKERLING 2000

Gausemeier, J.; Köckerling, M.: Szenariobasierte Entwicklung von Branchenstrategien - Am Beispiel der Verpackungsmaschinenindustrie. ZWF 95 (2000) 12, S. 588-593.

GAUSEMEIER 2011

Gausemeier, J.: Zukunftsszenarien in der Retrospektive - was bringt die Szenario-Technik tatsächlich? Konstruktion (2011) 5, S.74-82.

GAUSEMEIER 2012

Gausemeier, J.: Zukunftsszenarien in der Retrospektive - was bringt die Szenario-Technik tatsächlich? Büren: Unity 2012.

GAUSEMEIER & PLASS 2014

Gausemeier, J.; Plass, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung - Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen. 2. Aufl. München: Carl Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43631-2.

## 8 Literaturverzeichnis

---

GEORGOULIAS ET AL. 2007

Georgoulas, K.; Papakostas, N.; Chryssolouris, G.; Ovtcharova, J.; Krappe, H; Stanev, S.: Flexibility Assessment Platform for the Factory of the Future. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) International (Hrsg.): Technology Management Conference (ICE), 4.-6. Juni 2007. ISBN: 978-1-5090-0600-7.

GEORGOULIAS ET AL. 2009

Georgoulas, K.; Papakostas, N.; Mourtzis, D.; Chryssolouris, G.: Flexibility evaluation – A toolbox approach. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing 22 (2009) 5, S. 428-442.

GERWIN 1987

Gerwin, D.: An agenda for research on the flexibility of manufacturing processes. In: International Journal of Operations & Production Management 25 (2005) 12, S. 1171-1182.

GEST ET AL. 1994

Gest, G. B.; Culley, S. J.; McIntosh, R. I.; Mileham, A. R.; Owen, G. W.: Classification Methodologies For Set-Up Reduction Techniques Within Industry. In: Factory 2000 - Advanced Factory Automation. 3.-5. Oktober 1994, S. 486-490.

GEST ET AL. 1995

Gest, G.; Culley, S. J.; McIntosh, R. I.; Mileham, A. R.; Owen, G. W.: Review of fast tool change systems. In: Computer Integrated Manufacturing Systems 8 (1995) 3, S. 205-210.

GHORBEL ET AL. 2009

Ghorbel, E.; Casalino, G.; Abed, S.: Laser diode transmission welding of polypropylene: Geometrical and microstructure characterisation of weld. In: Materials and Design 30 (2009), S. 2745-2751.

GÖTZ & SIMON 2014

Götz, G.; Simon, D.: Flexibilisierungsansätze für Formwerkzeuge - am Beispiel von Tiefziehverpackungsmaschinen und dem Umformen von Kunststoffplatten. Vortrag. VDI-Tagung Köln. 25.-26. Juni 2014.

GÖTZE 2008

Götze, M.: Investitionsrechnung - Modelle und Analyse zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-78872-0.

GOTTSCHALK 2005

Gottschalk, L. L.: Flexibilitätsprofile - Analyse und Konfiguration von Strategien zur Kapazitätsanpassung in der industriellen Produktion. Diss. ETH-Zürich (2005). Zürich: vdf Hochschulverlag 2007. ISBN: 978-3-7281-3135-5.

GRANDI 2016

GRANDI R. srl (Hrsg.): ACE 20 - Case Erector.  
<<http://www.macchineimballaggiograndi.it/en/machines/box-forming-machines/american-type/ace-20-case-erector.html>> - 07.06.2016.

---

GRABL 2015

Graßl, M.: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. Diss. TU München (2015). München: Utz 2015. ISBN: 978-3-8316-4476-6. (Forschungsberichte *iwb* 300).

GREWELL ET AL. 2003

Grewell, D.; Benatar, A.; Park, J.: *Plastics and Composites Welding Handbook*. München: Hanser 2003. ISBN-10: 1569903131.

GREWELL & BENATAR 2007

Grewell, D.; Benatar, A.: *Welding of Plastics – Fundamentals and New Developments*. In: *International Polymer Processing XXII* (2007) 1, S. 43-60.

GROTE & FELDHUSEN 2007

Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN 978-3-540-49714-1.

HAGEMANN 2008

Hagemann, F.: *Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen*. Diss. TU München (2008). München: Utz 2009. ISBN 978-3-8316-0861-4. (Forschungsberichte *iwb* 226).

HAMBACH & ALBRECHT 2014

Hambach, J., Albrecht, F.: *Methoden der Szenariotechnik in der Fabrikplanung - Vorschlag für einen Gliederungsansatz zu Auswahl der passenden Technik*. ZWF 109 (2014) 3, S. 117-120.

HEIDEMANN 1990

Heidemann, T.: *Verkürzung der Werkzeugwechselzeiten und Einstellzeiten an Pressen*. Diss. Universität Hannover (1990). Düsseldorf: VDI-Verlag 1990. ISBN 3-18-140402-0.

HENNIG & KÜNZEL 2006

Hennig, J.; Künzel, G.: *Aufricht- und Verschleißmaschinen im Überblick*. neue verpackung (2006) 10, S. 42-49.

HENNIG 2011

Hennig, J.: *Maschinelles Verpacken*. In: Kaßmann, M. (Hrsg.): *Grundlagen der Verpackung – Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung*. Berlin: Beuth 2011, S. 197-222. ISBN: 978-3-410-20492-3.

HENNIG 2013

Hennig, J. [Hrsg.]: *Verpackungstechnik - Mittel und Methoden zur Lösung der Verpackungsaufgabe*. 22. Ergänzungslieferung August 2013. Berlin: Beuth 2013. Die ISBN bezieht sich auf das Werk samt aller Ergänzungen mit Stand 04/2014. ISBN: 978-3-41021-469-4.

HERING 2014

Hering, E.: *Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014. ISBN 978-3-658-07254-4.

## 8 Literaturverzeichnis

---

### HERNÁNDEZ MORALES 2002

Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Diss. Universität Hannover (2002).

### HERZAU & HERZAU 2011

Herzau, E.; Herzau, M.: Verfahren der Packmittelherstellung. In: Kaßmann, M. (Hrsg.): Grundlagen der Verpackung - Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung. Berlin: Beuth 2011, S. 197-222. ISBN: 978-3-410-20492-3.

### HERZHOFF 2004

Herzhoff, M.: Szenario-Technik in der chemischen Industrie Untersuchung von Software-Tools am Beispiel einer Studie zum Markt für Flammenschutzmittel im Jahr 2010 und der praktischen Bedeutung der Szenario-Technik. Diss. Technische Universität Berlin (2004).

### HIRTH 2012

Hirth, B.: IVV Siegel- und Peellösungen von DuPont: Verbraucherfreundlich und sicher - Ein Rohstoffkonzept wird erwachsen. Tagungsband. Tagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik Dresden. S. 159-167. 22.-23. März 2012.

### HÜGEL & GRAF 2009

Hügel, H.; Graf, T.: Laser in der Fertigung - Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009. ISBN: 978-3-8351-0005-3.

### IGUS 2014

Igus GmbH (Hrsg.): Windelproduktionsanlage läuft ohne Schmiermittel. neue Verpackung (2014) 4, S. 62-64.

### IVLV 102/2010

Industrievereinigung für Lebensmitteltechnologie und Verpackung e.V. (Hrsg.): Herangehensweise bei der Dichtheitsprüfung insbesondere Lebensmittelverpackungen - Schwerpunkt gasbasierte Dichtheitsprüfung. 2010.

### IVLV 106/2011

Industrievereinigung für Lebensmitteltechnologie und Verpackung e.V. (Hrsg.): Guideline für die Gestaltung von peelbaren Verpackungen unter dem Gesichtspunkt „Easy Opening“. Merkblatt Nr. 106/2011. Juni 2011 (aktualisiert Januar 2012).

### JÄGER 2004

Jäger, S.: Absatzsysteme für Mass Customization. Diss. Technische Universität München (2004).

### JÄNCHEN 2014

Jänchen, R.: Konturflexibles Siegeln mittels Laser. Vortrag. Dresdner Tage, 25. Juni 2014.

---

JÄNCHEN ET AL. 2014

Jänchen, R.; Brosda, M.; Wendt, G.; Olowinsky, A.: Mit Licht - flexibel und dicht - Laserdurchstrahlsiegeln von Verpackungsfolien. *Verpackungswirtschaft* (2014) 3, S. 46-49.

JÄNCHEN & WENDT 2015

Jänchen, R.; Wendt, G.: Laserdurchstrahlfügen von thermoplastischen Folien. *ZLV Verpackungssymposium Kempten*. 17.-18. September 2015.

JIAO & JIAO 2004

Jiao, Y.; Jiao, J.: A Real Option Theoretic Approach to Flexible Manufacturing Systems Planning under Uncertainty in Product Demand, In: *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) International (Hrsg.): Engineering Management Conference*, 18.-21. Oktober 2004. ISBN: 0-7803-8519-5.

JOKE 2016

joke Folienschweißtechnik GmbH. (Hrsg.): Schweißschienen für den Verpackungsmaschinen-Bau. <<http://www.joke-fs.de/Schweisschienen.150.0.html/>> - 27.06.2016.

JONAS 2005

Jonas, K.: *Packaging Machinery and Equipment*. Studie. Düsseldorf: Juli 2005.

KAMPKER ET AL. 2013

Kampker, A.; Burggräf, P.; Wesch-Potente, C.; Petersohn, G.; Krunke, M.: Life cycle oriented evaluation of flexibility in investment decisions for automated assembly systems. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (2013) 6, S. 274-280.

KALUZA 2007

Kaluza, B.: Flexibilität in Produktionssystemen und Produktionsnetzwerken. In: *Hausladen, I. (Hrsg.): Management am Puls der Zeit*. München: TCW 2007, S. 873-882.

KAGERMANN ET AL. 2013

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (Hrsg.): *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Frankfurt am Main: April 2013.

KHS 2014

KHS GmbH (Hrsg.): KHS präsentiert hochflexible, nachhaltige und Verbrauchskosten sparende Verpackungstechnik. <<http://www.khs.com/nc/presse/presstexte/presseinformationen/meldung/presse-release/khs-praesentiert-hochflexible-nachhaltige-und-verbrauchskosten-sparende-verpackungstechnik.html>> - 28.04.2014.

KIEF ET AL. 2015

Kief, H.; Roschiwal, H.; Schwarz, K. (Hrsg.): *CNC-Handbuch 2015/16*. München: Carl Hanser 2015. ISBN: 978-3-446-44090-6.

## 8 Literaturverzeichnis

---

### KIPP 2012

Kipp, T.: Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung. Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg (2012). Hamburg: TuTech Verlag 2012. ISBN 978-3-941492-47-9.

### KIRCHNER ET AL. 2004

Kircher, C.; Seyfarth, M.; Wurst, K.-H.: Modellbasiertes Rekonfigurieren von Werkzeugmaschinen. wt Werkstatttechnik online 94 (2004) 5, S. 179-183.

### KIRWAN 2013

Kirwan, M. (Hrsg.): Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology. Chichester: John Wiley & Sons 2013. ISBN 978-0-470-67066-8.

### KLEIN 2011

Klein, B.: Versuchsplanung DoE - Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik. 3. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2011. ISBN: 978-3-486-70684-0.

### KLEMKE ET AL. 2012

Klemke, T.; Mersmann, T.; Nyhuis, P.: Wandlungsfähige Produktionssysteme - Methodik zur Bewertung und Gestaltung der Wandlungsfähigkeit. wt Werkstatttechnik online 102 (2012) 4, S. 222-227.

### KLEMKE 2014

Klemke, T.: Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken. Diss. Universität Hannover (2013). Garbsen: TEWISS-Technik und Wissen 2014. ISBN: 978-3-944586-50-2.

### KLEPPMANN 2011

Kleppmann, W.: Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren. München: Carl Hanser 2011. ISBN 978-3-446-42774-7.

### KLETTI & SCHUMACHER 2014

Kletti, J.; Schumacher, J.: Die perfekte Produktion – Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Berlin: Springer 2014. ISBN: 978-3-662-45440-4.

### KLOCKE & KÖNIG 2007

Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 3 - Abtragen, Generieren Laser-materialbearbeitung. Berlin: Springer 2007. ISBN 3-540-23492-6.

### KOREN ET AL. 1999

Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; Van Brussel, H.: Reconfigurable Manufacturing Systems. Keynote Paper. In: Annals of the CIRP 48 (1999) 2, S. 527-540.

### KOSOW & GAßNER 2008

Kosow, H.; Gaßner, R.: Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse - Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien. Berlin: September 2008. ISBN 978-3-941374-03-4.



---

KREBS 2011

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. Diss. TU München (2011). München: Utz 2011. ISBN 978-3-8316-4156-7. (Forschungsberichte *iwb* 255).

KRONES 2013

Krones AG (Hrsg.): The "Fram" project: non-refillables replace refillables. In: *magazine* (2013) 4, S. 69-76.

KRONES 2016

Krones AG (Hrsg.): Krones Variocart und Variocol - Kartonauffalter und Kartonverschießer.

<<http://www.krones.com/de/produkte/verpackung/kartonverarbeitung.php/>> - 07.06.2016.

KRUSE 2011

Kruse, J.: Rüstzeitoptimierung. Beitrag. Düsseldorf: Oktober 2011. S. 8-9.

KUSAR ET AL. 2010

Kusar, J.; Berlec, T.; Zefran, F.; Starbek, M.: Reduction of Machine Setup Time. In: *Journal of Mechanical Engineering* 56 (2010) 12, S. 833-845.

LANGE 2013

Lange, V.: Verpackung im Spannungsfeld des E-Commerce. Dresdner Verpackungstagung. Dresden. 05.-06. Dezember 2013.

LANZA ET AL. 2009

Lanza, G.; Rühl, J.; Peters, S.: Bewertung von Stückzahl- und Variantenflexibilität in der Produktion - Produktionskosten und Risiken abhängig von Varianten und Stückzahlen. *ZWF* 104 (2009) 11, S. 1039-1044.

LANZA ET AL. 2010a

Lanza, G.; Rühl, J.; Peters, S.: Monetäre Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen - Stochastische Simulation von Leistungskennzahlen und monetären Größen zur Flexibilitätsquantifizierung, *wt Werkstattstechnik online* 100 (2010) 6, S. 530-534.

LANZA ET AL. 2010b

Lanza, G.; Peter, K.; Peters, S.; Rühl, J.: Simulation zur Kosten- und Risikobewertung von Produktionsszenarien. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 469-476.

LEBENSMITTEL ZEITUNG 2014

Lebensmittel Zeitung (Hrsg.): Fundgrube für global aktive Markenhersteller – US-Studie untersucht Verpackungswirkung auf Shopper in zehn nationalen Schlüsselmärkten – Wegweiser für die FMCG-Industrie. *Lebensmittel Zeitung*, Frankfurt am Main. Ausgabe vom 02.05.2014, S. 47.

## 8 Literaturverzeichnis

---

### LENORD+BAUER 2015

LENORD+BAUER Lenord, Bauer & Co. GmbH (Hrsg.): Maximale Produktivität bei der Verpackung von Genussmitteln - Maschinenjustierung auf Knopfdruck minimiert Rüstzeiten. Kundenmagazin 2015.  
<[https://www.lenord.de/fileadmin/kundenbereich/dokumente/praxisbeispiele/Applikationsbericht\\_Th%C3%BCrlings.pdf](https://www.lenord.de/fileadmin/kundenbereich/dokumente/praxisbeispiele/Applikationsbericht_Th%C3%BCrlings.pdf)> - 11.10.2016.

### LINDEMANN ET AL. 2006

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN 978-3-540-25506-2.

### LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte - Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN 978-3-642-01422-2.

### LINSEISEN 1998

Linseisen, H.: Kaizen und Mitarbeiter optimieren Prozesse. Werkstatt und Betrieb 131 (1998) 9, S. 862-865.

### LORENZER 2010

Lorenzer, T.: Wandelbarkeit in der Serienfertigung durch rekonfigurierbare Werkzeugmaschinen. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2010).

### MAHALIK & NAMBIAR 2010

Mahalik, N.; Nambiar, A.: Trends in food packaging and manufacturing systems and technology. In: Trends in Food Science & Technology (2010) 21, S. 117-128.

### MAJSCHAK 1996

Majschak, J.-P.: Rechnerunterstützung für die Suche nach verarbeitungstechnischen Prinziplösungen. Diss. Technische Universität Dresden (1996).

### MAJSCHAK 2003

Majschak, J.-P.: Lasereinsatz in der Verpackungstechnik. Tagungsband. Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik Dresden. Dresden. S. 207-217. 03.- 04. April 2003.

### MAJSCHAK 2008

Majschak, J.-P.: Anforderungen an Siegelnähte und Überprüfung von Qualitätsparametern. Vortrag. VVD-Workshop: Schweißen und Siegeln in Verpackungsmaschinen. Dresden. 25.-26. September 2008.

### MAJSCHAK 2014

Majschak, J.-P.: Anwendung für Maschinensysteme der Stoffverarbeitung. In: Grote, K.-H.; Feldhusen, J. (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin: Springer 2014. S. F 39-49. ISBN: 978-3-642-38890-3.

### MATTHEWS 2007

Matthews, J.: A constraint-based approach for assessing the capabilities of existing designs to handle product variation. Diss. Universität Bath (2007).

---

MAY & KOCH 2008

May, C.; Koch, A.: Overall Equipment Effectiveness (OEE) - Werkzeug zur Produktivitätssteigerung. ZUB Zeitschrift der Unternehmensberatung 3 (2008), S. 245-250.

MAYR 2015

Mayr, M.: Technische Mechanik - Statik. 8. Aufl. München: Carl Hanser 2015. ISBN 978-3-446-44570-3.

MCINTOSH ET AL. 1996

McIntosh, R.; Culley, S.; Gest, G.; Mileham, T.; Owen, G.: An Assessment of the role of design in the improvement of changeover performance. In: International Journal of Operations & Production Management 16 (1996) 9, S. 5-22.

MCINTOSH ET AL. 2000

McIntosh, R. I.; Culley, S. J.; Mileham, A. R.; Owen, G. W.: A critical evaluation of Shingo's 'SMED' (Single Minute Exchange of Die) methodology. In: International Journal of Production Research 38 (2000) 11, S. 2377-2395.

MCINTOSH ET AL. 2001

McIntosh, R. I., Culley, S. J., Mileham, A. R., Owen, G. W.: Improving Changeover Performance - A strategy for becoming a lean, responsive manufacturer. Oxford: Butterworth Heinemann 2001. ISBN: 0750650877.

MCINTOSH ET AL. 2007

McIntosh et al.: Changeover Improvement: Reinterpreting Shingo's „SMED“ Methodology. IEEE Transactions on Engineering Management 54 (2007) 1, S. 98-111.

MICHEL 1999

Michel, P.: Schweißverfahren in der Kunststoffverarbeitung - Grundlagen und Aspekte zur Serienfertigung. Düsseldorf: Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren 1999. DVS-Berichte Bd. 203. ISBN 3-87155-660-2.

MILBERG 1995

Milberg, J.: Werkzeugmaschinen – Grundlagen. 2. Aufl. Berlin: Springer 1995. ISBN 3-540-58825-6.

MILEHAM ET AL. 2004

Mileham, A. R.; Culley, S. J.; Owen, G. W.; Newnes, L. B.; Giess, M. D.; Bramley, A. N.: The impact of run-up in ensuring rapid changeover. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 53 (2004) 1, S. 407-410.

MINGAREEV ET AL. 2012

Mingareev, I., Weirauch, F., Olowinsky, A.; Shah, L.; Kadwani, P.; Richardson, M.: Welding of polymers using a 2 µm thulium fiber laser. In: Optics & Laser Technology 44 (2012), S. 2095-2099.

MÖLLER 2008

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Diss. TU München (2008). München: Utz 2008. ISBN 978-3-8316-0778-5. (Forschungsberichte *iwb* 212).

## 8 Literaturverzeichnis

---

MOHAMED ET AL. 2001

Mohamed, Z.; Youssef, M.; Huq, F.: The impact of machine flexibility on the performance of flexible manufacturing systems. In: *International Journal of Operations & Production Management*, 21 (2001) 5/6. S. 707-727.

MULLINEUX & MATTHEWS 2010

Mullineux, G.; Matthews, J.: Constraint-based simulation of carton folding operations. In: *Computer-Aided Design* 42 (2010), S. 257-265.

MULTIVAC 2008

MULTIVAC Sepp Haggenmüller GmbH & Co. KG. (Hrsg.): Clean & clever. - Die wegweisende Tiefziehmaschinen-Generation. Broschüre. Wolfertschwenden: September 2008.

MULTIVAC 2012

MULTIVAC Sepp Haggenmüller GmbH & Co. KG. (Hrsg.): Die Gesamtanlageneffektivität (GAE) von Verpackungsmaschinen ist optimierbar. In: *Update - News of Better Packaging* 2 (2012), S. 14-15.

NABENHAUER 2010

Nabenhauer, R.: *Verpackungslexikon - Fachbegriffe und Anwendungsbeispiele von Experten erklärt*; 2. Aufl. Dietmannsried: Nabenhauer Consulting 2010.

NARAIN ET AL. 2000

Narain, R.; Yadav, R. C.; Sarkis, J.; Cordeiro, J.: The Strategic Implications of Flexibility in Manufacturing Systems. In: *International Journal of Agile Management Systems*. (2000) 2/3, S. 202-213.

NENTWIG 2006

Nentwig, J.: *Kunststoff-Folien - Herstellung - Eigenschaften - Anwendung*. 3. Aufl. München: Carl Hanser 2006. ISBN-10: 3-446-40390-6.

NEUGEBAUER 2012

Neugebauer, R. (Hrsg.): *Werkzeugmaschinen - Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*. Berlin: Springer 2012. ISBN 978-3-642-30077-6.

NEUHAUSEN 2001

Neuhausen, J.: *Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion*. Diss. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (2001).

NEWMAN ET AL. 1993

Newman, W.; Hanna, M.; Maffei, M.: Dealing with the Uncertainties of Manufacturing: Flexibility, Buffers and Integration. In: *International Journal of Operations & Production Management*, 13 (1993) 1, S. 19-34.

NYHUIS ET AL. 2008a

Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme - Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. *wt Werkstatttechnik online* 98 (2008) 1/2, S. 85-91.

---

NYHUIS ET AL. 2008b

Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E.(Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme - Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: Produktionstechn. Zentrum 2008. ISBN: 978-3-939026-96-9.

OPHEY 2005

Ophey, L.: Entwicklungsmanagement - Methoden in der Produktentwicklung. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-540-20652-3.

OWEN ET AL. 2011

Owen, G.; Matthews, J.; McIntosh, R.; Culley, S.: Design for Changeover (DFC) - Enabling Flexible and Highly Responsive. In: Fogliatto, F; da Silveira, G. (Hrsg.): Mass Customization - Engineering and Managing Global Operations. London: Springer 2011, S. 247-273. ISBN: 978-1-84996-488-3.

PACKAGING VALLEY GERMANY & PACKAGING EXCELLENCE CENTER 2012

Packaging Valley Germany e.V.; Packaging Excellence Center (PEC) (Hrsg.): Tüftler. Schaffer. Weltmarktführer. 150 Jahre Verpackungsmaschinenbau in Südwestdeutschland. Schwäbisch Hall/Waiblingen: PEC 2012. ISBN: 978-3-00-03-3965-3.

POLSTER 2009

Polster, S.: Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2008). Bamberg: Meisenbach 2009. ISBN: ISBN: 978-3-87525-294-1.

POPRAWA 2005

Poprawa, R.: Lasertechnik für die Fertigung - Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur. Berlin: Springer 2005. ISBN 3-540-21406-2.

POTENTE 2004

Potente, H.: Fügen von Kunststoffen - Grundlagen, Verfahren, Anwendung. München: Carl Hanser 2004. ISBN 3-446-22755-6.

QUEST 2012

Quest TechnoMarketing (Hrsg.): Immer mehr Roboter an Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen bis 2014 - Marktuntersuchung zum Robotereinsatz für die N&G-Industrie. 2012. <<http://www.quest-trendmagazin.de/maschinenbau/roboter/roboter-in-ng-industrie.html>> - 04.11.2015.

QUEST 2014

Quest TechnoMarketing (Hrsg.): Verpackungsmaschinen - dynamisches Zugpferd für die Automatisierungstechnik - Elektronische Antriebstechnik bis 2016 an Verpackungsmaschinen. 06. Mai 2014. <<http://www.quest-trendmagazin.de/maschinenbau/verpackungsmaschinen/verpackungsmaschinen-und-elektronische-antriebstechnik.html>> - 28.07.2015.

## 8 Literaturverzeichnis

---

REIK ET AL. 2005

Reik, M.; Culley, S.; Mileham, A.; Owen, G.; McIntosh, R.: Design for Changeover (DFC): enabling the design of highly flexible, highly responsive manufacturing processes. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 273-280. ISBN: 3-83160-540-8.

REIK ET AL. 2006a

Reik, M.; McIntosh, R.; Culley, S.; Mileham, A.; Owen, G.: A formal design for changeover methodology - Part 1: Theory and background. In: Journal of Engineering Manufacture, 220 (2006), S. 1225-1235.

REIK ET AL. 2006b

Reik, M.; McIntosh, R.; Culley, S.; Mileham, A.; Owen, G.: A formal design for changeover methodology - Part 2: methodology and case study. In: Journal of Engineering Manufacture, 220 (2006), S. 1237-1247.

REINHART ET AL. 2007

Reinhart, G; Krebs, P.; Rimpau, Czechowski, D.: Flexibilitätsbewertung in der Praxis - Einsatz einer Methode zur lebenszyklusorientierten Bewertung von Flexibilität in der Produktion. wt Werkstattstechnik online 97 (2007) 4, S. 211-217.

REITZ 2008

Reitz, A.: Lean TPM – In 12 Schritten zum schlanken Managementsystem. München: mi-Fachverlag 2008. ISBN: 978-3-636-03119-8.

RISSE 2012

Risse, A.: Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätektechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2012. ISBN 978-3-8348-1519-4.

RODER 2009

Roder, M.: Freigabe von Packungsgrößen und Füllmengen bei Lebensmitteln. <<http://www.vis.bayern.de/ernaehrung/lebensmittel/fuellmengen.htm>> - 02.10.2013.

ROGALSKI & Ovtcharova 2009

Rogalski, S.; Ovtcharova, J.: Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen -ecoFlex- eine branchenübergreifende Methodik. ZWF 104 (2009) 1-2, S. 64-70.

ROGALSKI 2010

Rogalski, S.: Practical Experience in the ecoFLEX Flexibility Evaluation Tool in Medium Sized Companies. In: IST Transactions of Control Engineering - Theory and Applications, 1 (2010) 1, S. 14-18.

ROLAND BERGER 2012

Roland Berger Holding GmbH (Hrsg.): Mastering product complexity. Düsseldorf: November 2012.

<[http://www.rolandberger.de/medien/publikationen/2012-11-08-rbsc-pub-Mastering\\_product\\_complexity.html](http://www.rolandberger.de/medien/publikationen/2012-11-08-rbsc-pub-Mastering_product_complexity.html)> - 08.07.2014.

---

RÖMISCH & WEIß 2014

Römisch, P.; Weiß, M.: Projektierungspraxis Verarbeitungsanlagen - Planungsprozess mit Berechnung und Simulation der Systemzuverlässigkeit. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014. ISBN 978-3-658-02358-4.

ROPEX 2016

ROPEX Industrie-Elektronik GmbH (Hrsg.): Heizelemente für die Folien-schweißung. <[http://www.ropex.de/pdf-download/info/cirus\\_DE.pdf](http://www.ropex.de/pdf-download/info/cirus_DE.pdf)> - 08.04.2016.

RÖBLE 2009

Röble, A.: Impulsschweißen - Kürzere Zyklen, reduzierte Downtime und flexiblere Geometrien. Tagungsband. Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik. Dresden. S. 181-196. 19.-20. März 2009.

ROVEMA 2016

Rovema GmbH (Hrsg.): Rovema bietet Format-Einstellhilfe für Schlauchbeutelmaschinen. <<http://www.neue-verpackung.de/39381/rovema-bietet-format-einstellhilfe-fuer-schlauchbeutelmaschinen-2/>> - 21.06.2016

RUDOLF 2006

Rudolf, H.: Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. Diss. TU München (2006). München: Utz 2007. ISBN 978-3-8316-0697-9. (Forschungsberichte *iwb* 204).

RUPP & DIE SOPHISTEN 2014

Rupp, C.; die SOPHISTen (Hrsg.): Requirements-Engineering und -Management. München: Carl Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-43893-4.

RUSSEK 2006

Russek, U.: Prozesstechnische Aspekte des Laserdurchstrahlschweißens von Thermoplasten. Diss. RWTH Aachen (2006).

SALEH ET AL. 2009

Saleh, J.; Mark, G.; Jordan, N.: Flexibility: a multi-disciplinary literature review and a research agenda for designing flexible engineering systems. In: Journal of Engineering Design, 20 (2009) 3, S. 307-323.

SARKER ET AL. 2009

Sarker, B.; Krishnamurthy, S.; Kuthethur, S.: A survey and critical review of flexibility measures in manufacturing systems. In: Production Planning & Control, 5 (1994) 6, S. 512-523.

SCHACK 2007

Schack, R.: Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik. Diss. Technische Universität München (2007). München: Utz 2008. ISBN 978-3-8316-0748-8. (Forschungsberichte *iwb* 207).

SCHÄFER & FLOTTMAN 2015

Schäfer & Flottmann GmbH & Co. KG (Hrsg.): Flexibler Kartonaufrichter. Verpackungs-Rundschau (2015) 9, S. 98.

## 8 Literaturverzeichnis

---

SCHÄPPI ET AL. 2005

Schäppi, B.; Andreasen, M.; Kirchgeorg, M.; Radermacher, F.-J.: Handbuch Produktentwicklung. München: Carl Hanser 2005. ISBN 3-446-22838-1.

SCHMID 2014

Schmid, N.: Ressourceneffizientes Tiefziehverpacken dank innovativer Prozess- und Werkzeugtechnologie. Vortrag. Verpackungssymposium Kempten 18.-19. September 2014.

SCHMITZ 1994

Schmitz, M.: Flexible automatisierte Fertigungssysteme - Bewertungsprobleme und Lösungsansätze. Diss. Universität Kaiserslautern (1994). Wiesbaden: DUV Springer Fachmedien 1994. ISBN: 978-3-8244-6031-1.

SCHMOECKEL 1991

Schmoeckel, D.: Developments in Automation, Flexibilization and Control of Forming Machinery. Keynote Paper. In: Annals of the CIRP 40 (1991) 2, S. 615-622.

SCHUBERT 2013

Schubert (Hrsg.): Molkerei Alois Müller - Weltpremiere des Werkzeugwechslers. In: Sequenze 2013, S. 45-48.

SCHUH ET AL. 2004a

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 94 (2004) 6, S. 299-304.

SCHUH ET AL. 2004b

Schuh, G., Lösch, F.; Gottschalk, S.; Harre, J.; Kampker, A.: Gestaltung von Betriebsmitteln für die Serienproduktion. ZWF 99 (2004) 5, S. 212-217.

SCHUH & KLAPPERT 2011

Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): Technologiemanagement - Handbuch Produktion und Management 2. Berlin: Springer 2011. ISBN 978-3-642-12529-4.

SCHUH ET AL. 2014

Schuh, G.; Schultze, W.; Schiffer, M.; Rieger, A.; Rudolf, S.; Lehbrink, H.: Scenario-based determination of product feature uncertainties for robust product architectures. In: Production Management 8 (2014) 3, S. 383-395.

SEEBACHER & WINKLER 2014

Seebacher, G.; Winkler, H.: Evaluating flexibility in discrete manufacturing based on performance and efficiency. In: International Journal Production Economics 153 (2014), S. 340-351.

SEKINE & ARAI 1992

Sekine, K.; Arai, K.: Kaizen for Quick Changeover - Going Beyond SMED. Portland: Productivity Press 1992. ISBN: 0-915299-38-0.



---

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A.; Sethi, S.: Flexibility in Manufacturing: A Survey. In: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990), S. 289-328.

SHEWCHUK & MOODIE 1998

Shewchuk, J.; Moodie, C.: Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures. In: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 10 (1998), S. 325-349.

SHINGO 1985

Shingo, S.: A Revolution in Manufacturing - The SMED System. Cambridge: Productivity Press 1985. ISBN: 0-915299-03-8.

SHINGO & PRODUCTIVITY PRESS 1996

Shingo, S.: Quick Changeover for Operators - The SMED System. New York: Productivity Press 1996. ISBN: 978-1563271250.

SIAT 2016

SIAT S.p.A. (Hrsg.): F144 REIHE - Automatischer Kartonaufrichter. <<http://siat.com/de/f144-range/>> - 07.06.2016.

SICK 2014

Sick AG (Hrsg.): Flexibilität senkt Kosten - Der richtige Umgang mit sich verändernden Anforderungen. SickInsight Magazin (2014) 3, S. 20.

SIKO 2014

SIKO GmbH (Hrsg.): Reduzierte Rüstzeiten - Fischerwerke setzen auf automatischen Stellantrieb. Verpackungs-Rundschau (2014) 4, S. 42-43.

SIMON ET AL. 2013

Simon, D.; Zitzlsberger, S.; Wagner, S.; Maurer, C., Haller, D.; Reinhart, G.: Forming plastic shields on a reconfigurable tooling system. International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV). München, 06.-09. Oktober 2013.

SIMON ET AL. 2014a

Simon, D.; Götz, G.; Dietrich, S.; Stich, P.; Reinhart, G.: Geometrieflexible Systeme zur Kunststoff- und CFK-Verarbeitung; MM MaschinenMarkt (2014) 35; S. 38-41.

SIMON ET AL. 2014b

Simon, D.; Kern, L.; Wagnern, J.; Reinhart, G.: A reconfigurable tooling system for producing plastic shields. In: Procedia CIRP 17 (2014), S.853-858.

SLACK 1983

Slack, N.: Flexibility as a Manufacturing Objective. In: International Journal of Operations & Production Management 3 (1983) 3, S. 4-13.

SOCO 2016

SOCO SYSTEM GmbH (Hrsg.): SOCO Pack ATS Kartonaufrichter - Klebeband. <<https://www.socosystem.com/de/products/aufrichten/kartonaufrichten/soco-pack-ats-kartonaufrichter-klebeband>> - 07.06.2016.

## 8 Literaturverzeichnis

---

### SO-MATEC 2016

so-matec epple GmbH (Hrsg.): Schachtelaufrichter.  
<<http://www.somatecepple.de/produkte/verpackungstechnik/schachtelaufrichter>> - 07.06.2016.

### STARK 2012

Stark, K.: Siegeln - (K)Ein Buch mit sieben Siegeln. Vortrag. SKZ & Innoform: Tagung PE- und PP-Folien - Siegelschichten für dichte Verpackungen. Würzburg. 21.-22. Juni 2012.

### SUDHOFF 2007

Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. Diss. TU München (2007). München: Utz 2008. ISBN: 978-3-8316-0749-5. (Forschungsberichte *iwb* 208).

### SVZ 2015

SVZ Maschinenbau GmbH (Hrsg.): Kartonparade für Umpacker - Ein Aufrichter überzeugt in seiner Schlüsselfunktion. Verpackungsrundschau (2015) 9, S. 32-34.

### SYSKA 2006

Syska, A.: Produktionsmanagement - Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler 2006. ISBN: 978-3-8349-0235-1.

### TAYMAZ 1989

Taymaz, E.: Types of flexibility in a single-machine production system. In: International Journal of Production Research 27 (1989) 11, S. 1891-1899.

### THIELE 2016

Thiele Technologies (Hrsg.): CE 451 Case Erector/Hot Melt Sealer Gallery.  
<<http://www.thieletech.com/products/bliss-tray-case-erecting/case-erectors/ce-451-case-erector/gallery>> - 07.06.2016.

### TERKAY ET AL. 2009

Terkay, W.; Tolio, T.; Valente, A.: Designing Manufacturing Flexibility in Dynamic Production Contexts. In: Tolio, T. (Hrsg.): Design of Flexible Production Systems. Berlin: Springer 2009.

### TERAN-SOMOHANO & SMITH 1996

Teran-Somohano, A.; Smith, A.: A Setup Reduction Methodology from Lean Manufacturing for Development of Meta-heuristic. IEEE Congress on Evolutionary Computation. Cancun/Mexico, 20.-23. Juni 2013.

### TOSATTI 2006

Tosatti, L.: Life Cycle Cost Calculation for Investment Decision in Manufacturing. In: Proceedings of LCE 2006, S. 723-728.

### TOSS 2016

TOSS GmbH & Co. KG (Hrsg.): Schweißschienen und Zubehör - Impulsschweißschienen. <<http://www.toss-gmbh.de/de/verpackungssysteme/schweisschienen-zubehoer.html?pid=67>> - 27.06.2016.

---

VAN GOUBERGER & VAN LANDEGHEM 2002

Van Gouberger, D.; Van Landeghem, H.: Rules for integrating fast changeover capabilities into new equipment design. In: Robotics and Computer Integrated Manufacturing 18 (2002), S. 205-214.

VDI 2221

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth 1993.

VDI 2222-1

VDI 2222, Blatt 1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien - Konstruktionsmethodik. Berlin: Beuth 1997.

VDI 2223

VDI 2223: Methodisches Entwerfen technischer Produkte. Berlin: Beuth 2004.

VDI 2860

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen. Berlin: Beuth 1990.

VDI 3196

VDI 3196: Umrüsten von Pressen und Anlagen zum Kaltmassivumformen von Stab-, Draht- und Rohrabschnitten oder Platinen. Düsseldorf: Beuth 1991.

VDI 3195

VDI 3195: Umrüstvorgänge an Pressen zum Kaltmassivumformen vom Drahtbund - Entwurf. Düsseldorf: Beuth 1992.

VDMA 2006

VDMA-Fachverbandsschriften Nahrungsmittelmaschinen und Verpackungsmaschinen (Hrsg.): Dichtigkeitsklassen von flexiblen Verpackungen. Frankfurt: September 2006.

VDMA & MCKINSEY 2014

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.; McKinsey & Company (Hrsg.): Erfolgsmuster und Trends im deutschen Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinenbau - Handlungsansätze für mehr Wachstum und Profitabilität. 2014.

VDMA 2015

VDMA Nahrungsmittelmaschinen und Verpackungsmaschinen (Hrsg.): VDMA - Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen im Wert von 8 Milliarden Euro verkauft. < <http://www.neue-verpackung.de/33552/vdma-nahrungsmittel-und-verpackungsmaschinen-im-wert-von-8-milliarden-euro-verkauft/> > - 21.06.2016.

VON BREDOW 2012

Von Bredow, M.: Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie. Diss. TU München (2012). München: Utz 2014. ISBN: 978-3-8316-4337-0. (Forschungsberichte *iwb* 281).

## 8 Literaturverzeichnis

---

WAHAB ET AL. 2008

Wahab, M.; Wu, D.; Lee, C.-G.: A generic approach to measuring the machine flexibility of manufacturing systems. In: European Journal of Operational Research 186 (2008), S. 137-149.

WAHAB & STOYAN 2008

Wahab, M.; Stoyan, S.: A dynamic approach to measure machine and routing flexibilities of manufacturing systems. In: International Journal Production Economics 113 (2008), S. 895-913.

WECK & BRECHER 2005

Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbereiche. 6. Auf. Berlin: Springer 2005.

WEXXAR 2016

Wexxar Packaging, Inc. (Hrsg.): Fully Automatic Case Former / Case Erector. <<http://www.wexxar.com/products/fully-automatic-case-former-case-erector-wexxar-wf30/>> - 07.06.2016.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit - Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 4, S. 122-127.

WIENDAHL & HEGER 2004

Wiendahl, H.-P.; Heger, C.: Justifying changeability - A methodological approach to achieving Cost Effectiveness. In: The Manufacturing Journal for Manufacturing Science and Production (2004) 6, S. 33-39.

WIENDAHL 2009

Wiendahl, H.-P.: Veränderungsfähigkeit von Produktionsunternehmen - Ein morphologischer Ansatz. ZWF 104 (2009) 1-2, S. 32-37.

WIENDAHL ET AL. 2009

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhius, P.: Handbuch Fabrikplanung - Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München: Carl Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-22477-3.

WILKE 2011

Wilke, B.: Heutige Anforderungen an Verpackungssysteme und Lösungen von Bosch Packaging. Vortrag, 3. Verpackungssymposium. Kempten. 22.-23. September 2011.

WINKLER 2013

Winkler, S.: Automatisierung von Verpackungsmaschinen 5.0. Vortrag. Dresdner Verpackungstagung. Dresden. 05.-06. Dezember 2013.

WIRTH 1991

Wirth, S.: Bewertung und Gestaltung von Rüstarbeit - ein arbeitswissenschaftlicher Ansatz. Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg (1991). Düsseldorf: VDI-Verlag 1991. ISBN 3-18-145716-7.

---

WISCHNEWSKI 2014

Wischnewski, S.: Reduktion und Optimierung von Maschinenrüstzeiten durch effiziente Formatverstellung. Vortrag. Konstrukteurstag Verpackungstechnik. Waiblingen. 21. Oktober 2014.

WÖRDENWEBER & WICKORD 2008

Wördenweber, B.; Wickord, W.: Technologie- und Innovationsmanagement im Unternehmen - Lean Innovation. Berlin: Springer 2008.

YAO ET AL. 2010

Yao, W.; Dai, J.; Medland, T.; Mullineux, G.: A reconfigurable robotic folding system for confectionery industry. In: Industrial Robot - An International Journal 37 (2010) 6, S. 542-551.

YAO ET AL. 2011

Yao, W.; Cannella, F.; Dai, J.: Automatic folding of cartons using a reconfigurable robotic system. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 27 (2011), S. 604-613.

YAO & DAI 2012

Yao, W.; Dai, J.: Reconfigurable Automation of Carton Packaging with Robotic Technology. In: Dutta, A. (Hrsg.): Robotic Systems - Applications, Control and Programming. Rijeka, Kroatien: InTech 2012, S. 125-138.

ZAHORANSKY 2015

Zahoransky AG (Hrsg.): Zahoransky stellt die neuen High Performance Blister Verpackungsmaschine Z.VIPA vor. <<http://www.neue-verpackung.de/30952/zahoransky-stellt-die-neuen-high-performance-blister-verpackungsmaschine-z-vipa-vor/>> - 17.02. 2016.

ZÄH ET AL. 2003

Zäh, M.; Sudhoff, W.; Rosenberger, H.: Bewertung mobiler Produktionsszenarien mit Hilfe des Realloptionsansatzes. ZWF 98 (2003) 12, S. 646-651.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M.; Möller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München, 22.-23. September 2005. München: Utz 2005, S. 3-10. ISBN: 3-83160-540-8.

ZÄH ET AL. 2006a

Zäh, M.; von Bredow, M.; Möller, N.; Müssig, B.: Methoden zur Bewertung von Flexibilität in der Produktion. Industrie Management 22 (2006) 4, S. 29-32.

ZÄH ET AL. 2006b

Zäh, M.; Möller, N.; Müssig, B.; Rimpau, C.: Life cycle oriented valuation of manufacturing flexibility. In: Proceedings of LCE 2006, S. 699-704.



---

## 9 Anhang

### 9.1 Eingabewerte des Wirtschaftlichkeitsmodells

In diesem Abschnitt werden die Eingabewerte des Wirtschaftlichkeitsmodells, welches Bestandteil des Methodenbausteins Szenario-Steckbrief ist, dargelegt. Die Modellierung des Wirtschaftlichkeitsmodells fokussiert sich auf ausgewählte Eingabewerte. Diese können in allgemeine Planungsdaten und maschinenspezifische Daten untergliedert werden. Nachfolgend werden diese beschrieben:

#### Allgemeine Planungsdaten

1. *Maschinenarbeitszeit* in h/Jahr  
wird in DIN 8743 als: "(...) (die) Zeitspanne, für die das Maschinensystem für die Produktion einplanbar ist" definiert.
2. *Anzahl der Formatwechsel* in Stück/Jahr  
ist die Angabe der Häufigkeit der Formatwechsel. Der Wert kann auf Basis von vergangenheitsbezogenen Erfahrungswerten oder aus den Prognosen des geplanten Produktionsprogrammes abgeleitet werden.
3. *Erlös pro Stück* in €/Stück  
bezieht sich auf den Stückerlös, den der Betreiber der Verpackungsmaschine, durch den Verkauf einer hergestellten Packung abzüglich von unmittelbar zuordenbaren Stückkosten, z. B. Kosten für das Verpackungsmaterial bzw. das Packgut, erzielen kann. Unter Berücksichtigung aller variablen Stückkosten entspricht dies dem Stückdeckungsbeitrag.
4. *Stundensatz des Bedienpersonals* in €/h  
ist der Kostensatz je Stunde der Mitarbeiter, welche mit der Maschinenbedienung betraut sind.
5. *Stundensatz des Rüstpersonals* in €/h  
ist der Kostensatz je Stunde der Rüstmitarbeiter, welche den Formatwechsel durchführen. Aufgrund der höheren technischen Komplexität werden teilweise Mitarbeiter mit einem anderen Ausbildungsgrad eingesetzt. Dementsprechend kann dieser Stundensatz im Vergleich zu den Betriebsmitarbeitern variieren.

6. *Kalkulationszinssatz* in %  
repräsentiert die Erwartung an die Mindestverzinsung der geplanten Investition aus Sicht des Maschinenbetreibers (DAUM ET AL. 2014, S. 276).
7. *Nutzungsdauer* in Jahren  
ist die Zeitspanne der geplanten Einsatzdauer der Verpackungsmaschine beim Betreiber. In der Verarbeitungstechnik sind 5 bis 10 Jahre Nutzungsdauern häufig (RÖMISCH & WEIß 2014, S. 363).

### Maschinenspezifische Daten

8. *Anzahl der Betriebsmitarbeiter*  
ist die Anzahl der Mitarbeiter, welche im laufenden Betrieb die Maschine bedienen und weitere Tätigkeiten übernehmen, z. B. Einlegen von Verpackungsmaterialien, Maschinenüberwachung. Falls der Mitarbeiter mehrere Maschinen gleichzeitig bedient, ist dies anteilig zu berücksichtigen.
9. *Anzahl der Rüstmitarbeiter*  
ist die Anzahl der Mitarbeiter, die für den Formatwechsel benötigt werden, u. a. in der Vor- und Nachbereitung, der Durchführung des Formatwechsels und den Umrüsttätigkeiten. Falls die Mitarbeiter nur temporär eingesetzt werden, ist dies anteilig zu berücksichtigen. Abhängig von der Organisation eines Formatwechsels können mehrere Mitarbeiter gleichzeitig nötig sein. Auch können aufgrund der technischen Komplexität Mitarbeiter mit einem höheren Ausbildungsgrad zum Einsatz kommen.
10. *Einstellausbringung* in Stk./h  
ist gemäß DIN 8743 als die „theoretische Ausbringung, die bei eingestellter Arbeitsgeschwindigkeit des Maschinensystems erreichbar ist“ definiert. Weitere Ausbringungsverluste, wie z. B. die Ausschussmenge, sind hier noch nicht berücksichtigt.
11. *Ausschussquote* in %  
repräsentiert den Prozentsatz der Packungen, welche zwar produziert werden, allerdings wegen Qualitätsmängeln nicht verkauft werden können.
12. *Dauer eines Rüstvorgangs* in h  
ist die Zeitspanne des Maschinenstillstandes bei einem Wechsel von Format A zu B zwischen dem letzten Gutteil von Format A bis zum ersten Gutteil von B, vgl. Abbildung 23.



---

13. *Vorlaufverluste* in Stück

ist die in der Zeitspanne zwischen dem Ende des Maschinenstillstandes und dem Erreichen der Einstellausbringung weniger produzierte Ausbringungsmenge, vgl. Abbildung 23. Die Vorlaufverluste können mit der Vorlaufausbringung [Stk./h] und der Vorlaufdauer [h] beschrieben werden.

14. *Nachlaufverluste* in Stück

ist die in der Zeitspanne zwischen dem Einleiten und dem Beginn des Maschinenstillstandes weniger produzierte Ausbringungsmenge, vgl. Abbildung 23. Die Nachlaufverluste können anhand der Nachlaufausbringung [Stk./h] und der Nachlaufdauer [h] beschrieben werden.

15. *Maschinenkosten* in €

umfassen maßgeblich den Verkaufserlös der Verpackungsmaschine aus Herstellersicht. Aus Betreibersicht ist dies, abgesehen von weiteren Kostenbestandteilen, der größte Anteil der einmaligen Anschaffungskosten der Maschine.

16. *Formatwerkzeugkosten* in €

sind die Kosten, welche für formatspezifische Werkzeugsysteme anfallen. Die Angabe bezieht sich aus Herstellersicht auf den Verkaufserlös bzw. aus Betreibersicht auf die Anschaffungskosten. Im Falle von Verschleiß sind diese vor Ende der Nutzungsdauer der Verpackungsmaschine auszu-tauschen bzw. bei neuen Formaten ist ein Nachkauf nötig.

17. *Weitere Betriebskosten* in €

sind die weiteren Betriebskosten, welche nicht dem Kontext der Formatflexibilität zuzuordnen sind, z. B. Wartungs-, Energie-, Raumkosten.

## **9.2 Berechnungsgrundlage des Wirtschaftlichkeitsmodells**

Die dem Wirtschaftlichkeitsmodell, welches Bestandteil des Methodenbausteins Szenario-Steckbrief ist, zugrundeliegenden Berechnungen werden nachfolgend hergeleitet und dargelegt. Die Kapitalwertmethode basiert grundsätzlich auf einer Bilanzierung von Ein- und Auszahlungen (ERMSCHEL ET AL. 2011, S. 46). Um einen Kapitalwert anhand von anderen Größen, z. B. Erlöse und Kosten, zu ermitteln, modifizieren einige Autoren die Berechnung (u. a. SCHMITZ 1994, EICHHORN 2012).

Beispielweise nutzt SCHMITZ (1994, S. 2009 ff.) hierfür kalkulatorische Kosten gemäß dem Lücke-Theorem. Jedoch existieren unterschiedliche Einschätzungen, ob Rechengrößen anstelle von Zahlungsgrößen geeignet sind (GÖTZE 2008, S. 86). Aus diesem Grund und um die hiesige Modellierung zu fokussieren, wird auf eine derartige Modifikation verzichtet. Aus den jährlichen Einzahlungen  $E_t$ , den jährlichen Auszahlungen  $A_t$  und dem Zinssatz  $i$  errechnet sich der Kapitalwert  $NPV$  einer Investition mit der Nutzungsdauer  $n$  (DAUM ET AL. 2014, S. 276):

$$NPV = \sum_{t=0}^n (E_t - A_t)(1 + i)^{-t} \quad (1)$$

Ein Restwert der Investition am Ende der Nutzungsdauer wird zunächst nicht berücksichtigt. Der Betrag der jährlichen Einzahlungen  $E_t$  wird wie folgt berechnet:

$$E_t = q_{Q,t} e_t \quad (2)$$

wobei  $q_{Q,t}$  die jährliche Qualitätsmenge und  $e_t$  den Erlös pro Stück repräsentiert. Die jährliche Qualitätsmenge  $q_{Q,t}$  wird wiederum aus der jährlichen Ausschussmenge  $q_{LQ,t}$  und der jährlichen Produktionsmenge  $q_{M,t}$  ermittelt:

$$q_{Q,t} = q_{M,t} - q_{LQ,t} \quad (3)$$

Aus der jährlich geplanten Produktionsmenge  $q_{O,t}$  und den jährlichen Ausbringungsverlusten  $q_{LP,t}$  ergibt sich die jährlich erzeugte Produktionsmenge  $q_{M,t}$ :

$$q_{M,t} = q_{O,t} - q_{LP,t} \quad (4)$$

Aus der Multiplikation der Einstelleistung  $p_S$  mit der jährlichen Betriebszeit  $t_{O,t}$  resultiert die jährlich geplante Produktionsmenge  $q_{O,t}$ :

$$q_{O,t} = t_{O,t} p_S \quad (5)$$

Um abschließend die jährliche Betriebszeit  $t_{O,t}$  zu ermitteln, wird die jährliche Maschinenarbeitszeit  $t_{W,t}$  mit der geplanten Stillstandszeit  $t_{D,t}$  verrechnet:

$$t_{O,t} = t_{W,t} - t_{D,t} \quad (6)$$

Die Veränderung der Ausbringung während eines Rüstvorganges wird in Abbildung 23 dargestellt. Von der Einstellausbringung  $p_S$  ausgehend, reduziert sich die Ausbringung ab dem Zeitpunkt  $t_{N,0}$  bis zum Maschinenstillstand zum Zeitpunkt  $t_{N,1}$ . Während der Nachlaufphase entspricht die Ausbringung der Leistung  $p_{N,R}(t)$ . Im Maschinenstillstand werden keine Produkte verarbeitet.

Nach dem Abschluss des Formatwechsels wird die Ausbringung in der Vorlaufphase von  $t_{V,0}$  bis  $t_{V,1}$  beschleunigt bis abschließend die Einstellausbringung  $p_S$  erreicht ist. In der Hochlaufphase beschreibt die Leistung  $p_{V,R}(t)$  die Ausbringung. In die geplante Stillstandszeit  $t_{D,t}$  fließen die Maschinenstillstandszeiten aufgrund von Formatwechseln ein. Die DIN 8743 sieht hier die Berücksichtigung weiterer unproduktiver Zeiten, z. B. für Wartungstätigkeiten, vor, allerdings sind diese im Rahmen der Modellierung aufgrund des hiesigen Betrachtungsfokus bisher nicht integriert. Folglich berechnet sich die jährlich geplante Stillstandszeit aus der Anzahl der Formatwechsel  $R$  und der Dauer für die Formatwechsel  $t_S$ :

$$t_{D,t} = \sum_0^R t_S \quad (7)$$

Für die jährliche Betriebszeit  $t_{O,t}$  gilt daher:

$$t_{O,t} = t_{W,t} - \sum_0^R t_S \quad (8)$$

Die reduzierte Ausbringung während der Nachlauf- bzw. Hochlaufphase wird dagegen in jährliche Verlustmenge infolge verminderter Ausbringung  $q_{LP,t}$  berücksichtigt. Die Verlustmenge aufgrund der verminderten Ausbringung  $q_{LP,R}$  je Formatwechsel ergibt sich aus der Summe der Verluste der Nachlaufphase  $q_{N,R}$  und der Hochlaufphase  $q_{V,R}$ :

$$q_{LP,R} = q_{N,R} + q_{V,R} \quad (9)$$

Der Verlust aufgrund der Nachlaufphase  $q_{N,R}$  wird anhand der reduzierten Ausbringung  $p_{N,R}(t)$  und der Einstelleistung  $p_S$  wie folgt berechnet:

$$q_{N,R} = \int_{t_{N,0}}^{t_{N,1}} (p_S - p_{N,R}(t)) dt \quad (10)$$

In gleicher Weise wird der Verlust während der Hochlaufphase  $q_{V,R}$  bestimmt:

$$q_{V,R} = \int_{t_{V,0}}^{t_{V,1}} (p_S - p_{V,R}(t)) dt \quad (11)$$

Die kumulierte jährliche Verlustmenge infolge einer verminderten Ausbringung  $q_{LP,t}$  ist somit:

$$q_{LP,t} = \sum_0^R \left[ \int_{t_{N,0}}^{t_{N,1}} (p_S - p_{N,R}(t)) dt + \int_{t_{V,0}}^{t_{V,1}} (p_S - p_{V,R}(t)) dt \right] \quad (12)$$

Die nachfolgende Gleichung stellt den gesamten Zusammenhang für die Ermittlung der jährlichen Einzahlung  $E_t$  dar:

$$\begin{aligned}
 E_t &= q_{Q,t} e_t = (q_{M,t} - q_{LQ,t}) e_t = (q_{O,t} - q_{LP,t} - q_{LQ,t}) e_t \\
 E_t &= (t_{O,t} p_s - q_{LP,t} - q_{LQ,t}) e_t \\
 E_t &= \left( (t_{W,t} - \sum_0^R t_R) p_s - \sum_0^R \left[ \int_{t_{N,0}}^{t_{N,1}} (p_s - p_{N,R}(t)) dt + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \int_{t_{V,0}}^{t_{V,1}} (p_s - p_{V,R}(t)) dt \right] - q_{LQ,t} \right) e_t
 \end{aligned} \tag{13}$$

Die Summe der jährlichen Auszahlung  $A_t$  ergibt sich aus den Personalkosten  $K_{Personal,t}$ , den weiteren Betriebskosten  $K_{Betrieb,t}$  sowie den beiden Posten Maschinenkosten  $K_{Invest,t}$  und Formatwerkzeugkosten  $K_{Werkzeug,t}$ :

$$A_t = K_{Invest,t} + K_{Personal,t} + K_{Werkzeug,t} + K_{Betrieb,t} \tag{14}$$

Die jährlichen Personalkosten  $K_{Personal,t}$  werden wie folgt berechnet:

$$K_{Personal,t} = K_{BPersonal,t} + K_{RPersonal,t} \tag{15}$$

wobei  $K_{BPersonal,t}$  die jährlichen Personalkosten für das Bedienpersonal und  $K_{RPersonal,t}$  die jährlichen Personalkosten für das Rüstpersonal darstellen. Aus der jährlichen Maschinenarbeitszeit  $t_{W,t}$ , dem Stundensatz des Bedienpersonals  $K_B$  sowie der Anzahl der Bedienmitarbeiter  $B_{MA}$  werden die jährlichen Personalkosten für das Bedienpersonal  $K_{BPersonal,t}$  berechnet:

$$K_{BPersonal,t} = B_{MA} t_{W,t} K_B \tag{16}$$

Die Personalkosten des Rüstpersonals  $K_{RPersonal,t}$  sind abhängig von der Anzahl der Formatwechsel  $R$ , von der Dauer pro Formatwechsel  $t_s$ , dem Stundensatz des Rüstpersonals  $K_R$  und der Anzahl der Rüstmitarbeiter  $B_{RMA}$ :

$$K_{RPersonal,t} = R t_s K_R B_{RMA} \tag{17}$$

Für die praktische Nutzung ist das Wirtschaftlichkeitsmodell in dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel® abgebildet.

---

## 10 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden in den Jahren von 2012 bis 2016 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, in welchen unterschiedliche Fragestellungen zur Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen untersucht wurden und Ergebnisse in Teilen in die vorliegende Arbeit eingeflossen sind. Der Autor bedankt sich recht herzlich bei allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Ebenfalls sei ein Dank an die Praktikanten Ludwig Kemmer, Patrick Schuch und Christoph Stöttner für ihre ebenfalls geleistete Unterstützung ausgesprochen.

- Fink, Johannes: Experimentelle Untersuchung und konstruktive Entwicklung einer Siegel- und Trennvorrichtung für die Laserstrahlbearbeitung; Bachelorarbeit; Hochschule Augsburg; abgegeben im Februar 2016; eingeflossen in Abschnitt 5.2.
- Gödel, Florian: Analyse des Einsatzspektrums eines diodengepumpten Faserlasers in der Folienverpackungsindustrie; Bachelorarbeit; Hochschule München; abgegeben im August 2016; eingeflossen in Abschnitt 5.2.
- Jäger, Sebastian: Konzeption und Entwicklung eines Versuchsstandes für die Laserstrahlbearbeitung in Verpackungsmaschinen; Bachelorarbeit; Hochschule Kempten; abgegeben im August 2015; eingeflossen in Abschnitt 5.2.
- Krämer, Maximilian: Entwicklung einer produkt- und formatflexiblen Verpackungsmaschine, mit integrierten Einheiten für das Faltschachtelaufrichten, -befüllen und -verschließen; Diplomarbeit; Hochschule München; abgegeben im März 2013; eingeflossen in Abschnitt 5.3.
- Oepp, Christoph: Gestaltungspool für die Entwicklung formatflexibler und rüstopimaler Verpackungsmaschinen; Bachelorarbeit; Hochschule Augsburg; abgegeben im April 2016; eingeflossen in die Abschnitte 3.3 und 4.8.
- Rohrhirsch, Maximilian: Lösungsbaukasten für die Konzeptionierung flexibler Materialflusssysteme in Verarbeitungsanlagen; Masterarbeit; Technische Universität München; abgegeben im November 2015; eingeflossen in die Abschnitte 4.5 und 6.2.
- Thunig, Sven: Prozesstechnische Untersuchung von zwei Multi-Kontur-Impulssiegelplatten; Bachelorarbeit; Hochschule Kempten; abgegeben im August 2015; eingeflossen in Abschnitt 5.2.