

**Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer
Montagesysteme**
Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Tom Jonathan Stähr
aus Hamburg

Tag der mündlichen Prüfung: 06.02.2020
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Peter Nyhuis

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Produktionstechnik (wbk) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) seit September 2015.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Übernahme des Hauptreferats und ihr entgegengebrachtes Vertrauen. Für ihren Einsatz, den Umgang auf Augenhöhe und die Unterstützung beim Übergang in die nächste berufliche Herausforderung möchte ich mich herzlich bedanken.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis für sein Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gaute-
rin für den Prüfungsvorsitz.

Ich danke den Kollegen am wbk für die stets hervorragende Zusammenarbeit und kollegiale Momente in der Institutsküche mit unserem Lieblingskollegen Siebert. Großer Respekt und Dank gebührt auch den Abschlussarbeitern Florian Ungermann, Lucas Englisch, David Derichs, Brahim Bouchhima sowie dem Scrum-Team in der SkaliA-Programmierung Christoph Braun, Thi Thuy Ha Vu, Samuel Cohen und Marcel Meckes. Insbesondere Christoph Braun möchte ich für die intensiven Diskussionen bis in die Tiefen der Methodik danken.

Meinen Kollegen Fabio Echsler Minguillon und Stefan Treber möchte ich herzlich für das wertvolle Feedback zu meiner Ausarbeitung danken.

Meinen Eltern danke ich für die bedingungslose Liebe und das Vertrauen in meinen Erfolg.

Meiner Frau und Perle Theresa Stähr danke ich für die Liebe, den Ansporn und das Verständnis bei langen Arbeitstagen.

Karlsruhe, im Oktober 2019

Tom Jonathan Stähr

Abstract

Modern production systems must be able to react to the uncertain and volatile requirements resulting from short product life cycles and personalized customer requests. Changeable systems are needed, that can adapt to these changing requirements and achieve similar cost efficiency as traditional lean production systems. Especially in high-wage countries Scalable Automation is a key prerequisite to reach this cost-efficiency. Scalable Automation allows a quick increasement or decreasement of the level of automation of an assembly system. There are different technical and organizational possibilities for the implementation of changeable assembly systems. The right assembly stations and the optimal change enablers for minimizing the life cycle costs of an assembly system must be found. In order to identify effective change enablers it is necessary to develop concepts for changeable production equipment with different levels of automation, at an early stage.

The aim of this dissertation is to derive technical measures for achieving the optimal changeability of an assembly system. For this purpose, the optimal changeability is measured on the basis of the expected life cycle costs of the assembly system. The considered changeability focuses on Scalable Automation.

The methodology of deriving technical measures for achieving the optimal changeability consists of four steps. First step is the quantification of volatility and uncertainty based on change drivers influencing specific receptor key performance indicators (receptor KPIs). In the second step the technical solution space of possible physical configurations of the system is developed. In order to calculate a scaling strategy a Markov decision problem is formulated and solved in the third step. The fourth step consists of the analysis of the scaling strategy and the derivation of construction guidelines for specific change enablers in order to find technical measures for achieving the optimal changeability. The methodology is explained using the example of the Learning Factory Global Production of the wbk Institute of Production Science.

For verification purposes, the methodology is applied to the case of a manufacturer of high pressure valves for the use in mobile fuel cells. In order to carry out the necessary calculations the application SkaliA has been developed.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Veränderungsfähigkeit	5
2.1.1 Flexibilität	5
2.1.2 Wandlungsfähigkeit	6
2.2 Markovsche Entscheidungsprobleme	14
2.2.1 Modellierung	15
2.2.2 Lösungsverfahren	16
3 Stand der Technik	21
3.1 Montageplanung	21
3.2 Planung wandlungsfähiger Fabriken	22
3.3 Planung wandlungsfähiger Montagelinien	25
3.4 Ableitung des Forschungsdefizits	30
4 Planungsmethodik	33
4.1 Schritt 1: Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit	34
4.1.1 Szenariomodell	35
4.1.2 Aggregierte Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen	41
4.2 Schritt 2: Lösungsraum	47
4.2.1 Systemabschnittskonzepte	47
4.2.2 Montagesystemkonfigurationen	73
4.3 Schritt 3: Skalierungsstrategie	80

4.3.1	Modellierung als Markovsches Entscheidungsproblem	81
4.3.2	Lösung Markovsches Entscheidungsproblem	87
4.4	Schritt 4: Konstruktionsrichtlinien	91
4.4.1	Analyse Skalierungsstrategie	92
4.4.2	Ableitung konstruktiver Richtlinien	96
5	Prototypische Anwendung in der Brennstoffzellenproduktion	102
5.1	Schritt 1: Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit	103
5.1.1	Szenariomodell	103
5.1.2	Aggregierte Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen	110
5.2	Schritt 2: Lösungsraum	116
5.2.1	Systemabschnittskonzepte	116
5.2.2	Montagesystemkonfigurationen	128
5.3	Schritt 3: Skalierungsstrategie	129
5.3.1	Beschreibung eines exemplarischen Skalierungspfads	130
5.3.2	Diskussion des Simulationsergebnisses	136
5.4	Schritt 4: Konstruktionsrichtlinien	138
5.4.1	Wandlung A: Von „man. Vormontage“ auf „Teilaut. Vormontage“	139
5.4.2	Wandlung G: Entfernen von „Erweiterte manuelle Endmontage“	143
5.4.3	Weitergabe der Ergebnisse	144
6	Kritische Diskussion und Ausblick	145
6.1	Kritische Diskussion	145
6.2	Ausblick	146
7	Zusammenfassung	149
	Publikationsliste	I
	Literaturverzeichnis	II
	Abbildungsverzeichnis	XII
	Tabellenverzeichnis	XVII
	Anhang	XVIII
A1.	Ergebnisse der MC-Simulation der Rezeptor-Kennzahlen	XVIII

A2. Übersicht der Montageaufgaben	XXI
A3. Steckbriefe der Montagestationskonzepte	XXIII
A4. Zusammenfassung Montagestationskonzepte	XXXI
A5. Steckbriefe der Systemabschnitte	XXXIV
A6. Wandlungsmatrizen	LVI
A7. Konstruktionsrichtlinien	LVIII

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
MDP	Markovsches Entscheidungsproblem
MSK	Montagesystemkonfiguration

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
a	Aktion	
a_z^t	Optimale Aktion zur Planungsperiode t im Zustand z	
$A(z_{det})$	Aktionsraum für den deterministischen Zustand z_{det}	
abk_s	Abbaukosten von Systemabschnitt s	€
Alt_s	Stationsalternativen mit unterschiedlichen Montageaufgaben	
Anz_{AT}	Anzahl Arbeitstage im Jahr	Tage/Jahr
Anz_w^x	Anzahl Werker der Montagesystemkonfiguration x	Werker
AR_x	Abweichung von einer Restriktion der Rezeptor-Kennzahl x	
auk_s	Aufbaukosten von Systemabschnitt s	€
aut_s	Automatisierungsgrad des Systemabschnitts s	%
ak_s	Anschaffungskosten des Systemabschnitts s	€
ba_x	Resultierender Absolutanteil aus dem Eintritt des Wandlungstreibers x .	
ba^t	Absolutanteil einer Rezeptor-Kennzahl in Planungsperiode t über alle verknüpften Wandlungstreiber	
$BK(z)$	Betriebskosten in Abhängigkeit des Zustands z	€
br_x	Resultierender Relativanteil aus dem Eintritt des Wandlungstreibers x .	
br^t	Relativanteil einer Rezeptor-Kennzahl in Planungsperiode t über alle verknüpften Wandlungstreiber	
bz_s	Bearbeitungszeit des Systemabschnitts s	Min
c, k	Indizes der Montagesystemkonfiguration	
E	Maximal zulässiger Fehler der Näherung an p	
ek_s	Engineeringkosten für die Inbetriebnahme von Systemabschnitt s	€
FK_s	Jährliche Fixkosten des Systemabschnitts s	€/Jahr
FK^x	Jährliche Fixkosten der Montagesystemkonfiguration x	€/Jahr
$f_t^a(x_1, \dots, x_n, f_{t-1}^a)$	Wert der Rezeptor-Kennzahl a in Planungsperiode t in Abhängigkeit des Werts der vorangegangenen	

	Planungsperiode und den Wandlungstreibern x_1 bis x_n	
gbz_x	Gesamtbearbeitungszeit der Montagesystemkonfiguration x	Min
gk_z^t	Erwartungswert der Gesamtkosten von Planungsperiode t bis T im Zustand z	€
$gk_z^t(a, z_{stoch})$	Erwartungswert der Gesamtkosten von Planungsperiode t bis T im Zustand z , bei Wahl der Aktion a und Eintreten des stochastischen Zustands z_{stoch}	€
i, j	Indizes der Klassen im Wertebereich einer Rezeptor-Kennzahl x	
I	Menge aller Montageaufgaben eines Montagesystems	
i_x	Ausprägung der Rezeptor-Kennzahl x	
I_x	Menge aller Ausprägungen der Rezeptor-Kennzahl x	
$IK_{r \rightarrow s}$	Investitionskosten für die bei einer Wandlung von Systemabschnitt r auf Systemabschnitt s entfernten Betriebsmittel	€
IKS_s	Investitionskosten für die gesamt Montagesystemkonfiguration s	€
$K_h(z)$	Stundenlohn	€/Std
$K_t(z)$	Produktionskosten der Planungsperiode t in Abhängigkeit des Zustands z	€/t
K_x	Menge der Klassenpaare aller Übergänge im aggregierten Szenario der Rezeptor-Kennzahl x	
\overrightarrow{KM}_t	Vektor der Ausprägungen von KM_t	
$KM_{x,t}$	Matrix der Einzelwahrscheinlichkeiten für die Übergänge aller Klassen einer Rezeptor-Kennzahl x von Planungsperiode t zu Planungsperiode $t + 1$	
KM_t	Erweiterte Matrix der Einzelwahrscheinlichkeiten für die Übergänge zwischen den Zuständen von Planungsperiode t zu Planungsperiode $t + 1$	
$kp_{i \rightarrow j}$	Einzelwahrscheinlichkeit in $KM_{x,t}$ für den Übergang von Klasse i zu Klasse j	
k_{ziel}	Index der Montagesystemkonfiguration zu der nach Ablauf der Wartedauer nk gewandelt wird	
$\overline{lim}A_x^m$	Obere Schranke der Restriktion des Systemabschnitts x für die Rezeptor-Kennzahl m	
$\underline{lim}A_x^m$	Untere Schranke der Restriktion des Systemabschnitts x für die Rezeptor-Kennzahl m	
$\overline{lim}S_x^m$	Obere Schranke der Restriktion der Montagesystemkonfiguration x für die Rezeptor-Kennzahl m	

$\underline{\lim S_x^m}$	Untere Schranke der Restriktion der Montagesystemkonfiguration x für die Rezeptor-Kennzahl m	
m_x	Resultierender Steigungsanteil aus dem Eintritt des Wandlungstreibers x .	
m^t	Steigung einer Rezeptor-Kennzahl in Planungsperiode t über alle verknüpften Wandlungstreiber	
MA_x	Menge aller in Montagesystemkonfiguration x enthaltenen Systemabschnitte	
MAM_x	Menge aller in Montagesystemkonfiguration x enthaltenen Systemabschnitte mit manueller Tätigkeit	
MSK	Menge aller geplanten Montagesystemkonfigurationen eines Planungsprojekts	
MTL	Menge der Montageaufgabenlisten	
N	Anzahl Iterationen einer Monte Carlo Simulation	
na_a	Anzahl Duplikationen von Systemabschnitt a	
NA_s	Anzahl Systemabschnitte in Montagesystemkonfiguration s	
nk	Verbleibende Wartedauer bis die Wandlung von k zu k_{Ziel} vollzogen werden kann	t
nm_s	Anzahl Mitarbeiter in Montagesystemkonfiguration s	Werker
NM_s	Anzahl manueller Arbeitsplätze in Montagesystemkonfiguration s	
p	Zu schätzender Wert einer Monte Carlo Simulation	
p'	Initialer Schätzer für p	
\hat{p}	Schätzung für p nach N Durchläufen einer Monte Carlo Simulation	
pa	Anzahl Montageaufgaben eines Montagesystems	
py_x^{max}	Obere Schranke für die Jahresstückzahl von Montagesystemkonfiguration x	Stück/Jahr
PY^{max}	Maximal erwartete Jahresstückzahl aus dem aggregierten Szenario	Stück/Jahr
r, s	Indizes der Montagestationskonzepte	
R	Menge der bei einem Wandel hinzugefügten Montagesystemkonfigurationen	
\bar{R}	Menge der bei einem Wandel durch Modulanpassung hinzugefügten Montagesystemkonfigurationen	
RZK	Menge aller Rezeptor-Kennzahlen im Planungsprojekt	
S	Menge der bei einem Wandel entfernten Montagesystemkonfigurationen	

\bar{S}	Menge der bei einem Wandel durch Modulanpassung entfernten Montagesystemkonfigurationen	
SD	Schichtdauer	Std/Schicht
shf_s	Anzahl Schichten in Montagesystemkonfiguration s	
$SK(z)$	Strafkosten in Abhängigkeit des Zustands z	€
SKS	Skalierungsstrategie	
sk_x	Strafkostenterm der Rezeptor-Kennzahl x	€
SV_x	Vektor aller KM_t in T für die Rezeptor-Kennzahl x	
$sZ_{r \rightarrow s}$	Stillstandszeit durch die Wandlung von Systemabschnitt r nach Systemabschnitt s	Std
t	Planungsperiode	
Δt	Periodendauer	Jahre
T	Menge der Planungsperioden	
TkT_s	Taktzeit des Systemabschnitts s	Min
TkT^x	Taktzeit der Montagesystemkonfiguration x	Min
t_{max}	Anzahl Planungsperioden im gesamten Planungshorizont	
tsk_i	Prozessaufgabe mit fortlaufendem Index i	
tl_x^a	Montageaufgabenteilliste x der Montageaufgabenliste a	
TL^a	Montageaufgabenliste a	
$W_{x,\dots,y}^{n,\dots,m}$	Wahrscheinlichkeitsvektor der Auswirkungen der n bis m eingetretenen und der x bis y nicht eingetretenen Wandlungstreiber auf eine diskrete Rezeptor-Kennzahl	
$wd_{c \rightarrow k}$	Wandlungsdauer für den Wandel von Montagesystemkonfiguration c zu Montagesystemkonfiguration k	t
WD	Wandlungsdauermatrix auf Montagesystemkonfigurationsebene	
$wk_{c \rightarrow k}$	Wandlungskosten für den Wandel von Montagesystemkonfiguration c zu Montagesystemkonfiguration k	€
WK	Wandlungskostenmatrix auf Montagesystemkonfigurationsebene	
$wds_{0 \rightarrow s}$	Wandlungsdauer für den Aufbau von Systemabschnittskonzept s	T

$wds_{s \rightarrow 0}$	Wandlungsdauer für den Abbau von Systemabschnittskonzept s	T
$wds_{r \rightarrow s}$	Wandlungsdauer für den Wandel von Systemabschnittskonzept r zu Systemabschnittskonzept s	t
WDS_a	Wandlungsdauermatrix auf Systemabschnittsebene, für Systemabschnitt a	
$wha_{r \rightarrow s}$	Erwartete Wandlungshäufigkeit von Systemabschnitt r auf Systemabschnitt s	
WHA	Matrix der erwarteten Wandlungshäufigkeiten der Systemabschnitte	
$whs_{x \rightarrow y}$	Erwartete Wandlungshäufigkeit von Montagesystemkonfiguration x auf Montagesystemkonfiguration y	
WHS	Matrix der erwarteten Wandlungshäufigkeiten der Montagesystemkonfigurationen	
$wks_{0 \rightarrow s}$	Wandlungskosten für den Aufbau von Systemabschnittskonzept s	€
$wks_{s \rightarrow 0}$	Wandlungskosten für den Abbau von Systemabschnittskonzept s	€
$wks_{r \rightarrow s}$	Wandlungskosten für den Wandel von Systemabschnittskonzept r zu Systemabschnittskonzept s	€
WKS_a	Wandlungskostenmatrix auf Systemabschnittsebene, für Systemabschnitt a	
wks^{dip}	Direkte Wandlungsprozesskosten	€
wks^{inp}	Indirekte Wandlungsprozesskosten	€
wks^{obj}	Wandlungsobjektkosten	€
wpw_s	Wandlungspotenzialwert des Systemabschnitts s	
x	Index einer Rezeptor-Kennzahl	
γ	Konfidenzniveau für die Sicherheit, dass \hat{p} um nicht mehr als $\pm E$ von p abweicht	
z	Zustand	
z_{det}	Deterministischer Zustand	
$zp_{z_{stoch} \rightarrow z'_{stoch}}$	Einzelwahrscheinlichkeit in KM_t für den Übergang von Zustand z_{stoch} zu Zustand z'_{stoch}	
z_{stoch}	Stochastischer Zustand	
Z	Zustandsraum	
Z_{det}	Deterministischer Teilraum	
Z_{wait}	Teilraum von Z_{det} für Zustände mit begonnener Wartedauer	

Z_{stoch} Stochastischer Teilraum

1 Einleitung

Die Globalisierung führt dazu, dass die internationalen Märkte näher zusammenwachsen. An der ETH Zürich wurde der *KOF Globalisation Index* als Maß für den Grad der Globalisierung definiert. Der Index nimmt stetig zu (Gygli & Haelg et al. 2019). Produktionskapazitäten können immer freier in der ganzen Welt allokiert werden. Insbesondere in Nordamerika, Europa und Asien stehen somit Produktionsstandorte in einem globalen Wettbewerb zueinander. Eine Abwanderung von Produktionskapazitäten aus Europa in Richtung Osten lässt sich beobachten (Kinkel 2012). Im Wettbewerb mit Produktionsstandorten in Asien und Osteuropa hat die produzierende Industrie in Nord- und Westeuropa Kostennachteile durch hohe Lohnkosten. Statistiken der OECD, Statista und dem Global Wage Report zufolge ist das Lohnniveau in Deutschland trotz eines starken Anstiegs in China noch immer um das Vierfache höher (OECD 2019; International Labour Office 2018; Statista 2019). In der Folge verlieren westeuropäische Werke teilweise ihre Wettbewerbsfähigkeit. Ein Teil der Unternehmen reagiert mit der Verlagerung von Produktionsstätten in Niedriglohnstandorte (Kinkel 2012). Andere Unternehmen versuchen mit einer Erhöhung des Automatisierungsgrades, den Anteil der Lohnkosten an den Stückkosten zu senken um den Standort in Westeuropa zu halten (Autor 2015). Es resultiert ein überdurchschnittlich hoher Automatisierungsgrad in Westeuropa.

1.1 Motivation

Seit Beginn der 1990er Jahre wird im Zusammenhang der Globalisierung das Phänomen der *Mass Customization* beschrieben (Davis 1989; Koren & Heisel et al. 1999). Durch individualisierte Kundenwünsche und die Globalisierung müssen variantenreiche Produkte mit kurzen Produktlebenszyklen und unsicherer Nachfrage produziert werden (Islamoglu & Ryu et al. 2014; Keddiss & Kainz et al. 2015). Die Anforderungen, welche aus der *Mass Customization* für Produktionssysteme resultieren, verschärfen sich weiter. Währenddessen wird bereits die *Mass Personalization* postuliert, in der eine Massenproduktion von auf den einzelnen Kunden personalisierten Produkten erforderlich wird (Wang & Ma et al. 2017). Moderne Produktionssysteme müssen auf die aus kurzen Produktlebenszyklen und personalisierten Kundenwünschen erwachsenden Unsicherheiten und volatilen Anforderungen reagieren können. Die hocheffizienten, nach den Lean Prinzipien optimierten Produktionsanlagen stoßen bei diesen hohen Anforderungen an ihre Grenzen (Kolberg & Zühlke 2015). Es werden wandlungsfähige Systeme

benötigt, die sich an diese wechselnden Anforderungen anpassen und dabei eine ähnliche Kosteneffizienz erreichen wie traditionelle schlanke Produktionssysteme. Für diese komplexe Aufgabe werden gut ausgebildete Fachkräfte in der Produktionsplanung und -steuerung, sowie auf dem Shop Floor benötigt (Lanza & Nyhuis et al. 2018; Hirsch-Kreinsen 2015). Somit bietet die *Mass Customization* eine Chance für westeuropäische Hochlohnstandorte. Sie können auf qualifizierte Fachkräfte zurückgreifen, um manuelle Produktionsaufgaben in Westeuropa wettbewerbsfähig durchzuführen. Insbesondere in der Montage ist diese Wandlungsfähigkeit wichtig, weil dort die größte Varianz entsteht. Betrachtet man unreife Produktionstechnologien wie bspw. die Brennstoffzellenproduktion, sind Unsicherheit und Volatilität noch stärker als bei etablierten Technologien der produzierenden Industrie. Daher ist die Montage mit unreifen Produktionstechnologien an Hochlohnstandorten eine erfolgskritische Herausforderung für die Industrie in Westeuropa.

Es bestehen die technischen und organisatorischen Möglichkeiten für die Umsetzung wandlungsfähiger Montagesysteme (Naumann & Fechter 2015). Wandlungsfähige Montagesysteme sind in den Anschaffungskosten jedoch teurer als starre Montagesysteme. Die Einsparung stellt sich erst in der Betrachtung des Lebenszyklus des Montagesystems ein, wenn die Einflussfaktoren eine Wandlung erzwingen. Es muss der richtige Kompromiss zwischen zu niedriger Wandlungsfähigkeit und zu hoher Wandlungsfähigkeit gefunden werden. Zu diesem Zweck muss der Trade-Off zwischen hohen Anschaffungskosten und hohen Kosten bei einer Wandlung betrachtet werden (Daščenko 2006; Fisel & Arslan et al. 2017). Um in diesem Spannungsfeld optimale Entscheidungen treffen zu können, benötigen Produktionsplaner eine Entscheidungsunterstützung. Es müssen die richtigen Montagestationen und die optimalen Wandlungsbefähiger für eine Minimierung der Lebenszykluskosten eines Montagesystems gefunden werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Ableitung technischer Maßnahmen für die Erreichung der optimalen Wandlungsfähigkeit eines Montagesystems. Die Optimalität der Wandlungsfähigkeit wird zu diesem Zweck anhand der erwarteten Lebenszykluskosten des Montagesystems gemessen. Der Ansatz beschränkt sich auf die Betrachtung von Montagesystemen und schließt die Berücksichtigung der Teilefertigung aus. Die Mehrheit der Teilefertigung beruht technisch bedingt auf automatisierten Prozessen. Des Weiteren birgt die Teilefertigung technisch bedingte Restriktionen, die sich grundlegend

von jenen der Montage unterscheiden. Die betrachtete Wandlungsfähigkeit soll insbesondere die skalierbare Automatisierung berücksichtigen. Ein Montagesystem mit skalierbarem Automatisierungsgrad kann seinen Automatisierungsgrad sowohl erhöhen als auch reduzieren. Um dieses Hauptziel der Arbeit zu erreichen, müssen vier Teilziele erreicht werden:

- Die Auswirkungen unsicherer Entwicklungen im Unternehmensumfeld auf das Montagesystem müssen prognostiziert werden. Um belastbare Aussagen treffen zu können, sollen die Auswirkungen quantifiziert werden.
- Der technische Lösungsraum für die Umsetzung eines wandlungsfähigen Montagesystems muss aufgestellt werden. Dieser Lösungsraum soll insbesondere Möglichkeiten zur Skalierung des Automatisierungsgrads beinhalten. Um das volle Wandlungspotenzial auszuschöpfen, sollen auch kurzfristige Anpassungen durch den Lösungsraum ermöglicht werden.
- Eine Skalierungsstrategie muss vorgegeben werden, welche in Abhängigkeit der erwarteten Auswirkungen der unsicheren Entwicklungen aus dem Unternehmensumfeld eine technische Lösung empfiehlt.
- Es müssen aus der Skalierungsstrategie die wichtigsten Wandlungsbedarfe abgeleitet werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit wird in Abbildung 1.1 zusammenfassend dargestellt. Im folgenden Kapitel 2 werden die für das Verständnis der Planungsmethodik benötigten Grundlagen erläutert. Forschungsarbeiten mit verwandten Zielstellungen für die vorliegende Arbeit werden in Kapitel 3 zusammengefasst. Aus der Zielstellung dieser Arbeit resultieren konkrete Anforderungen an die Planungsmethodik. Die relevanten Forschungsarbeiten werden anhand dieser Anforderungen bewertet und ein Forschungsdefizit abgeleitet. Kapitel 4 beinhaltet die vier Schritte der entwickelten Planungsmethodik, welche die in Unterkapitel 1.2 definierte und in Unterkapitel 3.4 konkretisierte Zielstellung erfüllt. Die Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit in Unterkapitel 4.1 erfüllt das erste Teilziel. In Unterkapitel 4.2 wird die Erstellung des technischen Lösungsraums als Erfüllung des zweiten Teilziels beschrieben. Teilziel 3 beinhaltet die Berechnung einer Skalierungsstrategie und wird in Unterkapitel 4.3 beschrieben. Das vierte Teilziel und die Erreichung der abschließenden Zielsetzung werden in Unterkapitel 4.4 anhand der Ermittlung von Konstruktionsrichtlinien erreicht. Die entwickelte Planungsmethodik wird

in Kapitel 5 auf einen Anwendungsfall in der Montage von Hochdruckventilen für den Einsatz in mobilen Brennstoffzellen angewendet. Eine abschließende Zusammenfassung und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsthemen finden sich in Kapitel 6.

1		Einleitung	
1.1 Motivation		1.2 Zielsetzung	
		1.3 Aufbau der Arbeit	
2		Grundlagen	
2.1 Veränderungsfähigkeit		2.2 Markovsche Entscheidungsprobleme	
3		Stand der Technik	
3.1 Montageplanung		3.2 Planung wandlungsfähiger Fabriken	
3.3 Planung wandlungsfähiger Montagelinien		3.4 Ableitung des Forschungsdefizits	
4		Planungsmethodik	
4.1 Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit		4.2 Lösungsraum	
4.3 Skalierungsstrategie		4.4 Konstruktionsrichtlinien	
5		Prototypische Anwendung in der Brennstoffzellenproduktion	
5.1 Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit		5.2 Lösungsraum	
5.3 Skalierungsstrategie		5.4 Konstruktionsrichtlinien	
6		Zusammenfassung und Ausblick	
6.1 Zusammenfassung		6.2 Ausblick	

Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die relevanten Grundlagen für das Verständnis der entwickelten Methodik gelegt. In Unterkapitel 2.1 werden die Begriffe Wandlungsfähigkeit und Flexibilität in den Kontext der Veränderungsfähigkeit eingeordnet. Die Wandlungsfähigkeit wird tiefergehend behandelt. In Unterkapitel 2.2 werden die Modellierung sowie die Lösung Markovscher Entscheidungsprobleme erläutert.

2.1 Veränderungsfähigkeit

Wie in Unterkapitel 1.1 dargelegt, ist die „situationsgerechte Anpassung eines Produktionsunternehmens an die vielfältigen externen und internen Herausforderungen“ (Wiendahl & Reichardt et al. 2014) eine integrale Herausforderung. Die Fähigkeit eines Unternehmens diese Anpassungen vorzunehmen wird als Veränderungsfähigkeit definiert (Wiendahl & Reichardt et al. 2014). Im Folgenden werden die Begriffe Wandlungsfähigkeit und Flexibilität als Teil der Veränderungsfähigkeit gemäß (Wiendahl & Reichardt et al. 2014) beschrieben. Das Verständnis von Wandlungsfähigkeit in dieser Arbeit basiert auf dieser Einordnung.

2.1.1 Flexibilität

Die Betriebsmittel, Mitarbeiter und Fähigkeiten, welche einem Unternehmen zur Produktion ihrer Produkte zur Verfügung stehen, werden im Folgenden allgemein als Produktionsressourcen bezeichnet. Als Flexibilität definieren (Wiendahl & Reichardt et al. 2014) die Fähigkeit eines Unternehmens, ausschließlich durch vorhandene Produktionsressourcen mit gewissen Schwankungen der Anforderungen umgehen zu können. In der Literatur existieren viele Beiträge zur flexiblen Produktion. In (Toni & Tonchia 1998) werden diese Ansätze und Definitionen beleuchtet und klassifiziert. Es wird unterschieden in eine statische und eine dynamische Flexibilität. Die statische Flexibilität ermöglicht die stabile Produktion innerhalb definierter Flexibilitätsgrenzen, ohne eine Anpassung von Struktur und Abläufen des Systems vornehmen zu müssen. Die Möglichkeit, Struktur und Abläufe mit vorhandenen Mitteln bei niedrigen Kosten kurzfristig anzupassen, wird als dynamische Flexibilität definiert. Der allgemeine Flexibilitätsbegriff wird in (Fuchs & Hager et al. 1990) auf die Automation bezogen. Die flexible Automation wird definiert als „rasch umrüstbare Einrichtung oder Verfahrenstechnik, die bestimmte Funktionen zur Umrüstung und Arbeitsoperation selbstständig und zwangsläufig ausführt“. Somit bietet eine flexible Automation nach (Fuchs & Hager et al. 1990)

eine starre Flexibilität, welche ein gewisses Produktportfolio ohne Eingriff durch den Menschen produzieren kann.

2.1.2 Wandlungsfähigkeit

Bei Anforderungen, die Änderungen über die spezifische Flexibilität eines Produktionssystems hinaus erfordern, werden Anpassungen von Abläufen und Strukturen erforderlich. Ein Produktionssystem, für das diese Anpassungen bereits vorgedacht wurden, wird als wandlungsfähig bezeichnet. „Wandlungsfähigkeit wird als Potenzial verstanden, eine schnelle Anpassung auch jenseits vorgehaltener Korridore in Bezug auf Organisation und Technik bei einem geringen Investitionsaufwand zu ermöglichen“ (Reinhart & Kerbs et al. 2008). Der neuere Begriff der Wandlungsfähigkeit wird gegenüber der Flexibilität durch den Vorhalt der Produktionsressourcen für die Veränderung abgegrenzt. Bei einer flexiblen Anpassung an Schwankungen sind die Produktionsressourcen für die Anpassung zum Zeitpunkt des Auftretens der Schwankung bereits vorhanden. Für die wandlungsfähige Anpassung sind die Produktionsressourcen zur Anpassung an die Schwankung bereits vorgedacht und im Produktionssystem berücksichtigt. Sie werden aber erst nach Eintritt der Schwankung beschafft. Abbildung 2.1 visualisiert die Unterscheidung der Veränderungsfähigkeit in Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. Die Ordinate zeigt eine generische Wandlungsdimension, wie beispielsweise eine geforderte Stückzahl. Auf der Abszisse ist die zeitliche Entwicklung der Anforderung durch die Wandlungsdimension abgetragen. Die grau markierten Bereiche visualisieren einen

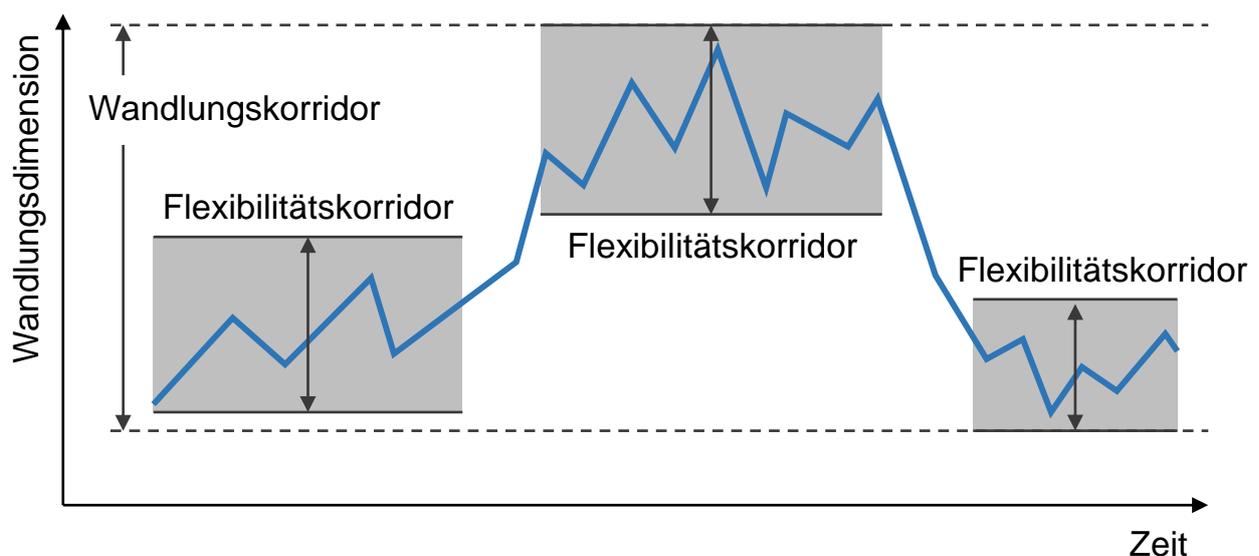


Abbildung 2.1: Abgrenzung Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (Wiendahl & Reichardt et al. 2014)

Wertebereich der Wandlungsdimension, innerhalb dessen mit der vorgehaltenen Flexibilität produziert werden kann. Mit der Durchführung einer Wandlung kann dieser Wertebereich verschoben und in seiner Größe angepasst werden. Das Ausmaß dieser Verschiebungen ist durch das Maß der vorgedachten Wandlungsfähigkeit begrenzt, welche in Abbildung 2.1 durch den Wandlungskorridor visualisiert wird.

Im Folgenden werden Teilkonzepte der Wandlungsfähigkeit erläutert und zueinander in Bezug gesetzt. Abbildung 2.2 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge der wichtigsten Begrifflichkeiten. Die Unterkapitel zur Erklärung des jeweiligen Begriffs sind in der Grafik angegeben. Zentraler Punkt des wandlungsfähigen Produktionssystems ist das Wandlungsobjekt, an dem eine Wandlung durchgeführt wird. Die Rezeptoren nehmen Wandlungstreiber wahr und lösen im Wandlungsobjekt einen Wandlungsdruck aus. Die Fähigkeit des Wandlungsobjekts, schnell und mit geringem Aufwand auf den Wandlungsdruck reagieren zu können, wird durch die Wandlungsbefähiger des Objekts verbessert. Das Maß der Wandlungsfähigkeit des Wandlungsobjekts kann durch den Wandlungspotenzialwert gemessen werden. Kommt es zu einer Wandlung, wie in Abbildung 2.2 durch die Zeitachse angedeutet, kann sie unter anderem durch Anwendung

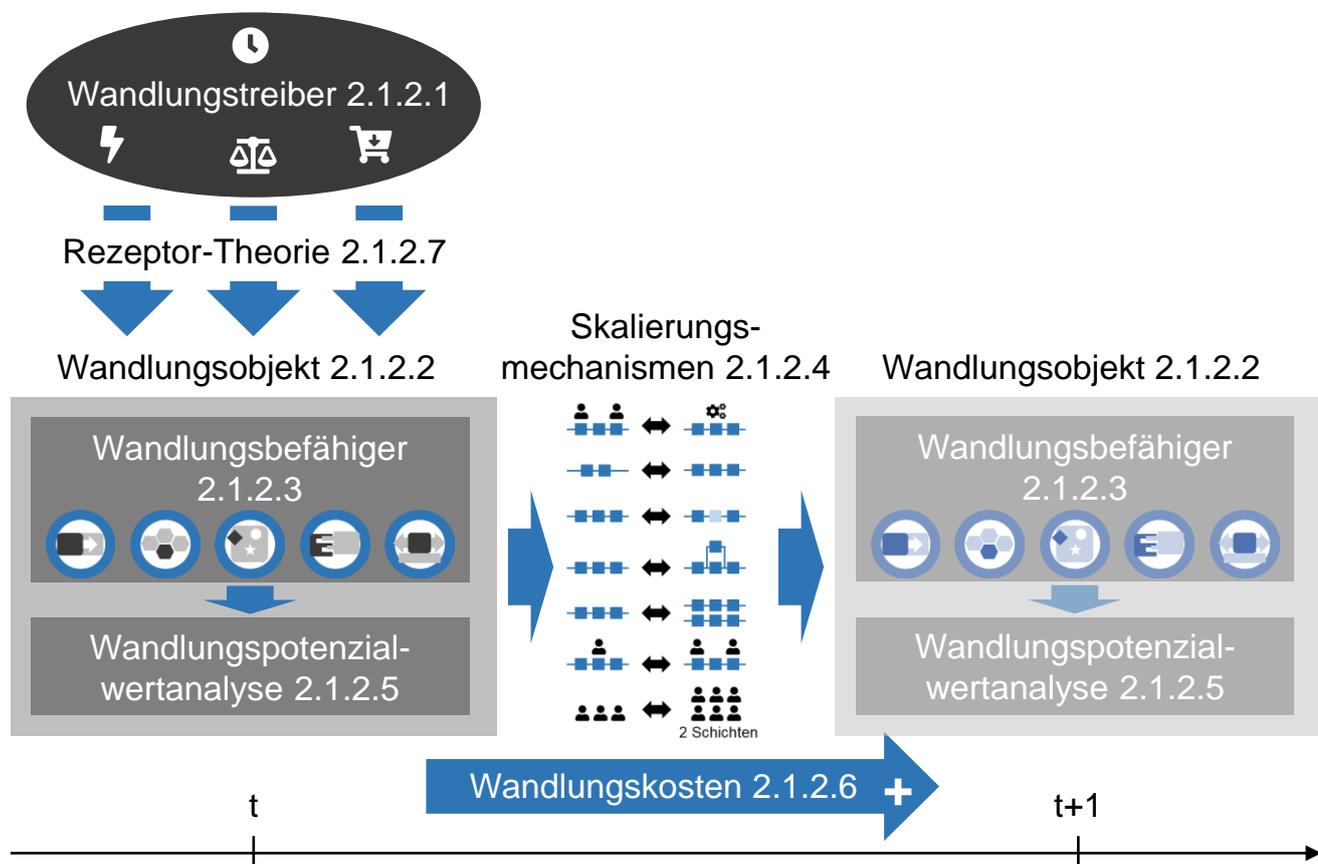


Abbildung 2.2: Überblick der Elemente eines wandlungsfähigen Produktionssystems

der Skalierungsmechanismen umgesetzt werden. Bei dieser Wandlung fallen sogenannte Wandlungskosten an.

2.1.2.1 Wandlungstreiber

Eine Veränderung des Produktionssystems innerhalb eines Wandlungskorridors wird aufgrund von Schwankungen erforderlich. In der Literatur werden die Auslöser dieser Schwankungen als Wandlungstreiber bezeichnet (Wiendahl & Reichardt et al. 2014; Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007). Wandlungstreiber sind Ereignisse, welche innerhalb oder außerhalb des Unternehmens auftreten können und einen Wandlungsdruck auf das betrachtete Produktionssystem ausüben. Um ein Produktionssystem wandlungsfähig auslegen zu können, muss ein Unternehmen mögliche Wandlungstreiber vor ihrem Eintreten identifizieren. Zu diesem Zweck muss das im Unternehmen verteilte Wissen um interne und externe Wandlungstreiber erfasst und analysiert werden. Die externen Wandlungstreiber werden gemäß (Wiendahl & Reichardt et al. 2014) in die Kategorien Technologie, Markt und Umwelt eingeordnet. Dies kann beispielsweise die Entwicklung eines neuen Fertigungsverfahrens in der Kategorie Technologie oder der Eintritt eines neuen Wettbewerbers in der Kategorie Markt sein. Die internen Wandlungstreiber werden in die Kategorien strategische Ziele und Schwachstellen eingeteilt. Beispiel für einen internen Wandlungstreiber der Kategorie strategische Ziele ist die Entscheidung über die Erlangung einer Kostenführerschaft. Ein wandlungsfähiges Unternehmen reagiert auf den Eintritt eines Wandlungstreibers mit einer Veränderung.

2.1.2.2 Wandlungsobjekt

In der Literatur zur Wandlungsfähigkeit in produzierenden Unternehmen werden alle Ebenen vom globalen Produktionsnetzwerk (Lanza & Moser 2012) bis zur Montagestation (Kluge 2011) betrachtet. Der Bereich, welcher von einer Wandlung betroffen ist, wird als Wandlungsobjekt bezeichnet (Hernández Morales 2002). Jedes Wandlungsobjekt lässt sich einer der fünf Systemebenen (1) Globales Umfeld/ Fabrikumfeld, (2) Fabrikbereich, (3) Produktions- und Logistikbereich, (4) Fertigungs-, Montage- und Logistiksystem oder (5) Arbeitsstation zuordnen. Weiterhin unterscheidet (Hernández Morales 2002) in Wandlungsobjekte erster und zweiter Ordnung. So kann beispielweise eine Pressstation ein Wandlungsobjekt erster Ordnung auf Ebene der Arbeitsstation sein. Das Presswerkzeug wäre in diesem Fall ein Wandlungsobjekt zweiter Ordnung. Auf einer globalen Betrachtungsebene kann auch eine Fabrik im Ganzen als Wandlungsobjekt erster Ordnung betrachtet werden.

2.1.2.3 Wandlungsbefähiger

Um auf den Eintritt eines Wandlungstreibers zu reagieren, also wandlungsfähig zu sein, muss ein Unternehmen gewisse Eigenschaften aufweisen. Diese Eigenschaften werden als Wandlungsbefähiger bezeichnet (Wiendahl & Reichardt et al. 2014). Der Begriff Wandlungsbefähiger wurde zuerst in (Hernández Morales 2002) verwendet. Ein Wandlungsbefähiger wird definiert, als die Eigenschaft eines Wandlungsobjekts, einen Wandel durchführen zu können. Sind die durch den Eintritt eines Wandlungstreibers unter Wandlungsdruck gestellten Wandlungsobjekte mit den richtigen Wandlungsbefähigern ausgestattet, kann ein erfolgreicher Wandel vollzogen werden. (Hernández Morales 2002) definiert die drei wandlungsfördernden Systemeigenschaften Dynamik, Komplexität und Vernetztheit. Diesen drei Systemeigenschaften ordnet (Hernández Morales 2002) jeweils zwei grundlegende Wandlungsbefähiger zu. Die Mobilität sowie die Erweiter- und Reduzierbarkeit sind der Dynamik zugeordnet. Zur Komplexität gehören die Wandlungsbefähiger Modularität sowie Funktions- und Nutzungsneutralität. Der Vernetztheit sind die Vernetzungsfähigkeit und die Desintegrations- und Integrationsfähigkeit zugeordnet.

Die grundlegenden sechs Wandlungsbefähiger werden in (Wiendahl & Reichardt et al. 2014) zu fünf Wandlungsbefähigern aggregiert. Diese werden als Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit werden die Wandlungstreiber nach (Wiendahl & Reichardt et al. 2014) verwendet, welche in Abbildung 2.3 abgebildet und im Folgenden näher beschrieben sind.



Abbildung 2.3: Wandlungsbefähiger nach (Wiendahl & Reichardt et al. 2014)

Der Wandlungsbefähiger *Skalierbarkeit* bezieht sich auf die technische, räumliche und personelle Ebene. Ein skalierbares Wandlungsobjekt lässt sich innerhalb einer oder mehrerer dieser Ebenen mit geringem Aufwand erweitern und reduzieren. Ein Beispiel für technische Skalierbarkeit ist beispielsweise eine Schraubstation, deren Automatisierungsgrad sich zwischen einer manuellen und einer vollautomatisierten Ausprägung

über mehrere Abstufungen skalieren lässt. Eine U-Linie in der je nach Anforderung unterschiedlich viele Werker arbeiten können, ist ein Beispiel für personelle Skalierbarkeit.

Ist ein Wandlungsobjekt mit *Modularität* ausgestattet, besteht es aus einem oder mehreren Modulen, welche für sich abgeschlossene Funktionen beinhalten. Ein fahrerloses Transportsystem besitzt beispielsweise eine hohe Modularität, da es die klar abgegrenzte Funktion des Transports einzelner Güter hat und keine physischen Schnittstellen zur Außenwelt aufweist. Ein hoch integrierter Montageautomat, welcher mehrere Montageschritte beinhaltet, weist hingegen eine geringe Modularität auf. Die einzelnen Funktionen können nicht ohne einen hohen Aufwand voneinander getrennt werden, da sie sowohl durch physische als auch softwareseitige Abhängigkeiten miteinander verwoben sind.

Ein Wandlungsobjekt, welches den Wandlungsbefähiger *Mobilität* beinhaltet, besitzt eine örtlich weitgehend uneingeschränkte Beweglichkeit. Beispiele für Wandlungsobjekte mit einer hohen Mobilität sind beispielsweise Arbeitsstationen, welche auf einem Hubwagen verschoben werden können oder sogar eigene Rollen besitzen.

Der Wandlungsbefähiger *Kompatibilität* bezieht sich auf die Schnittstellen eines Wandlungsobjekts. Zu den Schnittstellen zählen Material, Information, Medien und Energie. Zu einer hohen Kompatibilität gehören sowohl eine möglichst niedrige Anzahl externer Schnittstellen als auch die Verwendung standardisierter Schnittstellen. Dieser Wandlungsbefähiger lässt sich am Beispiel eines Montageautomaten erläutern. Ein Montageautomat mit eigenen Druckluftanschlüssen für jede Achse und jeden Greifer, sowie einer seriellen Programmierschnittstelle und einem Ethernet-Anschluss an den Feldbus, besitzt eine geringe Kompatibilität. Wohingegen ein Montageautomat, der einen gesammelten Druckluftanschluss intern verteilt und eine einheitliche REST-Schnittstelle über Ethernet anbietet, im Vergleich eine hohe Kompatibilität aufweist.

Die *Universalität* befähigt Wandlungsobjekte dazu, für verschiedene Anforderungen genutzt werden zu können. Beispielsweise besitzt ein Industrieroboter eine höhere Universalität als ein integriertes Portal aus Linearachsen, da er für einen größeren Einsatzbereich geeignet ist.

2.1.2.4 Skalierungsmechanismen

In der vorliegenden Arbeit wird ein Schwerpunkt auf den Wandlungsbefähiger Skalierbarkeit gelegt. Dieser Aspekt wird im Folgenden näher untersucht. In (Eilers 2015) werden konkrete Skalierungsstrategien und -mechanismen definiert, welche sich auf die Systemebenen Fertigungs-, Montage- und Logistiksystem sowie Arbeitsstation beziehen. Wandlungsobjekte mit einer hohen Skalierbarkeit können mittels der Skalierungsmechanismen auf einen Wandlungsdruck reagieren. (Eilers 2015) definiert die vier Skalierungsstrategien „Installation von zusätzlichen Systemabschnitten“, „Systeminterne Skalierung eines Systemabschnitts“, „Verlagerung von Montageumfängen in separate Vormontage“ und „Erhöhung der Systemnutzungszeit“. Für die Skalierungsstrategie „Systeminterne Skalierung“ werden vier Skalierungsmechanismen definiert. Diese beinhalten die „Skalierung durch Einbringung zusätzlicher Mitarbeiter“, „Seriellles Einbringen zusätzlicher Montagestationen“, „Parallelisierung/Duplizierung von Engpässen“ sowie die „Stufenweise Anpassung des Automatisierungsgrads“. In dieser Arbeit wird ein besonderer Fokus auf den Skalierungsmechanismus „Stufenweise Anpassung des Automatisierungsgrads“ gelegt.

2.1.2.5 Wandlungspotenzialwertanalyse

Das Ausmaß der Wandlungsfähigkeit eines Wandlungsobjekts ist nicht direkt quantifizierbar. In einem Wandlungsobjekt können sich mehrere Wandlungsbefähiger überlagern, deren Auswirkungen einen ungewissen Einfluss auf die allgemeine Wandlungsfähigkeit des Wandlungsobjekts haben. In (Heger 2007) wird mit der Wandlungspotenzialwertanalyse eine Methode beschrieben, mit der sich das quantitative Wandlungspotenzial eines Wandlungsobjekts definieren lässt. Der Wandlungspotenzialwert ermöglicht die Vergleichbarkeit der Wandlungsfähigkeit unterschiedlicher Wandlungsobjekte. Um eine detaillierte Bewertung zu ermöglichen, untergliedert (Heger 2007) die fünf in Unterkapitel 2.1.2.3 beschriebenen Wandlungsbefähiger in spezifische Unterkategorien. Bei der Analyse eines Wandlungsobjekts wird für jede der Unterkategorien ein Erfüllungsgrad abgeschätzt. Aus der Aggregation der einzelnen Abschätzungen wird der Wandlungspotenzialwert des Wandlungsobjekts abgeleitet. Dieser Wert gibt den Anteil an, zu dem das Wandlungsobjekt die maximal mögliche Wandlungsfähigkeit erreicht.

2.1.2.6 Wandlungskosten

Ein wesentliches Ziel der Einstellung einer hohen Wandlungsfähigkeit ist die Minimierung der Kosten, welche bei der Durchführung einer Wandlung entstehen. Mit entsprechendem finanziellem Aufwand ist eine Wandlung für gewöhnlich auch bei einem niedrigen Wandlungspotenzialwert durchführbar. Wandlungen von Wandlungsobjekten mit einem hohen Wandlungspotenzialwert resultieren jedoch in geringeren Kosten. Die Wandlungskosten (Abbildung 2.4) werden in die drei Blöcke Wandlungsobjektkosten, direkte Wandlungsprozesskosten und indirekte Wandlungsprozesskosten untergliedert (Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007). Die Wandlungsobjektkosten beinhalten alle Kosten, die unmittelbar mit der Anschaffung, bzw. der Entsorgung des Wandlungsobjekts verknüpft sind. Dazu gehört der Auf- und Abbau von Peripherie, welche zum Betrieb des Wandlungsobjekts benötigt werden. Ebenso gehen außerordentliche Abschreibungen, welche durch die Entsorgung nicht abgeschriebener Betriebsmittel entstehen in diesen Block ein. Zusätzlich beinhalten die Wandlungsobjektkosten die Transaktionskosten, welche beim Erwerb, bzw. Verkauf der Betriebsmittel entstehen. Die direkten Wandlungsprozesskosten umfassen all jene Kosten, welche durch den eigentlichen Prozess der Wandlung entstehen. Dazu gehören sowohl die Lohnkosten für Monteure bei Auf- und Abbau des Wandlungsobjekts, als auch die Kosten für die Wiederherstellung der Prozessfähigkeit von Betriebsmitteln. Die indirekten Wandlungsprozesskosten umfassen die Kosten, welche aus dem Stillstand des Produktionssystems während der Dauer der Wandlung entstehen. Dazu gehören ggf. Opportunitätskosten aus verpassten Verkäufen, als auch die Anlagenkosten, welche während dem Stillstand entstehen.

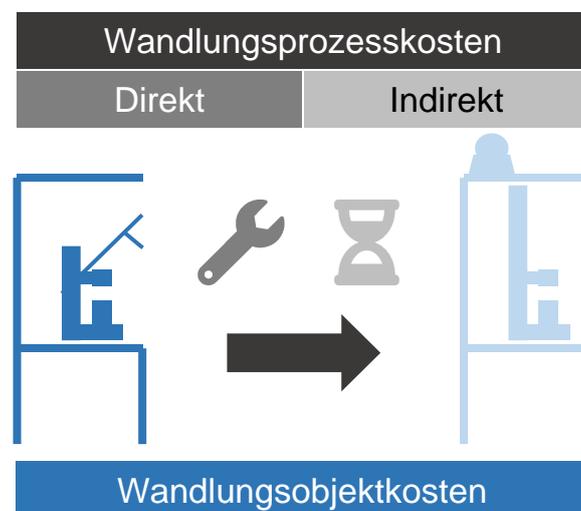


Abbildung 2.4: Blöcke der Wandlungskosten

2.1.2.7 Rezeptor-Theorie

Der Wandlungsdruck, den ein Wandlungstreiber auf Wandlungsobjekte im Unternehmen ausübt, ist nur schwer zu charakterisieren. Einen Ansatz zur Lösung dieses Problems bietet die Einführung von Rezeptoren (Cisek & Habicht et al. 2002). Rezeptoren wirken als Sinnesorgane des Produktionssystems, nehmen die Wandlungstreiber wahr und überführen sie in einen konkreten Wandlungsdruck. Diese Formalisierung ermöglicht es, Auswirkungen auf das Produktionssystem anhand einer begrenzten Anzahl Rezeptoren zu definieren. Wenn ein Wandlungstreiber auf keinen Rezeptor des Produktionssystems einen Reiz ausübt, erzeugt er auch keinen Wandlungsdruck. In (Möller 2008) werden die sechs Rezeptoren eines Produktionssystems beschrieben.

Der Rezeptor *Produkt* beschreibt die produktseitigen Anforderungen an die Produktion, hinsichtlich Funktion und Eigenschaften. Diese umfassen beispielsweise geometrische Abmessungen, Varianten und Werkstoffe.

Die *Stückzahl* nimmt die Kundennachfrage auf und gibt sie als Anforderung an die Produktion weiter.

Durch die *Zeit* werden die Kundenanforderungen hinsichtlich eines zu erfüllenden Bedarfszeitpunkts an das Produktionssystem weitergegeben. Der Rezeptor kanalisiert die geforderten Lieferzeitpunkte des Kunden und erzeugt im Produktionssystem den Druck, entsprechende Durchlaufzeiten zu erreichen.

Der Rezeptor *Kosten* überträgt die Reize, welche sich durch Änderungen der Preise von Produktionsfaktoren ergeben. Beim Überschreiten einer Schwelle, beispielsweise eines bestimmten Lohnkostenniveaus, wird ein Wandlungsdruck in Richtung Automatisierung erzeugt. Der Anstieg von Rohstoffpreisen kann den Wandlungsdruck in Richtung der Verwendung alternativer Rohstoffe erzeugen.

Die *Qualität* gibt die Anforderungen hinsichtlich zu erfüllender Qualitätsanforderungen vom Kunden an das Produktionssystem weiter. Der Rezeptor kann sowohl Präzisions- und Maßanforderungen, als auch Dokumentationspflichten übertragen.

Der Rezeptor *Technologie* beschreibt die zur Verfügung stehenden Mittel des Produktionssystems. Diese können beispielsweise durch die Erfindung bzw. Zulassung eines neuen Fertigungsprozesses erweitert werden und so einen Wandlungsdruck zur Nut-

zung dieser Technologie erzeugen. Andererseits können durch den Rezeptor Einschränkungen der zur Verfügung stehenden Mittel transportiert werden. Ein Beispiel hierfür ist die Verschärfung gesetzlicher Vorschriften.

2.2 Markovsche Entscheidungsprobleme

In der vorliegenden Arbeit wird die Frage untersucht, welche Konfiguration eines Montagesystems unter Berücksichtigung von Wandlungstreibern, zu welchem Zeitpunkt gewählt werden muss, um das Montagesystem kostenminimal zu betreiben. Über einen endlichen Horizont steht der Planer zu diskreten Zeitpunkten mehrfach vor der Entscheidung, ob und wie er sein Montagesystem neu konfigurieren sollte. Im Bereich des Operations Research befasst sich die Entscheidungstheorie mit Situationen, in denen die Erreichung eines Ziels basierend auf Entscheidungen optimiert wird. Die beschriebene Situation lässt sich folglich in den Kontext der Entscheidungstheorie einordnen. In der Literatur ist das Markovsche Entscheidungsproblem (MDP) eine zentrale Formalisierung der Entscheidungstheorie. In (Puterman 2009) wird das elementare sequenzielle MDP wie folgt beschrieben: Ein Entscheider beobachtet zu einem spezifischen Zeitpunkt den Zustand des Systems, in dem er eine Entscheidung treffen muss. Basierend auf seiner Beobachtung trifft er die Entscheidung, eine Aktion durchzuführen. Als Entscheidungsgrundlage steht ihm lediglich die Beobachtung des aktuellen Zustands des Systems zur Verfügung. Insbesondere besitzt er kein Wissen über Entscheidungen, die er in der Vergangenheit getroffen hat. Die Eigenschaft der Gedächtnislosigkeit, welche sich aus dem fehlenden Wissen über vergangene Entscheidungen ergibt, ist ein zentrales Merkmal des MDP. Aus der Aktion resultieren zwei Ergebnisse. Erstens geht das System in einen neuen Zustand über. Zweitens bekommt der Entscheider eine Rückmeldung über die Auswirkungen seiner Aktion in Form einer Belohnung, bzw. entstandener Kosten. Im neuen Zustand steht der Planer vor einem ähnlichen Entscheidungsproblem. Allerdings ist er konfrontiert mit einer veränderten Entscheidungsgrundlage und ggf. anderen wählbaren Aktionen. Die wesentlichen fünf Elemente des Problems sind:

1. Eine Menge Entscheidungszeitpunkte T
2. Eine Menge Systemzustände Z
3. Eine Menge zulässiger Aktionen $A(z)$ in Abhängigkeit des Zustands $z \in Z$
4. Eine Menge Belohnungen oder Kosten $K_z^t(a)$ in Abhängigkeit von Ausgangszustand $z \in Z$ und Aktion $a \in A$

5. Eine Menge Übergangswahrscheinlichkeiten $KM_{z,t}(a)$ in Abhängigkeit von Zustand $z \in Z$ und Aktion $a \in A$

Die eingangs beschriebene Situation eines Produktionsplaners, der rollierend entscheiden muss, ob und wie er das Montagesystem neu konfigurieren sollte, wird in der vorliegenden Arbeit als MDP modelliert (siehe Unterkapitel 4.3.1). Im Folgenden wird daher die Modellierung und Lösung des MDP erläutert.

2.2.1 Modellierung

Erster Schritt bei der Lösung eines MDP ist stets die Modellierung der fünf Elemente des Problems. Im Folgenden werden diese Elemente gemäß (Puterman 2009) erläutert.

2.2.1.1 Entscheidungszeitpunkte und -perioden

Bei der Festlegung der Entscheidungszeitpunkte t werden zwei grundlegende Entscheidungen hinsichtlich der Modellierung des Problems getroffen. Es wird zum einen unterschieden in diskrete und in kontinuierliche Zeitpunkte. Zum anderen wird in Probleme mit unendlichem Zeithorizont und endlichem Zeithorizont unterschieden. In einem Problem mit diskreten Zeitpunkten wird zu jedem Zeitpunkt eine Entscheidung getroffen. In Problemen mit kontinuierlichen Entscheidungszeitpunkten werden die Entscheidungen entweder kontinuierlich oder nur an einzelnen Zeitpunkten getroffen. Die Zeitpunkte werden durch Ereignisse definiert oder an für den Entscheider günstigen Zeitpunkten getroffen. Die Zeit zwischen zwei Entscheidungszeitpunkten wird als Entscheidungsperiode bezeichnet. Bei Problemen mit endlichem, diskretem Zeithorizont wird in der letzten Periode keine Entscheidung mehr getroffen, da diese keine Auswirkung auf einen zukünftigen Zustand hätte.

2.2.1.2 Systemzustände und Aktionen

Zu jedem Entscheidungszeitpunkt t befindet sich das System in einem Zustand z . Die Menge der Zustände Z kann endlich, zählbar unendlich, eine Untermenge des Euklidischen Raumes oder eine nichtleere Borelmenge sein (Puterman 2009, S. 18). In der vorliegenden Arbeit wird von einer endlichen Menge Zustände ausgegangen. Jedem Zustand des Systems ist eine Menge zulässiger Aktionen $a(z)$ zugeordnet. Es ist möglich, dass die Menge der zulässigen Aktionen eines Zustands abhängig vom Entscheidungszeitpunkt ist. Die Aktionen können deterministisch oder zufällig gewählt werden.

2.2.1.3 Belohnungen und Übergangswahrscheinlichkeiten

Aus der Wahl einer Aktion a in einem spezifischen Zustand und zu einem spezifischen Entscheidungszeitpunkt resultieren zwei Dinge. Zum einen erhält der Entscheider eine Belohnung in Abhängigkeit des Zustands z zum Entscheidungszeitpunkt t und der gewählten Aktion $a(z)$. Zum anderen wird durch die Übergangswahrscheinlichkeit der Zustand z_{t+1} des nächsten Entscheidungszeitpunkts $t + 1$ bestimmt. Die Belohnung kann sowohl ein Einkommen oder auch Kosten darstellen. Es ist möglich, dass die Belohnung neben der Aktion und dem Zustand des ursprünglichen Entscheidungszeitpunkts t auch vom Zustand des folgenden Entscheidungszeitpunkts $t + 1$ abhängt.

2.2.2 Lösungsverfahren

Mit der Modellierung des MDP sind die Entscheidungszeitpunkte t definiert, zu denen eine Aktion $a(z)$ gewählt werden muss. Für einen konkreten Entscheidungszeitpunkt t legt eine Entscheidungsregel fest, welche Aktion gewählt wird. Gemäß (Puterman 2009) werden Entscheidungsregeln zum einen nach deterministischen und zufälligen und zum anderen nach vergangenheitsabhängigen und -unabhängigen Regeln unterschieden. In dieser Arbeit werden deterministische, vergangenheitsunabhängige Entscheidungsregeln verwendet. Diese ordnen einem Zustand in einem spezifischen Entscheidungszeitpunkt eine eindeutige Aktion zu. Eine vergangenheitsabhängige Entscheidungsregel bezieht die Historie aus Aktionen und Zuständen mit in ihre Entscheidung ein. Eine zufällige Entscheidungsregel besteht aus einer Zufallsverteilung für die Wahl einer Aktion. Die Lösung eines MDP besteht aus der Gesamtheit der Entscheidungsregeln des Systems und wird Politik, bzw. Strategie SKS genannt. Im Folgenden wird der Begriff Strategie verwendet. Eine Strategie, die aus deterministischen, vergangenheitsunabhängigen Entscheidungsregeln besteht, legt für jeden Entscheidungszeitpunkt des Systems eine eindeutige Aktion fest. Es existieren verschiedene Ansätze zur Ermittlung einer optimalen Strategie. Die Optimalität wird durch die Belohnung des Entscheiders bewertet. Für die Berechnung der Strategie wird die Wertfunktion $gk_z^{t,SKS}$ definiert, welche den Wert eines Zustands z für den Entscheider in Abhängigkeit einer Strategie SKS angibt. Der Wert resultiert aus der Summe der erwarteten Belohnungen, ausgehend vom betrachteten Zustand, bei Anwendung der Strategie. Die Wertfunktion $gk_z^{t,SKS}$ kann auf die Aktionsfunktion $gk_z^t(a)$ erweitert werden, welche eine Funktion aus Zustand und Aktion ist. Die Aktionsfunktion gibt den erwarteten Wert des Zustands an,

unter der Bedingung, dass zunächst die spezifizizierte Aktion und in den folgenden Entscheidungszeitpunkten stets die optimale Aktion gewählt werden. Die Wertfunktion gk_z^{t,SKS^*} eines Zustands z und der optimalen Strategie SKS^* liefert den gleichen Wert, wie das Maximum der Aktionsfunktion des Zustands z aus allen zulässigen Aktionen A (siehe Formel 2-1).

$$gk_z^{t,SKS^*} = \max(gk_z^t(a)), \forall a \in A \quad 2-1$$

Für die optimale Aktionsfunktion $gk_z^t(a^*)$ gilt die rekursive Definition der Bellman-Gleichung (siehe Formel 2-2). Die Bellman-Gleichung besagt, dass die optimale Aktionsfunktion gleich der Belohnung $K_z^t(a^*)$ durch die spezifizizierte Aktion im nächsten Entscheidungszeitpunkt addiert um die Wertfunktion ab dem folgenden Entscheidungszeitpunkt $t + 1$ unter Nutzung der optimalen Strategie ist. Wenn also die optimale Strategie ausgehend von einem Entscheidungszeitpunkt bekannt ist, ist die optimale Entscheidung im vorangehenden Entscheidungszeitpunkt Teil der optimalen Strategie. Auf dieser Voraussetzung baut die rekursive Lösung des MDP auf.

$$gk_z^t(a^*) = K_z^t(a^*) + gk_{z'}^{t+1,SKS^*} \quad 2-2$$

Verfahren zur analytischen Lösung des MDP bauen auf der Bellman-Gleichung auf. In der Literatur existieren zwei unterschiedliche Verfahren, welche jeweils eine optimale Lösung des MDP garantieren. Die Berechnung der optimalen Wertfunktion mit der Werte-Iteration (Unterkapitel 2.2.2.1) und der Politik-Iteration (Unterkapitel 2.2.2.2) basieren auf der Anwendung der Bellman-Gleichung. In (Howard & Matheson 1972) und (Littman & Dean et al. 1995) werden jeweils die Werte- und die Politik-Iteration anhand von Beispielen erläutert. Im Folgenden werden die beiden Verfahren basierend auf (Howard & Matheson 1972; Littman & Dean et al. 1995) beschrieben.

2.2.2.1 Werte-Iteration

Die Werte-Iteration wird mit zufälligen Werten für die Wertefunktionen aller Zustände initialisiert. Die einzelnen Wertefunktionen werden iterativ verbessert, in dem in jeder Iteration für jeden Zustand alle zulässigen Aktionen ausgewertet und die optimale Aktion unter Berücksichtigung der aktuellen Wertefunktion gewählt wird. Als Abbruchkriterium wird ein Schwellwert für die Erhöhung der Werte in der Wertefunktion gewählt. Kann keine weitere Erhöhung der Wertefunktion erreicht werden, wird die optimale

Strategie mittels der Bellmann Gleichung ausgewertet. Das Verfahren ermittelt die optimale Strategie.

Bei einer vollständigen Berechnung der optimalen Strategie mittels der Werte-Iteration kann eine Rückwärtsinduktion angewendet werden. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt. Dabei werden zunächst die optimalen Wertefunktionen gk_z^{T,SKS^*} aller Zustände im letzten Entscheidungszeitpunkt t^{max} berechnet. Für diese Berechnung wird lediglich eine Iteration benötigt, da kein Übergang in einen neuen Zustand stattfindet. Mithilfe der Bellman-Gleichung können für den Entscheidungszeitpunkt $T - 1$ für alle Zustände die optimale Aktionsfunktion berechnet werden. Somit sind über Formel 2-1 auch die optimalen Wertefunktionen gk_z^{T-1,SKS^*} der Zustände im Entscheidungszeitpunkt $T - 1$ bekannt. Ebenso ist durch Auswertung der optimalen Aktionsfunktionen auch die optimale Strategie SKS^* ausgehend vom Entscheidungszeitpunkt $T - 1$ bekannt. In den weiteren Iterationen wird die optimale Strategie ausgehend vom letzten Entscheidungszeitpunkt bis zum ersten Entscheidungszeitpunkt ermittelt.

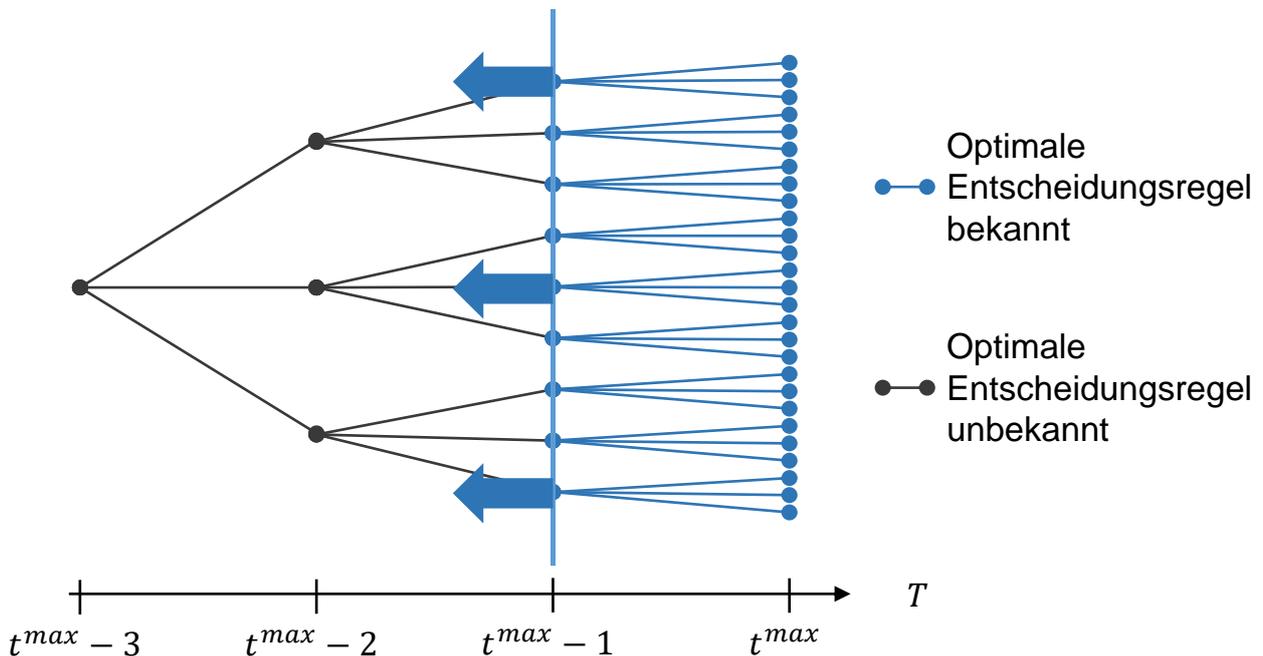


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Werte-Iteration durch Rückwärtsinduktion

2.2.2.2 Politik-Iteration

Die Politik-Iteration startet mit einer zufälligen Strategie und besteht aus zwei alternierenden Schritten. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt. Im ersten Schritt wird für die aktuelle Strategie die resultierende Summe der Belohnungen

des Entscheiders berechnet. Im zweiten Schritt wird versucht, eine alternative Strategie zu finden, die zu einer verbesserten Belohnung führt. Ist dies der Fall, wird die Strategie entsprechend angepasst und mit dem ersten Schritt fortgefahren. Unterschreitet die letzte Verbesserung einen Schwellwert, wird der Algorithmus abgebrochen und die aktuelle Strategie als Lösung ausgegeben. Mit jedem Iterationsschritt wird die Strategie strikt verbessert. Es existieren unterschiedliche Abbruchkriterien um mit dem Verfahren eine vorgegebene Güte zu erreichen. Wird der Schwellwert auf null gesetzt, garantiert der Algorithmus das Finden der optimalen Strategie. Für das Finden einer verbesserten Strategie existieren unterschiedliche Ansätze. So können beispielsweise Änderungen der aktuellen Strategie in jedem Entscheidungszeitpunkt zulässig sein. Alternativ existieren Ansätze, die Änderungen auf lediglich einen Entscheidungszeitpunkt beschränken. Dieser Entscheidungszeitpunkt kann beispielsweise der früheste Zeitpunkt sein, der eine Verbesserung ermöglicht.

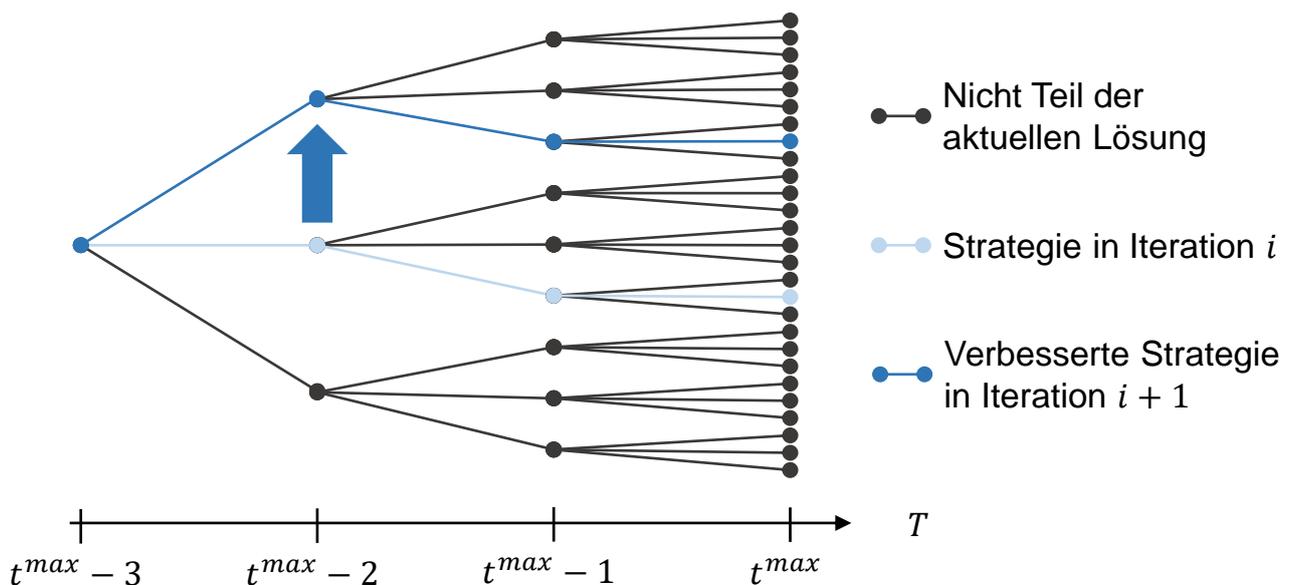


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Politik-Iteration

2.2.2.3 Gegenüberstellung

Sowohl die Werte-Iteration als auch die Politik-Iteration erreichen die optimale Strategie. Bei der Ermittlung einer Näherungslösung erreicht die Politik-Iteration in vielen Fällen schneller die geforderte Lösungsgüte als die Werte-Iteration. Bei vollständiger Berechnung, insbesondere bei Systemen mit einer hohen Anzahl Zustände kommt die Werte-Iteration allerdings mit einer geringeren Rechenzeit zum Ziel als die Politik-Iteration. Aufgrund ihres simplen Aufbaus ist der Implementierungsaufwand einer Werte-Iteration geringer als jener einer Politik-Iteration. In der vorliegenden Arbeit wird die

Rückwärts-Induktion mittels Werte-Iteration zur Lösung des MDP genutzt (siehe Unterkapitel 4.3.2). Falls eine vollständige Berechnung des MDP aufgrund zeitlicher Beschränkungen nicht möglich ist, muss ein heuristisches Lösungsverfahren gewählt werden. Insbesondere im Kontext des maschinellen Lernens wurde eine Vielzahl neuer Lösungsverfahren auf das MDP angewendet. Aufgrund der Anwendung in der Grobplanung stellt der Ansatz in der vorliegenden Arbeit keine speziellen Anforderungen an eine niedrige Berechnungsdauer des MDP. Daher werden heuristische Verfahren an dieser Stelle nicht näher betrachtet.

3 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung im Bereich der Planung wandlungsfähiger Produktion analysiert. Unterkapitel 3.1 gibt einen Überblick anerkannter Methoden der Montageplanung im Allgemeinen. Methoden zur Planung wandlungsfähiger Fabriken werden in Unterkapitel 3.2 behandelt. Diese Methoden beinhalten wesentliche Vorarbeiten für die Methoden zur Planung wandlungsfähiger Montagelinien, welche in Unterkapitel 3.3 zusammengefasst werden. Abschließend werden die Methoden zur Planung wandlungsfähiger Montagelinien mit der in Unterkapitel 1.2 formulierten Zielstellung abgeglichen. Es resultiert ein Forschungsdefizit, welches in Kapitel 4 adressiert wird.

3.1 Montageplanung

In der Montageplanung existieren einige wesentliche klassische Verfahren, deren grundlegende Struktur ähnlich und bis heute in teilweise abgewandelter Form Verwendung finden.

Die Planungsmethode nach Bullinger (Bullinger 1986) gliedert sich in sechs Planungsphasen: Konzeption, Ablaufplanung, Montagesystementwurf, Ausarbeitung, Realisierung und Betrieb. Die Projektorganisation und Dokumentation wird dabei besonders betont.

Die Vorgehensweise von Eversheim (Eversheim 1989) gliedert sich in die Phasen Ist-Analyse und Beschreibung der Montageaufgabe, Montageuntergliederung in Teilbereiche, Aufbau des Gesamtsystems, Detaillierung von Montageablauf und Betriebsmittelbedarf sowie die weitere Optimierung.

Lotter (Lotter 1992) gliedert die Montagesystemplanung in elf Schritte: Anforderungsliste, Produktanalyse, Montageablaufanalyse, Funktionsanalyse, Taktzeitermittlung, Layoutplanung, Personalbedarfsbestimmung, Verfügbarkeitsermittlung, Pflichtenheft, Investitionsrechnung, Bewertung und Auswahl. Als Ergänzung zum klassischen Planungsansatz führt Lotter die sogenannte absatzsynchrone Montageplanung ein (Lotter & Wiendahl 2006). Dabei werden stückzahlenflexible Lösungsalternativen geplant, die an den Stückzahlenverlauf der zu montierenden Produkte angepasst werden können. Basierend auf prognostizierten Stückzahlenentwicklungen werden Grund-, Zwischen- und Endausbaustufen des Montagesystems geplant, die zusammen den gesamten

prognostizierten Stückzahlenbereich abdecken. Die verschiedenen Ausbaustufen unterscheiden sich in ihrem Automatisierungsgrad und in der Anzahl der Montagestationen.

Konold und Reger (Konold & Reger 2003) gliedern den Montageplanungsprozess in fünf Stufen. Zunächst wird die Aufgabenstellung definiert und anschließend eine Grob- und Feinplanung durchgeführt. Die letzten beiden Planungsstufen bilden die Realisierung des Montagesystems und der Fertigungsanlauf.

Im Allgemeinen lassen sich die Schritte aller Ansätze der klassischen Fabrikplanung in die vier Phasen Analyse, Grobplanung, Feinplanung und Realisierung einordnen.

3.2 Planung wandlungsfähiger Fabriken

Etwa seit Mitte der 1990er Jahre ist der Begriff der Wandlungsfähigkeit ein fester Bestandteil von Publikationen zum Thema Produktionsorganisation. Einflüsse aus steigender Produktvielfalt, schwankenden Stückzahlentwicklungen und generell unsicheren Einflussfaktoren erfordern eine Wandlungsfähigkeit von Unternehmen, um auf diese Einflüsse zu reagieren. Hernandez (Hernández Morales 2002) stellt eine grundlegende Abgrenzung der Begriffe Flexibilität und Wandlungsfähigkeit auf Fabrikebene bereit (vgl. Unterkapitel 2.1). Dieses systematische Verständnis überführt Hernandez schließlich in eine Anpassung von Fabrikplanungsmethoden. Dabei bezieht er sich auf das Verfahren von Eversheim (Eversheim 1989). Wesentlicher Teil seiner Methode ist eine Szenarioanalyse mit dem Ziel der Identifikation der in der Fabrik erforderlichen Wandlungsfähigkeit in Bezug auf einzelne Wandlungsobjekte. Ergebnis der Methode stellt ein Anforderungskatalog der zu nutzenden Wandlungsbefähiger dar.

Basierend auf den Arbeiten von Hernandez entwickelte Heger (Heger 2007) die Idee der Wandlungsbefähiger weiter. Ergebnis seiner Überlegungen ist die Wandlungspotenzialwertanalyse, welche Fabrikobjekte in detaillierten Kategorien aufbauend auf den Wandlungsbefähigern von Hernandez bewertet (vgl. Unterkapitel 2.1.2). Mit dem Wandlungspotenzialwert wird eine konkrete Kennzahl für die Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten definiert.

Als Wandlungstreiber kommt eine große Zahl möglicher Einflüsse in Frage. Es ist daher eine komplexe Aufgabe die für eine Produktionsaufgabe relevanten Wandlungstreiber zu identifizieren. Es gibt keine Garantie für eine vollständige Erfassung aller Wandlungstreiber. Cisek (Cisek & Habicht et al. 2002; Cisek 2005) stellt ein Modell vor, in

dem die Produktion durch Rezeptoren mit seinem volatilen Umfeld verbunden ist (vgl. Unterkapitel 2.1.2.7). Kern der Überlegung ist, dass verschiedener Wandlungstreiber oft dieselben Einflüsse auf die Produktion haben. Dem Modell zufolge wirken Wandlungstreiber ausschließlich über die Rezeptoren Produkt bzw. Produktvarianten, Kosten, Zeit, Stückzahl und Qualität auf die Fabrik.

Bereits 2003 stellen Witte & Vielhaber (Witte & Vielhaber 2003) eine vollständige Fabrikplanungsmethode als Leitfaden zur Konzeption zukunftsstabiler Montagesysteme vor. Das Vorgehen orientiert sich in seiner Struktur an den klassischen Fabrikplanungsmethoden, wie sie in Unterkapitel 3.1 vorgestellt werden. Die wesentlichen Anpassungen durch Witte & Vielhaber beziehen sich auf eine Szenarioanalyse der Wandlungstreiber und eine prozessbegleitende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über den Lebenszyklus des Montagesystems. Im Zuge der Szenarioanalyse werden Veränderungen in der Kostenstruktur (Personal-, Energie- und Flächenkosten sowie die Zinsentwicklung), in der nachgefragten Stückzahl und im Produkt berücksichtigt. Bei der Vorhersage dieser Veränderungen wird mit einem Szenariotrichter aus optimistischem, wahrscheinlichem und pessimistischem Verlauf gerechnet. Die wirtschaftliche Betrachtung umfasst die Bewertung von Montagesystemalternativen über den Lebenszyklus. Dazu werden die Einflüsse durch die beschriebenen Szenarien berücksichtigt.

Bei Witte & Vielhabers Bewertung der Montagesystemalternativen wird die Unsicherheit hinsichtlich des tatsächlichen Eintretens der Wandlungsbefähiger durch drei diskrete Szenarien berücksichtigt. Letztlich wird auf diese Weise dreimal ein flexibles Montagesystem unter einer sicheren Zukunft bewertet. Somit wird nur ein kleiner Teil der möglichen Szenarien berücksichtigt. Die Methode von Möller (Möller 2008) setzt an dieser Stelle an und überträgt das Realloptionsverfahren aus der Finanzwirtschaft auf die monetäre Bewertung von Montagesystemalternativen. Dabei wird insbesondere der Wert der Anpassungsfähigkeit quantifiziert und somit der Nutzen der Wandlungsfähigkeit der verschiedenen Lösungsalternativen verdeutlicht. Um die Verknüpfung zwischen Wandlungstreibern und Montagesystem darzustellen, bezieht sich Möller auf die durch (Cisek & Habicht et al. 2002) eingeführten Rezeptoren und erweitert diese um den Rezeptor Technologie. Die iterative Bewertungsmethode ist zwischen einer Modellierungs- und Analysephase eingebettet und besteht im Wesentlichen aus drei Stufen. Dabei nehmen die Bewertungsgenauigkeit und der Bewertungsaufwand stufenweise zu. Die Investition in eine Montagesystemalternative bezeichnet Möller als Projekt. Die

Projektlaufzeit bezeichnet in diesem Kontext die Dauer während der das Montagesystem betrieben wird. In der ersten Stufe wird zunächst ein passives Montagesystem – d.h. ein nicht an ungeplante zukünftige Entwicklungen anpassbares System – in einer sicheren Umwelt betrachtet. Die zweite Bewertungsstufe dient der Untersuchung eines passiven Systems in einer dynamischen Umwelt. Hier findet eine Vorauswahl zu bewertender Realoptionen statt. Die eigentliche Bewertung der Realoptionen erfolgt in der dritten Stufe. Hierfür wird die Annahme eines passiven Produktionssystems aufgehoben. Es wird nun angenommen, dass das Produktionssystem aktiv während der Projektlaufzeit angepasst werden kann. Mit Hilfe der Realoptionen wird eine aktive Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung während der Projektlaufzeit berücksichtigt. Die in der zweiten Bewertungsstufe identifizierten Realoptionen werden entsprechend ihrer Rangfolge nacheinander wirtschaftlich bewertet. Nach Berücksichtigung aller Realoptionen, wird aus den verbleibenden Produktionssystemalternativen die optimale Lösung anhand des durch Möller definierten „erweiterten Kapitalwerts“ ausgewählt.

Klemke (Klemke 2014) schließt mit seinem Ansatz an die Arbeiten von Hernandez und Heger an. Bei der Betrachtung der Veränderungsfähigkeit ganzer Fabriken identifiziert er die fehlende Berücksichtigung des Personals als Defizit der Ansätze von Hernandez und Heger. Ziel seiner Methode ist die detaillierte Identifikation von Veränderungstreibern und die Ableitung geeigneter Maßnahmen zur zielgerichteten Anpassung der Wandlungsfähigkeit einer Fabrik. In seinem Systemverständnis orientiert sich Klemke stark an dem Regelkreismodell von Pachow-Frauenhofer (siehe Absatz 3.3). Die Methode gliedert sich auf in ein Wandlungsmonitoring und eine Wandlungsfähigkeitsbewertung inklusive der Ableitung von Potenzialen zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit.

Die Ursache für mangelnde Veränderungsfähigkeit sieht Lübke (Lübke 2016) in der Fabrikstruktur. Aufbauend auf dem Systemverständnis der Veränderungsfähigkeit von Hernandez, Heger, Pachow-Frauenhofer und Klemke entwickelt er eine Methode zur Beschreibung von Fabrikstrukturkonfigurationen sowie ein darauf aufbauendes Vorgehensmodell zur Analyse der Auswirkungen von unternehmensinternen und -externen Veränderungstreibern. Die Methode ermöglicht eine Aussage über die Notwendigkeit der Anpassung einer Fabrikstruktur aufgrund einer Veränderung.

3.3 Planung wandlungsfähiger Montagelinien

Die in Absatz 3.2 beschriebenen Ansätze befassen sich mit der Wandlungsfähigkeit auf eine gesamte Fabrik bezogen. Die Planungs- und Bewertungsmethoden bleiben an vielen Stellen generisch und befassen sich nicht mit konkreten Ausprägungen von Montagesystemen oder Stationen auf einer technischen Ebene. Loferer (Loferer 2002) beschreibt einen technischen Ansatz zur rechnergestützten Planung von Montagekomponenten. Der Ansatz bietet die Möglichkeit, Komponenten, wie bspw. eine Linearachse oder ein Teilemagazin zu modularen Stationen zu kombinieren. Dabei bedient sich Loferer der Beschreibung von Montageaufgaben nach der VDI 2860 (VDI 1990). In der rechnergestützten Planung werden basierend auf der Beschreibung der Aufgaben entsprechende Module zu einer Montagestation kombiniert. Der Wandlungsfähigkeit wird in diesem Fall Rechnung getragen, indem Montageaufgaben durch verschiedene Module erledigt werden können. So kann während der Planungsphase auf Produkt-, Varianten- und Stückzahländerungen reagiert werden. Der Ansatz fokussiert ausschließlich die initiale Planungsphase eines Montagesystems. Eine Szenarioanalyse und konkrete Änderungen nach Inbetriebnahme des Montagesystems werden zwar durch den modularen Aufbau begünstigt, aber nicht explizit betrachtet.

Auch Kluge (Kluge 2011) befasst sich in seinem Planungsansatz mit modularen Montagesystemen. Ausgehend von den Arbeiten von Loferer entwickelt Kluge eine Planungsmethode aus Sicht des Montagesystemherstellers. Die modulare Zusammensetzung der Stationen setzt Kluge bereits voraus. Allerdings betrachtet Kluge wie die Ansätze in Absatz 3.2 schon während der Planung die zukünftigen Wandlungstreiber, welche auf das Montagesystem wirken werden. Für sein Vorgehen orientiert sich Kluge an den 4 Schritten der Planungsmethode nach Konold & Reger (vgl. Unterkapitel 3.1). In einem ersten Schritt führt er eine Szenarioanalyse durch. Analog zu früheren Ansätzen bedient sich Kluge in diesem Schritt einem Szenariotrichter, welcher aus optimistischem, pessimistischem und wahrscheinlichem Verlauf aufgespannt wird. Im zweiten Schritt werden analog zum Ansatz von Loferer anhand der VDI 2860, Montageaufgaben geeigneten Montageressourcen zugeordnet. Basierend auf den ursprünglichen Szenarien werden im dritten Schritt bereits während der Grobplanung mehrere Montagesystemalternativen entwickelt. So wird ein Lösungsfeld mehrerer Konfigurationen aufgespannt, welche die Montageaufgaben in Bezug auf die verschiedenen Szenarien optimal erfüllen. Im abschließenden vierten Schritt werden die verschiedenen Konfigu-

rationen in einer kombinierten Systematik aus Systemwert und Kostenbetrachtung bewertet. Dabei werden die in Schritt 3 entwickelten Ausbaustufenfolgen der Konfigurationen über die drei Szenarien (optimistisch, pessimistisch, wahrscheinlich) bewertet und mit der jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeit gewichtet. Zur Umsetzung wird schließlich die Ausbaustufenfolge mit dem höchsten Gesamtwert der Bewertungssystematik empfohlen.

Einen Ansatz mit speziellem Fokus auf die Anpassung an Produkt-, bzw. Variantenänderungen stellt Weyand (Weyand 2010) vor. Bei der Entwicklung seines Ansatzes greift Weyand nicht auf frühere Ansätze aus der Wissenschaft zurück, sondern orientiert sich an dem Planungsvorgehen eines Unternehmens in der Automobilendmontage. Das bestehende Vorgehen ergänzt Weyand um die Schritte der Ressourcenabschätzung, Wiederverwendungsplanung sowie der Volumenflexibilitätsbetrachtung. Wesentliche Ziele der angepassten Methodik sind die gezielte Wiederverwendung von Montageresourcen nach Produktänderungen sowie die Reaktion auf Änderungen im Produktionsvolumen. Bei letzterem Schritt werden die Mechanismen Duplikation, bzw. Rückbau von Stationen, Änderung der Anzahl Mitarbeiter sowie die Anpassung des Automatisierungsgrads berücksichtigt. Weyand erwartet durch die Erhöhung des Automatisierungsgrads grundsätzlich eine Reduzierung der Bearbeitungszeit und somit eine Erhöhung des Produktionsvolumens.

Pachow-Frauenhofer (Pachow-Frauenhofer 2012) entwickelte eine Methode zur Identifikation des wirtschaftlich optimalen Grades der Veränderungsfähigkeit. Sie setzt dabei auf dem Verständnis der Veränderungsfähigkeit als Kombination aus Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Hernandez und Heger auf. Allerdings konzentriert sie sich konkret auf die Bewertung von Montagesystemen im Gegensatz zu einer Betrachtung der gesamten Fabrik. Ergebnis der Methode ist eine Entscheidungsvorlage für den optimalen Grad der Flexibilität als auch der Wandlungsfähigkeit. Dabei gliedert sich die Methode in die vier Phasen Zieldefinition, Analyse, Gestaltung und Bewertung. Kern der Methode ist ein generisches Modell eines Montagesystems als Regelkreis. Dabei sind die Zielgrößen der Montageplanung als Führungsgröße, der Zielerfüllungsgrad als Regeldifferenz und Wandlungstreiber als Störgrößen definiert. Die Regelstrecke ist das veränderungsfähige Montagesystem. Bei Ansteigen der Regeldifferenz, beispielsweise durch steigende Stückkosten ausgelöst durch die Störgröße sinkende Stückzahlen, kann mit einem Regler reagiert werden. Dabei stehen dem System drei Regler zur Ver-

fügung. Zum einen kann die vorhandene Flexibilität genutzt werden, um die Regeldifferenz zu reduzieren. Zum anderen kann eine vorgeplante Wandlung aktiviert werden. Falls beide Maßnahmen nicht ausreichen, muss das System umgeplant werden.

Der Ansatz von Landherr (Landherr 2014) befasst sich ähnlich wie die Arbeiten von Loferer und Kluge mit der Zuordnung von Montageaufgaben zu modularen Montageressourcen. Hierbei fokussiert Landherr die Anpassung des Montagesystems an Produktänderungen. Ziel der Methodik ist nicht die Planung wirtschaftlich optimaler Konfigurationsfolgen, sondern die Minimierung der bei einer Wandlung entstehenden Umbaukosten. Diesen Effekt erreicht Landherr durch eine auf Wandlungsfähigkeit ausgelegte integrierte Betrachtung von Produkt- und Montagekonfiguration. Als Basis der Methodik dient eine Zusammenfassung von Produkt- und Montagesystem zu strukturell, hierarchisch sowie funktional verknüpften Modulen. Das resultierende Modell bezeichnet Landherr als Integriertes Produkt- und Montagesystem (IPS), welches einer an die Arbeit von Pachow-Frauenhofer angelehnten Regelkreislogik folgt. Die Funktionsweise des IPS gliedert sich in drei Phasen. Zunächst werden produktbezogene Wandlungstreiber identifiziert. Im zweiten Schritt kann das virtuelle IPS automatisiert zulässige Produkt- und Montagesystemkonfigurationen erzeugen. Die Bewertung und Auswahl der zulässigen Konfigurationen erfolgt im dritten Schritt.

Die bisher beschriebenen Ansätze befassen sich im Wesentlichen mit mittel- bis langfristigen Anpassungen von Fabriken und Montagesystemen. Neumann (Neumann 2015) fokussiert sich in seinem Ansatz auf kurzfristige Anpassungen im Bereich unter 4 Wochen bis hin zu Anpassungen auf Schichtebene. Um dieses Ziel zu erreichen, entwickelte er eine Methode für die situationsbasierte Adaption von Montagesystemen. Ähnlich des Ansatzes von Klemke gliedert sich die Methode in einen Teil der Identifikation von Wandlungstreibern und einen Teil zur Auswahl der entsprechenden Wandlung auf. Im operativen Fall entsteht Anpassungsbedarf durch kurzfristige Abweichungen von der Normalplanung. Der Fokus der Methodik liegt auf dem zweiten Schritt, der situationsbasierten Adaption. Analog zu den Arbeiten von Landherr unterstützt Neumann die Auswahl der angemessenen Adaption mit einem digitalen Modell der Wirkzusammenhänge des Montagesystems. Anders als Landherr betrachtet Neumann dabei allerdings kurzfristige Änderungen durch eine Änderung der Auftragszusammensetzung, kurzfristige Änderung der Produktvarianten und technische Disruptionen. Den Begriff „technische Disruption“ verwendet Neumann gemäß der Definition von (Warnecke

1991), der technische Disruptionen in interne Störungen und Technologieveränderungen untergliedert. Interne Störungen betreffen organisatorische oder technische Abweichungen. Technologieveränderungen beziehen sich auf die Elimination, Substitution oder Addition von Maschinen- und Anlagenmodulen oder einer Technologie.

In seinem Ansatz zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme entwirft Eilers (Eilers 2015) ein Referenzmodell eines wandlungsfähigen Montagesystems. Teil des Modells ist zum einen eine Strukturierung des Montagesystems in verschiedene Hierarchieebenen, die eine Skalierbarkeit des Systems durch Modularisierung erleichtern soll. Zum anderen definiert Eilers in dem Modell Skalierungs- und Rekonfigurationsmechanismen, mit denen auf Wandlungstreiber reagiert werden kann. Die Skalierungsmechanismen nach Eilers umfassen die Anpassung des Schichtmodells, das Hinzufügen oder Abziehen von Werkern innerhalb einer Schicht, Stationsduplikation, Linienduplikation, Parallelisierung von Prozessen, Anpassung des Automatisierungsgrads sowie die Auslagerung von Arbeitsumfängen in die Vormontage. Die Rekonfiguration untergliedert Eilers in eine Rekonfiguration des Prozess-, Transport- oder Zuführmoduls einer Station sowie eine innermodulare Konfiguration von Prozessmodulen. Eilers berücksichtigt in seiner Methode die Wandlungstreiber Produkt-, Stückzahl- und Montagetechnologieveränderungen. In der Theorie nach Cisek und Möller berücksichtigt er die Rezeptoren Produkt, Stückzahl und Technologie. Die Rezeptoren Zeit, Qualität und Kosten bleiben unberücksichtigt. Im zweiten Teil seines Ansatzes schlägt Eilers eine Methode für die Planung eines wandlungsfähigen Montagesystems vor, die sich seinem Referenzmodell bedient. Die Planungsmethode berücksichtigt eine Skalierungsstrategie, um auf schwankende Stückzahlen oder Produktänderungen zu reagieren. Zunächst wird eine klassische Szenarioanalyse mit Extrem- und Trendszenario durchgeführt. Für diese Szenarien werden für diskrete Stückzahlbereiche Systemlösungen grobgeplant. Dadurch wird der mögliche Lösungsraum verschiedener Systemkonfigurationen stark eingeschränkt. Die optimale Wandlung zwischen den Alternativen wird nur am Rande berücksichtigt. Die Reaktionen auf Stückzahländerungen und Produktänderungen werden getrennt voneinander betrachtet. Weitere Rezeptoren sowie die Überlagerung von Änderungen mehrerer Rezeptoren werden nicht berücksichtigt. Schließlich werden verschiedene Wandlungskonzepte bestehend aus einer Abfolge mehrerer Systemlösungen mittels einer Nutzwertanalyse verglichen. Das Konzept mit dem höchsten Nutzwert wird an die Feinplanung übergeben. Eine Anpassung bei Nichteintreten des erwarteten Szenarios wird nicht berücksichtigt.

Eine Methode um den Produktentwickler oder Anlagen-/ Produktionssystem-/ Montageplaner hinsichtlich der Konfiguration einer qualitätsorientierten multi-use Batteriemontage zu unterstützen, stellt (Sauer 2016) vor. In einer Wissensdatenbank werden Prozesswissen und Montagedaten hinterlegt um dem Planer eine einfache Konfiguration einer Multi-use-Linie zu ermöglichen. Die hinterlegten Daten werden genutzt um ein Simulationsmodell der konfigurierten Montagelinie automatisiert zu erstellen. Anhand des entstandenen Simulationsmodells kann eine multikriterielle Bewertung der Montagelinie hinsichtlich unter anderem der Wandlungsfähigkeit durchgeführt werden.

Die einstufige Wahl des kosteneffizienten Automatisierungsgrads einer Montagelinie wird in (Salmi & David et al. 2016) betrachtet. Im vorgestellten Ansatz werden Produktdaten ausgewertet, um die benötigten Ressourcen einer Montagelinie abzuleiten. Aus der Liste der benötigten Ressourcen werden konkurrierende Lösungen mit abweichenden Automatisierungsgraden gebildet. Unter Berücksichtigung der wesentlichen Kostentreiber werden bereits in einem frühen Stadium die erwarteten Stückkosten des Produktes ermittelt.

In ihrer Methodik zum Design und Management der Wandlungsfähigkeit entwickelt (Benkamoun 2016) in drei Schritten wandlungsfähige Produktionssysteme. Im ersten Schritt wird unter Nutzung geeigneter Techniken eine wandlungsfähige Architektur des Systems entworfen. Im zweiten Schritt werden Wandlungsschritte gezielt vorgeplant und dabei eine Minimierung von Wandlungskosten und -aufwand angestrebt. Der letzte Schritt dient der Vorhersage von Wandlungsszenarios und der Identifikation von Wandlungstreibern sowie dem gezielten „Design for Changeability“.

In seiner Dissertation zur Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme entwickelt (Fisel 2019) am Beispiel der Austaktung in der automobilen Endmontage ein multikriterielles Optimierungsmodell. Unter Berücksichtigung von Kosten, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit berechnet die Methodik eine einstufige Entscheidung hinsichtlich der Fließbandabstimmung für die Präferenz eines Entscheiders. Mit einer gezielten Auswahl der Präferenz des Entscheiders kann auch auf kurzfristige Änderungen reagiert werden.

Ein Tool zur Aufwand- und Nutzenbewertung als Entscheidungsgrundlage stellen (Burggräf & Wagner et al. 2019) in einem Ansatz zur Unterstützung bei multivariablen Automatisierungsentscheidungen vor. Im Kontext einer hohen Frequenz von Umpla-

nungen wird der Ziel-Automatisierungsgrad eines Montagesystems unter den bestehenden Anforderungen berechnet. Auf Betriebsmittelebene wird ein Montagesystem mit dem entsprechenden Ziel-Automatisierungsgrad geplant. Im Zuge der Planung wird eine Betriebsmitteldatenbank aufgebaut, die bei zukünftigen Planungen unterstützt. Die Auswahl der Betriebsmittel für das Montagesystem im Ziel-Automatisierungsgrad richtet sich nach der multivariablen Nutzen-Aufwandsberechnung.

3.4 Ableitung des Forschungsdefizits

Wie in Unterkapitel 1.2 beschrieben, ist es das Ziel der Arbeit, technische Maßnahmen für die Erreichung der optimalen Wandlungsfähigkeit eines Montagesystems abzuleiten. Aus dieser Zielstellung ergeben sich folgende Anforderungen an den zu entwickelnden Ansatz:

- **Bezugsrahmen Montagesystem:** Der Ansatz soll auf Montagesysteme in der variantenreichen Serienproduktion anwendbar sein.
- **Quantitative Erfassung der Unsicherheit und der Volatilität von Einflussfaktoren:** Es wird die Annahme getroffen, dass der optimale Grad der skalierbaren Automatisierung sowohl von dem Maß der Unsicherheit als auch von der erwarteten Volatilität von Einflussfaktoren abhängt. Die erwarteten Einflüsse auf das Montagesystem müssen quantitativ erfasst und prognostiziert werden. Insbesondere die Unsicherheit der Prognose ist quantitativ abzubilden.
- **Systemkonzepte mit skalierbarem Automatisierungsgrad:** Um den optimalen Grad der skalierbaren Automatisierung zu ermitteln, muss der zur Verfügung stehende Lösungsraum bekannt sein. Der Ansatz muss sich mit Systemkonzepten mit skalierbarem Automatisierungsgrad befassen.
- **Skalierungspfade über den gesamten Planungshorizont:** Die anfänglichen Investitionen in ein Montagesystem mit skalierbarem Automatisierungsgrad werden die Investitionen in ein starres System übersteigen. Erst in der Betrachtung über einen längeren Zeitraum zahlt sich eine skalierbare Automatisierung aus. Es muss die zeitliche Abfolge verschiedener Systemkonfigurationen über den Planungshorizont des Montagesystems in der Planung berücksichtigt werden.
- **Kurzfristige Anpassungen:** Ein hoher Grad an skalierbarer Automatisierung ermöglicht eine kostengünstige und schnelle Skalierung des Automatisierungs-

grads. Diese Eigenschaft zahlt sich gegenüber einem starren Ansatz insbesondere bei einer hohen Frequenz der Anpassungen aus. Die Methodik soll hochfrequente Anpassungen des Montagesystems berücksichtigen.

Im Folgenden werden die Ansätze aus dem Stand der Technik in Bezug auf ihre Berücksichtigung der eingeführten Anforderungen untersucht. Wie die Zusammenfassung der bisherigen Ansätze gezeigt hat, existieren viele wesentliche Ansätze im Bereich der Planung wandlungsfähiger Fabriken (vgl. Unterkapitel 3.2). Diese Ansätze betrachten Wandlungsobjekte auf den Systemebenen Fabrikbereich sowie Produktions- und Logistikbereich. Die Methoden lassen sich nicht direkt auf die Systemebenen Fertigungs-, Montage- und Logistiksystem oder Arbeitsstation übertragen, welche in der Planung wandlungsfähiger Montagelinien betrachtet werden. Dennoch bieten diese Ansätze wesentliche Erkenntnisse, die in einer Methodik auf Montagesystemebene berücksichtigt werden sollten. Die Ansätze von Kluge und Loferer liefern wichtige Konzepte für den Aufbau modularer Anlagen, sind aber aufgrund ihres technischen Fokus auf Stationsebene nicht direkt auf die Planung ganzer Montagesysteme übertragbar. Der Ansatz von Weyand ist stark auf den Anwendungsfall der Automobilendmontage zugeschnitten. Eine Anpassung des Automatisierungsgrads wird nur am Rande betrachtet. Die Betrachtung des Montagesystems als Regelkreis durch Pachow-Frauenhofer, Landherr und Neumann bietet relevante Ansätze insbesondere hinsichtlich kurzfristiger Anpassungen. Allerdings fokussieren diese Ansätze im Wesentlichen eine Rekonfiguration des Systems. Eine Betrachtung über den Lebenszyklus des Montagesystems sowie eine explizite Berücksichtigung eines skalierbaren Automatisierungsgrads werden vernachlässigt. Der Ansatz von Eilers bietet wesentliche Vorarbeiten für dieses Vorhaben. Die strukturierte Darstellung der Skalierungsmechanismen und die szenarienbasierte Betrachtung von Wandlungstreibern auf Montagesystemebene sind eine wichtige Voraussetzung. Allerdings bietet der Ansatz insbesondere keine Möglichkeit der Planung eines Systems mit skalierbarem Automatisierungsgrad, da im Wesentlichen starre Systemkonfigurationen und diskrete Automatisierungsgrade vorausgesetzt werden. Sauer, Salmi & David, Benkamoun, Fisel und Burggräf betrachten die Entscheidung für eine wandlungsfähige Konfiguration jeweils auf eine einstufige Entscheidung begrenzt. Skalierungspfade über mehrstufige Entscheidungen werden in diesen Ansätzen nicht berücksichtigt.

Abschließend kann festgestellt werden, dass in den bisherigen Arbeiten kein Ansatz existiert, der alle aus der Zielstellung der vorliegenden Arbeit abgeleiteten Anforderungen erfüllt.

Tabelle 3.1: Stand der Technik

		Bezugsrahmen Montagesystem	Quantitative Erfassung der Unsicherheit und der Volatilität von Einflussfaktoren	Systemkonzepte mit skalierbarem Automatisierungsgrad	Skalierungspfade über den gesamten Planungshorizont	Kurzfristige Anpassungen
Anforderungen						
○ nicht erfüllt						
◐ teilweise erfüllt						
● voll erfüllt						
Montageplanung	Bullinger (1986)	●	○	○	○	○
	Eversheim (1989)	●	○	○	○	○
	Lotter (1992)	●	○	○	○	○
	Konold und Reger (2003)	●	○	○	○	○
	Lotter und Wiendahl (2006)	●	◐	●	◐	○
Planung wandlungsfähiger Fabriken	Hernández Morales (2002)	◐	●	◐	○	○
	Witte & Vielhaber (2003)	●	◐	○	●	○
	Cisek (2005)	◐	●	○	○	○
	Heger (2007)	◐	◐	◐	○	○
	Möller (2008)	●	◐	○	●	○
	Klemke (2014)	◐	◐	○	○	○
	Lübke mann (2016)	◐	●	○	○	◐
Planung wandlungsfähiger Montagelinien	Loferer (2002)	○	○	◐	○	○
	Kluge (2011)	○	◐	○	●	○
	Weyand (2010)	●	○	◐	○	○
	Pachow-Frauenhofer (2012)	●	◐	○	○	●
	Landherr (2014)	●	◐	○	○	●
	Neumann (2015)	●	◐	○	○	●
	Eilers (2015)	●	◐	◐	●	○
	Sauer (2016)	●	○	◐	○	○
	Salmi & David (2016)	◐	○	◐	○	○
	Benkamoun (2016)	◐	●	◐	○	◐
	Fisel (2019)	●	○	○	○	●
	Burggräf (2019)	●	○	●	○	●

4 Planungsmethodik

Im folgenden Kapitel wird die Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme beschrieben. Das in Unterkapitel 3.4 beschriebene Forschungsdefizit wird in diesem Kapitel adressiert. Die Methodik gliedert sich in die vier Schritte „Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit“, „Lösungsraum“, „Skalierungsstrategie“ und „Konstruktionsrichtlinien“ (Abbildung 4.1). In einigen Teilen wurde die Methodik in durch den Autor angeleiteten studentischen Arbeiten entwickelt. Literaturquellen nach dem Schema A_Name (Jahr) beziehen sich auf studentische Arbeiten am wbk Institut für Produktionstechnik, die durch den Autor der Dissertation angeleitet wurden. Grundlegende Vorarbeiten für die Methodik stammen aus (A_Ungermann 2017; A_Klapper 2017). Die in diesem Unterkapitel vorgestellte Methodik kann auf beliebige Anwendungsfälle aus der variantenreichen Serienmontage angewendet werden, um den optimalen Grad der Wandlungsfähigkeit des Montagesystems zu ermitteln und technische Maßnahmen für die Erreichung der optimalen Wandlungsfähigkeit abzuleiten.



Abbildung 4.1: Überblick der Planungsmethode

Der Fokus der Planungsmethode liegt auf dem Vergleich einer hohen Anzahl möglicher Konfigurationen des Montagesystems. Die präzise Ermittlung von Kennzahlen einer einzelnen Konfiguration steht nicht im Vordergrund. Für die Ermittlung der Kennzahlen einer einzelnen Konfiguration werden aufgrund der Komplexität einige Einschränkungen definiert:

- Taktzeitspreizungen zwischen Produktvarianten werden nicht berücksichtigt.
- Unterschiedliche Prozesse je Variante werden nicht berücksichtigt, lediglich verschiedene Prozessreihenfolgen bei gleichbleibendem Prozessinhalt sowie rekursive und gekreuzte Materialflüsse können mit der Methodik innerhalb gewisser Grenzen abgebildet werden. Eine ausführliche Beschreibung der Einschränkungen an den Materialfluss ist ab Seite 48 zu finden.
- Einflüsse aus Losgrößen werden nicht berücksichtigt.
- Pufferdimensionierungen werden nicht berücksichtigt.
- Es wird angenommen, dass sich kein Materialstau bildet.

Ergebnis dieser Methode sind Gestaltungsrichtlinien für ein skalierbares Montagesystem, welche für einzelne Stationsmodule spezifische Wandlungsbefähiger vorgeben. Um dieses Ergebnis zu erzielen, erfüllt die Methodik die in Unterkapitel 3.4 eingeführten und in Tabelle 3.1 zusammengefassten Anforderungen. Jeder Teilschritt der Planungsmethode führt zu einem definierten Ergebnis, welches zu Beginn des jeweiligen Unterkapitels genannt wird.

Um den abstrakten Methodeninhalt zu veranschaulichen werden die einzelnen Teilschritte der Methodik am Beispiel der Lernfabrik Globale Produktion (Lernfabrik) beschrieben (wbk 2019; Lanza & Moser et al. 2015; Bürgin & Echsler Minguillon et al. 2017). Die Beispiele aus der Lernfabrik stammen zu einem wesentlichen Teil aus der vom Autor dieser Arbeit betreuten studentischen Arbeit (A_Mußtow 2019). Die Textpassagen, welche sich auf das Beispiel beziehen, sind grau hinterlegt. In der Lernfabrik werden elektrische Stellmotoren für den Einsatz als Fensterheber- und Sitzverstellermotoren in PKW montiert. Betriebsmittel und Produkt verwenden reale Industrietechnik. Im für dieses Kapitel genutzten Beispiel wird die Lernfabrik an einem fiktiven Standort in China betrieben.

4.1 Schritt 1: Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit

Bei der Prognose der Einflüsse auf ihre Produktion beschränken sich Unternehmen für gewöhnlich auf modellgestützte Ansätze der Szenarioentwicklung für den erwarteten Stückzahlverlauf (Mietzner 2009). Die Berücksichtigung der Unsicherheit wird meist über die Betrachtung eines optimistischen, eines pessimistischen sowie ggf. eines wahrscheinlichsten Szenarios nach dem Vorbild des Szenariotrichters von (Reibnitz 1992) erreicht. In einer hochvolatilen Produktionsumgebung reicht dieses Vorgehen nicht aus, um die Unsicherheit zu beschreiben. Zum einen existieren mehr Einflüsse

als reine Stückzahländerungen. Zum anderen lässt sich die Unsicherheit hochvolatiler Einflüsse mit einer auf drei Szenarien beschränkten Betrachtung nicht adäquat abbilden. Gemäß der in Unterkapitel 3.4 definierten Anforderungen muss in der Szenarioanalyse daher die Gesamtheit der Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Des Weiteren muss die Unsicherheit in der Prognose der Einflussfaktoren realitätsnah quantifiziert werden. Wesentliche Inhalte zur Szenarioanalyse in diesem Unterkapitel basieren auf der vom Autor angeleiteten studentischen Arbeit (A_Englisch 2017). Eine Modellierung des Szenarios stammt aus (A_Derichs 2018).

4.1.1 Szenariomodell

Ergebnis des Teilschritts 1.1 (Abbildung 4.2) ist ein Szenariomodell (Abbildung 4.4) aus Wandlungstreibern (Unterkapitel 2.1.2.1) und Rezeptoren. Die in Unterkapitel 2.1.2.4 eingeführten Rezeptoren (Abbildung 4.3) werden für diesen Teilschritt in anwendungsspezifische Rezeptor-Kennzahlen konkretisiert.

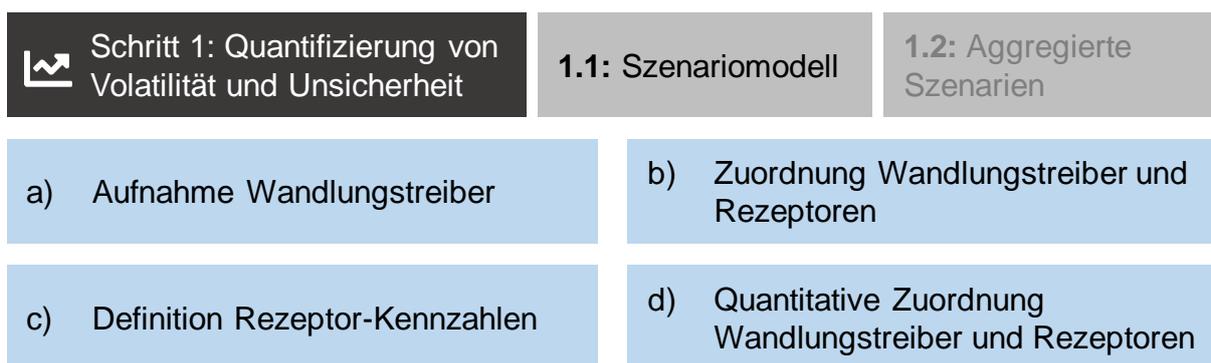


Abbildung 4.2: Prozess der Erstellung des Szenariomodells

Die Rezeptor-Kennzahlen definieren die Anforderungen, welche an das Montagesystem gestellt werden. Die Rezeptoren Stückzahl und Zeit beziehen sich jeweils auf eine allgemeingültige Rezeptor-Kennzahl. So ist für den Rezeptor Stückzahl die Rezeptor-

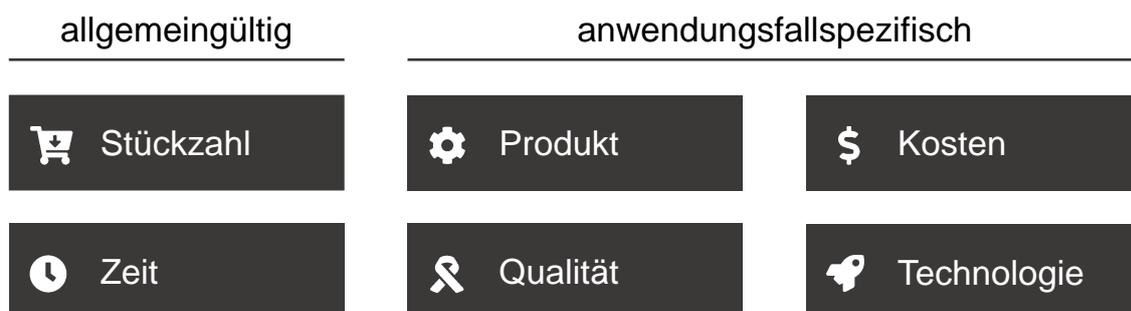


Abbildung 4.3: Überblick der 6 Rezeptoren (in Anlehnung an (Cisek 2005))

Kennzahl unabhängig vom Anwendungsfall die Jahresstückzahl, welche das Montagesystem produzieren können muss. Der Rezeptor Zeit wird durch die Rezeptor-Kennzahl Gesamtbearbeitungszeit, der Summe aller Bearbeitungszeiten im Montagesystem gemessen. Die Rezeptoren Produkt, Kosten, Qualität und Technologie werden durch Rezeptor-Kennzahlen gemessen, die im konkreten Anwendungsfall eine quantifizierbare Auswirkung auf das Montagesystem haben.

4.1.1.1 Aufnahme Wandlungstreiber

Die Kenntnis über das Umfeld des Unternehmens ist auf viele Köpfe innerhalb des Unternehmens verteilt. Ziel der Analyse der Wandlungstreiber ist es, dieses Wissen zusammenzutragen und zu strukturieren. Um das im Unternehmen vorhandene Wissen über die inneren und äußeren Einflüsse auf die Produktion möglichst umfassend zu nutzen, werden für die Durchführung der Szenarioanalyse Experten aus verschiedenen Bereichen gewählt. Das Ziel der Teamzusammenstellung ist es, ein möglichst umfassendes Spektrum an optimistischen sowie pessimistischen Einschätzungen und verschiedenen Disziplinen abzudecken. Das Feld der möglichen Wandlungstreiber umfasst einen großen Bereich. In (Moser 2014) wird ein wandlungsfähiges globales Produktionsnetzwerk in einem Anwendungsfall mit 20 Wandlungstreibern geplant. (Klemke 2014) stellt einen Katalog mit 40 generischen Veränderungstreibern auf. Daher ist es nicht möglich, ein vollständiges Bild aller möglichen Entwicklungen abzubilden. Es wird daher ein strukturiertes Vorgehen genutzt, um während der Aufnahme der Wandlungstreiber ein möglichst umfassendes Bild der Einflüsse auf das Unternehmen aufzunehmen. Die Experten werden in Einzelinterviews befragt. Innerhalb des Interviews werden mögliche Wandlungstreiber gesammelt. Als Gedankenstütze werden die Rezeptoren genutzt. Für die meisten Unternehmen stehen insbesondere Wandlungstreiber mit Bezug zum Rezeptor Stückzahl im Fokus. Diese Wandlungstreiber resultieren zum Großteil aus dem Marktumfeld. Daher wird dieser Bereich gezielt unter Zuhilfenahme der 5 Kräfte von Porter (Porter 1979) untersucht. Diese beinhalten die Bedrohung durch Einsteiger und die Bedrohung durch substituierende Produkte, die Verhandlungsstärke der Zulieferer und die Verhandlungsstärke der Kunden, sowie das Positionsgerangel zwischen existierenden Wettbewerbern. Nach Abschluss aller Experteninterviews werden die gesammelten Wandlungstreiber aggregiert und qualitativ beschrieben.

Im fiktiven Szenario der Lernfabrik resultieren aus diesem Schritt die Wandlungstreiber *Eintritt in das Premiumsegment* und *Handelskrieg mit den USA*. Die Lernfabrik zählt zu

ihren Kunden bisher ausschließlich Automobilhersteller für das untere Preissegment. Der Vertrieb arbeitet daran, einen OEM aus dem Premiumsegment zu gewinnen. Sollte dieser Fall eintreten, wird ein großer Einfluss auf die Produktion der Lernfabrik erwartet. Ebenso verschärft sich die Spannung zwischen den Regierungen der USA und China. Die Gefahr eines möglichen Handelskriegs wird als ernste Bedrohung für die Lernfabrik wahrgenommen.

4.1.1.2 Zuordnung Wandlungstreiber und Rezeptoren

Die identifizierten Wandlungstreiber werden den 6 Rezeptoren (Abbildung 4.3) zugeordnet. Bei der Zuordnung wird eine n:n Beziehung zugelassen, d.h. mehrere Wandlungstreiber können auf denselben Rezeptor wirken. Ebenso kann ein Wandlungstreiber auf mehrere Rezeptoren wirken. Wandlungstreiber, die keinem Rezeptor zugeordnet werden können, haben keinen Einfluss auf das Produktionssystem und werden nicht weiter betrachtet. Rezeptoren, denen kein Wandlungstreiber zugeordnet wurde, werden als statisch angenommen und ebenso nicht weiter betrachtet.

Der *Eintritt in das Premiumsegment* bedeutet für die Lernfabrik die Erschließung eines neuen Marktes. Es wird ein spürbarer Anstieg der verkauften Stückzahlen erwartet. Ebenso bedeutet das neue Segment neue Anforderungen an das Produkt. Es müssen höhere Leistung und Zuverlässigkeit der Motoren gewährleistet werden. Es wird erwartet, dass sich ein Eintreten des Wandlungstreibers auf die Rezeptoren *Stückzahl* und *Produkt* auswirkt.

Die USA haben sich zu einem wichtigen Markt für die Kunden der Lernfabrik entwickelt. Bei Eintreten eines *Handelskriegs mit den USA* wird daher auch ein massiver Rückgang der Stückzahl für die Lernfabrik erwartet. Es wird eine Auswirkung des Wandlungstreibers auf den Rezeptor *Stückzahl* angenommen.

4.1.1.3 Definition Rezeptor-Kennzahlen

Für die verbleibenden, volatilen Rezeptoren werden im nächsten Schritt die Rezeptor-Kennzahlen festgelegt. Die allgemeingültigen Rezeptor-Kennzahlen Stückzahl und Gesamtbearbeitungszeit sind bereits vordefiniert. Für die anwendungsfallspezifischen Rezeptor-Kennzahlen müssen geeignete Attribute definiert werden. Bei der Wahl dieser Rezeptor-Kennzahlen ist darauf zu achten, dass eine Veränderung des Werts der Re-

zeptor-Kennzahl zu einer direkten Veränderung des Produktionssystems führen können muss. Eine Rezeptor-Kennzahl kann entweder als stetig oder als diskret definiert sein.

Für die Lernfabrik werden aus den Wandlungstreibern *Eintritt in das Premiumsegment* und *Handelskrieg mit den USA* Auswirkungen auf die Rezeptoren *Stückzahl* und *Produkt* erwartet. Die erste Rezeptor-Kennzahl ist mit der *Stückzahl* definiert. Für den Rezeptor *Produkt* müssen speziell für den Anwendungsfall Rezeptor-Kennzahlen definiert werden. Laut Erkenntnissen des Vertriebs müssen die Motoren für das Premiumsegment aufgrund schwerer Sitze und Fenster eine höhere Leistung erbringen. Die Produktentwicklung der Lernfabrik möchte dieser Herausforderung mit einer Erhöhung der Poltopflänge der Motoren begegnen. Auf diese Weise kann mehr Kupfer in den Rotor eingebracht und eine höhere Leistung generiert werden. Einige der bestehenden Montagestationen der Lernfabrik sind nur auf eine begrenzte Poltopfhöhe eingerichtet und müssten bei Eintreten des Wandlungstreibers modifiziert werden. Eine Erhöhung der Poltopflänge erfordert eine Veränderung im Produktionssystem. Daher ist die Poltopflänge als stetige Rezeptor-Kennzahl für den Rezeptor *Produkt* geeignet.

Eine weitere Anforderung des Premiumsegments ist ein strenger Grenzwert für die maximal zulässigen Vibrationen aus dem Motor. Die Produktentwicklung der Lernfabrik berichtet, dass für eine Erfüllung dieser Anforderung eine Schmierung der bisher trocken ausgeführten Getriebezahnräder der Motoren erforderlich wird. Die vorhandene Station zur Montage der Getriebezahnräder ist auf diese Anforderung nicht eingestellt. Somit ist eine Anpassung bei Eintreten des Wandlungstreibers erforderlich. Es wird die diskrete Rezeptor-Kennzahl *geschmierte Zahnräder* für den Rezeptor *Produkt* definiert,

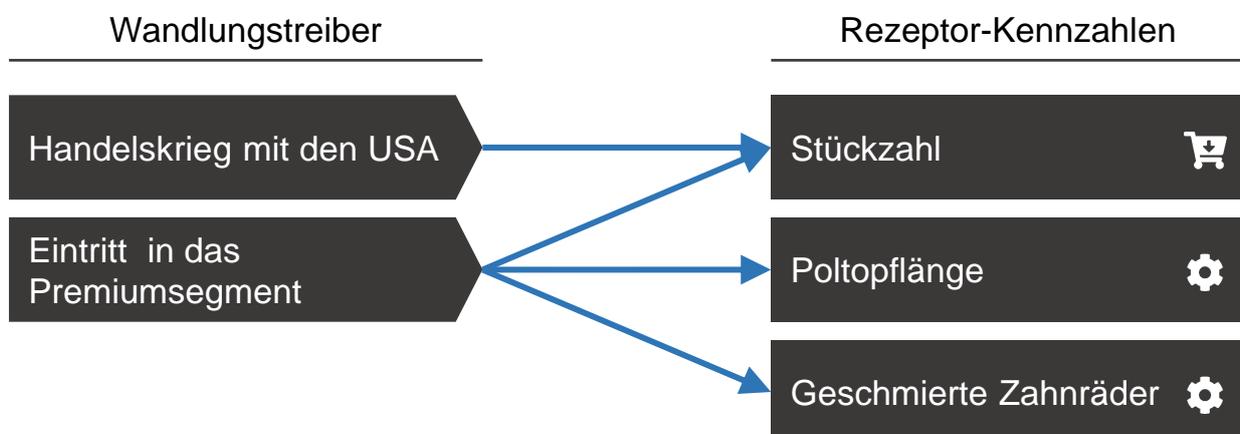


Abbildung 4.4: Ausschnitt des Szenariomodells der Lernfabrik

welche die Werte *Schmierung erforderlich* und *Schmierung nicht erforderlich* annehmen kann. Der Ausschnitt des Szenariomodells für die gewählten Wandlungstreiber der Lernfabrik ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

4.1.1.4 Quantitative Beziehung Wandlungstreiber und Rezeptor-Kennzahl

Um das in Abbildung 4.4 dargestellte Modell abschließend zu beschreiben, müssen die definierten Zusammenhänge zwischen Wandlungstreibern und Rezeptoren quantifiziert werden. Es wird unterschieden in stetige und diskrete Rezeptor-Kennzahlen. Für diskrete Rezeptor-Kennzahlen wird für jede Kombination aus Eintreten, bzw. Nichteintreten der in Beziehung stehenden Wandlungstreiber ein Wahrscheinlichkeitsvektor der erwarteten Auswirkung definiert.

Die Rezeptor-Kennzahl *geschmierte Zahnräder* hängt von genau einem, nämlich dem Wandlungstreiber *Eintritt in das Premiumsegment*, ab. Die Rezeptor-Kennzahl kann den Wert *Schmierung erforderlich* mit Index 1 und den Wert *Schmierung nicht erforderlich* mit Index 2 annehmen. Falls der Eintritt in das Premiumsegment gelingt, müssen auf jeden Fall geschmierte Zahnräder montiert werden. Es werden die Wahrscheinlichkeitsvektoren $W^1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ für den Fall des Eintretens des Wandlungstreibers und $W_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, für den Fall des Nichteintretens des Wandlungstreibers definiert.

Stetige Rezeptor-Kennzahlen unterliegen komplexeren Zusammenhängen als diskrete Rezeptor-Kennzahlen. Abgebildet werden die Zusammenhänge in einer Funktion $f_t^a(x_1, \dots, x_n, f_{t-1}^a)$ je Rezeptor-Kennzahl a , welche von den verknüpften Wandlungstreibern x_1, \dots, x_n und dem Wert der vorhergehenden Planungsperiode f_{t-1}^a abhängt. Für jede Rezeptor-Kennzahl wird ein Startwert f_0^a und eine initiale Steigung m^0 definiert, welche den Trend der Rezeptor-Kennzahl bei Ausbleiben der Wandlungstreiber beschreibt. Die Einflüsse der Wandlungstreiber werden aufgeteilt in drei Bestandteile. Es wird unterschieden in den Absolutanteil ba^t , den Relativanteil br^t und den Steigungsanteil m^t . Absolut- und Steigungsanteil werden jeweils als Absolutwerte angegeben. Der Relativanteil wird als anteiliger Wert im Intervall $[0,1]$ angegeben. Die Berechnung des Funktionswerts f_t^a für die Planungsperiode t wird in zwei Schritten berechnet. Zunächst werden die Funktionsanteile aus den Einzelanteilen ba_x , br_x und m_x der verknüpften Wandlungstreiber gemäß Formel 4-1, 4-2 und 4-3 berechnet.

$$ba^t = \sum_x ba_x \quad 4-1$$

$$br^t = \prod_x br_x \quad 4-2$$

$$m^t = m^{t-1} + \sum_x m_x \quad 4-3$$

Anschließend wird der Funktionswert f_t^a für die Rezeptor-Kennzahl a in Planungsperiode t aus den berechneten Funktionsanteilen gemäß Formel 4-4 berechnet.

$$f_t^a = m^t + f_{t-1}^a * (br^t) + ba^t \quad 4-4$$

Die Einflussanteile werden als Zufallsvariablen, die einer Dreiecksverteilung unterliegen, modelliert (siehe Abbildung 4.5). Die Verteilungen werden aus der Schätzung des niedrigsten, höchsten und wahrscheinlichsten Wertes definiert. Durch das entstandene Gleichungssystem ist der quantitative Zusammenhang zwischen Wandlungstreibern und Rezeptor-Kennzahlen und somit das Szenariomodell der Rezeptor-Kennzahlen vollständig definiert.

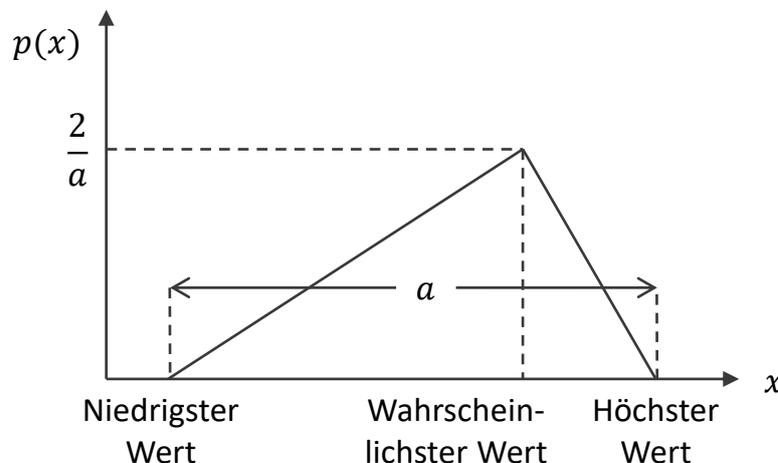


Abbildung 4.5: Dreiecksfunktion

Die Stückzahl f_t^1 der Lernfabrik ist abhängig von den betrachteten Wandlungstreibern *Eintritt in das Premiumsegment* x_1 und *Handelskrieg mit den USA* x_2 . Bei einem Eintritt in das Premiumsegment wird mit einem einmaligen Sprung der Stückzahl um 20.000 bis 40.000 Motoren im Jahr gerechnet. Am wahrscheinlichsten gilt ein Anstieg um 35.000 Stück. Dieser Einfluss wird als absoluter Einfluss ba_1 modelliert. Es wird erwartet, dass die Lernfabrik mit erfolgreichem Einstieg in das Premium-Segment sein Wachstum entsprechend des Marktwachstums des Premiumsegments um 6.000 bis 10.000 Motoren, wahrscheinlich 7.000 Motoren im Jahr erreichen wird. Dieser Einfluss

wird als Steigungseinfluss m_1 modelliert. Bei Eintritt eines *Handelskriegs mit den USA* wird ein sofortiger Rückgang der Stückzahl um mindestens 10 %, voraussichtlich 15 % und bis zu 30 % erwartet. Dieser Einfluss wird als relativer Einfluss br_2 modelliert. Im Ausgangszustand werden in der Lernfabrik der Initialwert f_0^1 in Höhe von 120.000 Motoren im Jahr montiert. Es wird erwartet, dass der allgemein positive Trend sich fortsetzt, sollten keine Wandlungstreiber eintreten. Die initiale Steigung m^0 wird daher auf 7.000 Motoren im Jahr festgelegt. Aus den gegebenen Werten können beispielhafte Verläufe berechnet werden. Angenommen, beide Wandlungstreiber treten in Periode t ein. In Periode $t - 1$ werden in der Lernfabrik 134.000 Motoren produziert. Für die einzelnen Funktionsanteile werden aus der Dreiecksverteilung folgende Werte gezogen: $ba_1 = 33.500$, $m_1 = 7.200$, $br_2 = 0,75$. Die Funktionsanteile berechnen sich gemäß Formel 4-1, 4-2 und 4-3.

$$ba^t = \sum_x ba_x = ba_1 = 33.500 \text{ (siehe Formel 4-1)}$$

$$br^t = \prod_x br_x = br_2 = 0,75 \text{ (siehe Formel 4-2)}$$

$$m^t = m^{t-1} + \sum_x m_x = m^{t-1} + m_1 = 7.000 + 7.200 = 14.200 \text{ (siehe Formel 4-3)}$$

Gemäß Formel 4-7 lässt sich der Funktionswert f_t^1 berechnen.

$$f_t^a = m^t + f_{t-1}^a * (br^t) + ba^t = 14.200 + 134.000 * 0,75 + 33.500 = 148.200$$

4.1.2 Aggregierte Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen

Mit der Festlegung der mathematischen Beziehungen zwischen Wandlungstreibern und Rezeptor-Kennzahlen sind die erwarteten Auswirkungen bei Eintritt der Wandlungstreiber quantifiziert. Für die weitere Verwendung dieses Modells in den folgenden Planungsschritten muss jedoch eine Prognose über den zeitlichen Verlauf der jeweiligen Rezeptor-Kennzahlen erstellt werden. Zu diesem Zweck werden in Schritt 1.2 der Methodik, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, aggregierte Szenarien für jede der Rezeptor-Kennzahlen abgeleitet.



Abbildung 4.6: Prozess der Berechnung aggregierter Szenarien

4.1.2.1 Zukunftsszenarien der Wandlungstreiber

Um eine Prognose für den zeitlichen Verlauf einer Rezeptor-Kennzahl zu berechnen, müssen die Eintrittswahrscheinlichkeiten und Eintrittszeitpunkte der mit der Rezeptor-Kennzahl verknüpften Wandlungstreiber ermittelt werden. Die Wandlungstreiber werden durch Zufallsereignisse modelliert. Diese Zufallsereignisse sind durch eine Eintrittswahrscheinlichkeit und einen Eintrittszeitpunkt definiert. Für den Eintrittszeitpunkt wird der früheste, wahrscheinliche und späteste Eintrittszeitpunkt geschätzt. Es wird unterschieden in Wandlungstreiber, die nur einmal eintreten können und solche, die mehrfach auftreten können, wie z.B. Stromausfälle.

In Abbildung 4.7 werden die wichtigsten Daten des Wandlungstreibers *Eintritt in das Premiumsegment* dargestellt. Der Vertrieb der Lernfabrik ist verhalten optimistisch, dass der potenzielle Kunde tatsächlich einen Teil seiner Motoren bei der Lernfabrik bestellen wird. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird auf 60 % geschätzt. Im Optimalfall, könnten die Verträge bereits innerhalb des laufenden Quartals unterzeichnet werden, dann würden in einem Jahr (4 Quartale) die ersten Premium Motoren geliefert werden müssen. Für am wahrscheinlichsten hält der Vertrieb jedoch einen Produktionsstart nach 6 Quartalen. Falls auch nach 12 Quartalen noch keine Motoren für den Premiumkunden gebaut werden, geht der Vertrieb davon aus, dass der Deal geplatzt ist.

Name	<i>Eintritt in das Premiumsegment</i>		ID	1
Beschreibung	Die LGP zählt zu ihren Kunden bisher ausschließlich Automobilhersteller für das untere Preissegment. Der Vertrieb arbeitet daran, ein OEM aus dem Premiumsegment zu gewinnen. Sollte dieser Fall eintreten, wird ein großer Einfluss auf die Produktion der LGP erwartet			
Eintrittswahrscheinlichkeit	60 %	Einmalig / Mehrfach	1	
Frühester, wahrscheinlichster, Spätester Eintrittszeitpunkt [in Quartalen]	4	6	12	

Abbildung 4.7: Beispielhafter Steckbrief eines Wandlungstreibers der Lernfabrik

4.1.2.2 Aggregierte Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen

Im aggregierten Szenario ist der Wertebereich der Rezeptor-Kennzahl x in die Klassen 1 bis N unterteilt. Für jede Planungsperiode t der Menge aller Planungsperioden T ist eine Matrix $KM_{x,t}$ definiert. Die Matrix $KM_{x,t}$ beinhaltet die Menge K_x aller Klassenübergänge. Allen Indexpaaren i, j welche einem Klassenübergang in K_x zugeordnet sind, ist eine Einzelwahrscheinlichkeit $kp_{i \rightarrow j}$ zugeordnet. Die Einzelwahrscheinlichkeit $kp_{i \rightarrow j}$ beinhaltet die Wahrscheinlichkeit eines Klassenübergangs von der Klasse mit dem Index i zur Klasse mit dem Index j von Planungsperiode t zu $t + 1$. Der Vektor SV_x beinhaltet die Menge T aller Planungsperioden von 1 bis t^{max} . Jedem Index t der einer Planungsperiode in T zugeordnet ist, wird die Matrix $KM_{x,t}$ der entsprechenden Planungsperiode zugeordnet. Formal beschrieben, ist das aggregierte Szenario einer Rezeptor-Kennzahl x folglich ein Vektor SV_x aus Matrizen $KM_{x,t}$ für jede Planungsperiode in T :

$$KM_{x,t}: \{1, \dots, N\} \times \{1, \dots, N\} \rightarrow K_x, (i, j) \mapsto kp_{i \rightarrow j} \quad 4-5$$

$$SV_x: \{1, \dots, t^{max}\} \rightarrow T, (t) \mapsto KM_{x,t} \quad 4-6$$

Um diesen Vektor zu berechnen, müssen zunächst Klasseneinteilungen vorgenommen werden. Für diskrete Kennzahlen, wie beispielsweise eine einzuhaltende Schutzklasse ist dies nicht notwendig. Stetige Kennzahlen, wie die Stückzahl müssen sinnvoll in Klassen unterteilt werden.

Um das aggregierte Szenario einer Rezeptor-Kennzahl zu berechnen, wird eine Monte Carlo Simulation (MC-Simulation) durchgeführt. Eine Iteration der Simulation enthält die Ziehung einer Zufallszahl je Eintrittswahrscheinlichkeit und eine weitere Ziehung einer Zufallszahl für den Eintrittszeitpunkt der beteiligten Wandlungstreiber. Bei mehrfach eintretenden Wandlungstreibern werden weitere Realisationen gezogen, immer ausgehend vom Eintrittszeitpunkt der vorhergehenden Ziehung, bis das Ende des Planungshorizonts erreicht ist. Basierend auf den im vorherigen Schritt definierten Auswirkungen der Wandlungstreiber auf die Rezeptor-Kennzahl werden für jede Planungsperiode weitere Zufallszahlen gezogen und der resultierende Wert der Rezeptor-Kennzahl berechnet. Mit dieser konkreten Ausprägung des aggregierten Szenarios kann ein Verlauf der Rezeptor-Kennzahl über den gesamten Planungshorizont simuliert werden. Aus den Iterationen der MC-Simulation entsteht ein Bild der möglichen Verläufe einer Rezeptor-Kennzahl (vgl. Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9). Ein wichtiger Parameter bei der Durchführung von MC-Simulationen ist die Anzahl simulierter Iterationen N . Mit

wachsendem N steigt die Genauigkeit der Näherung des Ergebnisses. (Hahn 1972) leitet einen einfachen Zusammenhang her, mit dem sich, durch Vorgabe von drei Parametern, ein Minimalwert für N bestimmen lässt. Ein Parameter ist der maximal erlaubte Näherungsfehler E . Der zweite Parameter ist das Konfidenzniveau γ zu dem die Schätzung \hat{p} um höchstens $\pm E$ vom zu schätzenden Parameter p abweicht. Dritter Parameter ist eine erste Näherung p' für den zu schätzenden Parameter p . Gemäß (Hahn 1972) lässt sich die Untergrenze für N ableiten als:

$$N = \frac{p'(1-p')}{E^2} z_{(1+\gamma)/2}^2 \quad 4-7$$

Dabei bezeichnet $z_{(1+\gamma)/2}$ den Funktionswert der Standardnormalverteilung zum Konfidenzniveau γ . Im Fall der Vorhersage der aggregierten Szenarien werden in einer Iteration der MC-Simulation mehrere \hat{p} berechnet. Es müsste für jedes \hat{p} ein p' ermittelt werden. Da gilt $p' \in [0,1]$ kann für den Ausdruck $p'(1-p')$ die obere Schranke \bar{p} genutzt werden.

$$\bar{p} = \max(p'(1-p')) = 0,25 \quad 4-8$$

Unter Vorgabe des Konfidenzniveaus γ und dem maximal erlaubten Näherungsfehlers E wird mit der verallgemeinerten Formel 4-9 von (Hahn 1972) die Anzahl N durchzuführender Iterationen der MC-Simulation ermittelt.

$$N = \frac{0,25}{E^2} z_{(1+\gamma)/2}^2 \quad 4-9$$

Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9 zeigen die Ergebnisse der MC-Simulation für die Rezeptor-Kennzahlen *Geschmierte Zahnräder* und *Stückzahl*. In den Abbildungen sind die einzelnen Verläufe einer Iteration der MC-Simulation in blau dargestellt. Aus der Überlagerung aller Durchläufe in einer Abbildung ergibt sich die Darstellung in Form eines „Fächers der Unsicherheit“.

Für die MC-Simulation der Lernfabrik wird das Konfidenzniveau $\gamma = 0,95$ festgelegt. Der zugehörige z-Wert beträgt 1,96. Der maximal zulässige Fehler wird auf $E = 0,01$ festgelegt. Die Anzahl durchzuführender Iterationen N ergibt sich aus Formel 4-9 mit 9.604. Dieser Wert wird auf 10.000 aufgerundet. Man kann also mit einer Sicherheit von 95 % erwarten, dass die geschätzten Einzelwahrscheinlichkeiten der aggregierten Szenarien um nicht mehr als einen Prozentpunkt von der exakten Lösung abweichen.

Das Ergebnis für die Rezeptor-Kennzahl *Geschmierte Zahnräder* kann in die abschließende Darstellung des Vektors $SV_{\text{Geschmierte Zahnräder}}$ der Übergangsmatrizen $KM_{\text{Geschmierte Zahnräder},t}$ je Planungsperiode überführt werden. Die Einzelwahrscheinlichkeiten $kp_{i \rightarrow j}$ in $KM_{\text{Geschmierte Zahnräder},t}$ werden aus den Verläufen der Rezeptor-Kennzahl berechnet, die von Zeitpunkt t auf Zeitpunkt $t + 1$ von Klasse i zu Klasse j wechseln. Zu diesem Zweck werden alle Periodenübergänge, die sich aus den Iterationen der MC-Simulation ergeben, addiert und durch die Anzahl Iterationen geteilt. Dieses Vorgehen wird am Beispiel der Planungsperiode $t = 6$ für die Rezeptor-Kennzahl geschmierte Zahnräder erläutert. In Abbildung 4.8 ist zu erkennen, dass von Planungsperiode $t = 6$ auf $t = 7$ in einigen Iterationen die Klasse nicht gewechselt wurde und in manchen Iterationen ein Klassenübergang von *ungeschmiert* auf *geschmiert* stattgefunden hat. Ein Klassenübergang von *geschmiert* auf *ungeschmiert* fand nicht statt, somit kann direkt $kp_{\text{geschmiert} \rightarrow \text{ungeschmiert}} = \frac{0}{10000} = 0\%$ angenommen werden. Die weiteren Übergangswahrscheinlichkeiten können nicht aus der Abbildung abgelesen werden. Die Verläufe müssen einzeln ausgewertet werden. In Abbildung 4.8 ist die Anzahl der Verläufe mit dem jeweiligen Klassenübergang beispielhaft für Planungsperiode $t = 6$ angegeben. Es ergeben sich folgende Einzelwahrscheinlichkeiten:

$$kp_{\text{ungeschmiert} \rightarrow \text{geschmiert}} = \frac{1370}{10000} = 13,7\%$$

$$kp_{\text{geschmiert} \rightarrow \text{geschmiert}} = \frac{1500}{10000} = 15\%$$

$$kp_{\text{ungeschmiert} \rightarrow \text{ungeschmiert}} = \frac{7130}{10000} = 71,3\%$$

Um die Übergangsmatrizen der stetigen Rezeptor-Kennzahl *Stückzahl* berechnen zu können, müssen die stetigen Verläufe der Rezeptor-Kennzahl in diskrete Klassen überführt werden. Für diesen Schritt müssen zunächst die Klassengrenzen definiert werden. Die in der MC-Simulation berechneten Verläufe bewegen sich zwischen 80.000 und 400.000 Stück im Jahr. Innerhalb dieser Grenzen sollte sich die Einteilung der Werteklassen befinden. Bei der Definition der Klassengrenzen innerhalb dieses Korridors besteht ein Spannungsfeld zwischen einem hohen Rechenaufwand durch eine große Anzahl Klassen und einer mangelnden Genauigkeit des Szenarios durch eine zu niedrige Anzahl Klassen. Es existieren charakteristische Stückzahlgrenzen zu denen die Stückkosten einer Montagesystemkonfiguration (siehe Unterkapitel 4.2.1.1), die Stückkosten einer anderen Montagesystemkonfiguration unterschreiten. Zum Zeitpunkt der Einteilung der Klassengrenzen sind diese Stückzahlgrenzen jedoch nicht bekannt. Die Klassengrenzen müssen daher basierend auf der Einschätzung des Planers gewählt werden. Nach der Berechnung der Skalierungsstrategie kann diese Wahl ggf. angepasst werden, um iterativ eine geeignete Wahl der Klassengrenzen zu erreichen. Wie in Abbildung 4.9 dargestellt, wird das aggregierte Szenario der *Stückzahl* in 8 Klassen mit Klassenbreite 40.000 eingeteilt.

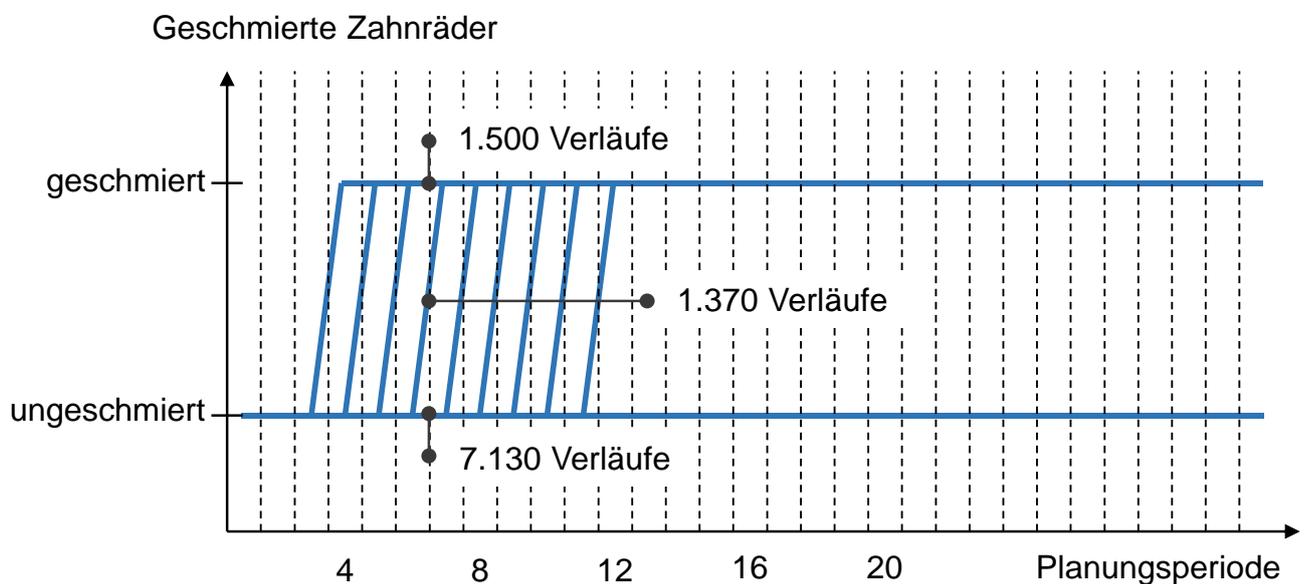


Abbildung 4.8: Aggregiertes Szenario der Rezeptor-Kennzahl *Geschmierte Zahnräder*

Die MC-Simulation wird für jede Rezeptor-Kennzahl durchgeführt. Mit den resultierenden aggregierten Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen sind die Zukunftserwartungen

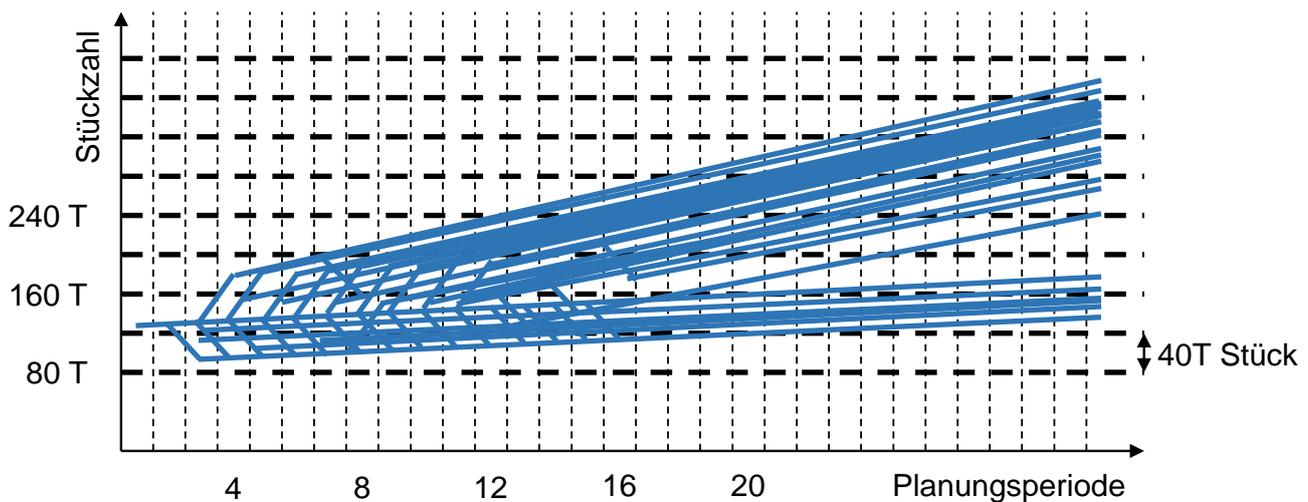


Abbildung 4.9: Aggregiertes Szenario der Rezeptor-Kennzahl Stückzahl

des Unternehmens entsprechend formalisiert, um in den weiteren Schritten der Methodik für die Ermittlung der optimalen Wandlungsfähigkeit genutzt werden zu können.

4.2 Schritt 2: Lösungsraum

Im zweiten Schritt der Methode zur Planung skalierbarer Montagesysteme wird basierend auf den im ersten Schritt ermittelten Szenarien der Lösungsraum möglicher Ausprägungen des Montagesystems entwickelt. Die Bandbreite der erwarteten Entwicklungen der volatilen Rezeptoren gibt die Grenzen des zu betrachtenden Lösungsraums vor. Die Erstellung des Lösungsraums wird in zwei Stufen durchgeführt. Zunächst werden Systemabschnittskonzepte geplant (Unterkapitel 4.2.1). Anschließend werden die Systemabschnittskonzepte zu Montagesystemkonfigurationen (MSK) verkettet (Unterkapitel 4.2.2). Grundlage für die Erstellung der verschiedenen MSK sind die verwendeten Skalierungsmechanismen. Um die Skalierungsmechanismen anwenden zu können, wird vorausgesetzt, dass die Systemabschnittskonzepte modular aufgebaut sind. Die Systemabschnittskonzepte sind über Montagestationen bis hin zu Stationsmodulen hierarchisch aufgebaut. Das zugehörige Modularitätskonzept wird in Unterkapitel 4.2.1.1 definiert.

4.2.1 Systemabschnittskonzepte

Die Entwicklung der Vorgehensweise zur Erstellung von Systemabschnittskonzepten basiert auf Beiträgen aus (A_Liem 2018) und (A_Haack 2017). Die Ergebnisse des Teilschritts 2.1 bestehen aus zwei Teilen. Für jedes Systemabschnittskonzept wird ein

eigener Steckbrief (Abbildung 4.27) angelegt. Der Steckbrief beinhaltet alle Informationen, die benötigt werden um das Systemabschnittskonzept zu identifizieren und in der weiteren Planung alle Berechnungen durchführen zu können. Der zweite Teil besteht aus den Abschnittswandlungsmatrizen. Sie beinhalten die Wandlungskosten und Wandlungsdauern für Wandlungen zwischen Systemabschnittskonzepten.

4.2.1.1 Modularität

Für die Erstellung der Systemabschnittskonzepte wird das gesamte Montagesystem in 4 Betrachtungsebenen gegliedert (Abbildung 4.10). Die Betrachtungsebenen orientieren sich an den beiden unteren Systemebenen nach (Hernández Morales 2002), wie in Abbildung 4.10 dargestellt. Das Montagesystem ist die oberste Gliederungsebene und definiert die Systemgrenze der Methodik. Das in der Lernfabrik betrachtete Montagesystem umfasst die in Abbildung 4.12 dargestellte U-Linie. Prozesse außerhalb des Montagesystems sowie die Teilelogistik bis Eintritt in das Montagesystem werden nicht

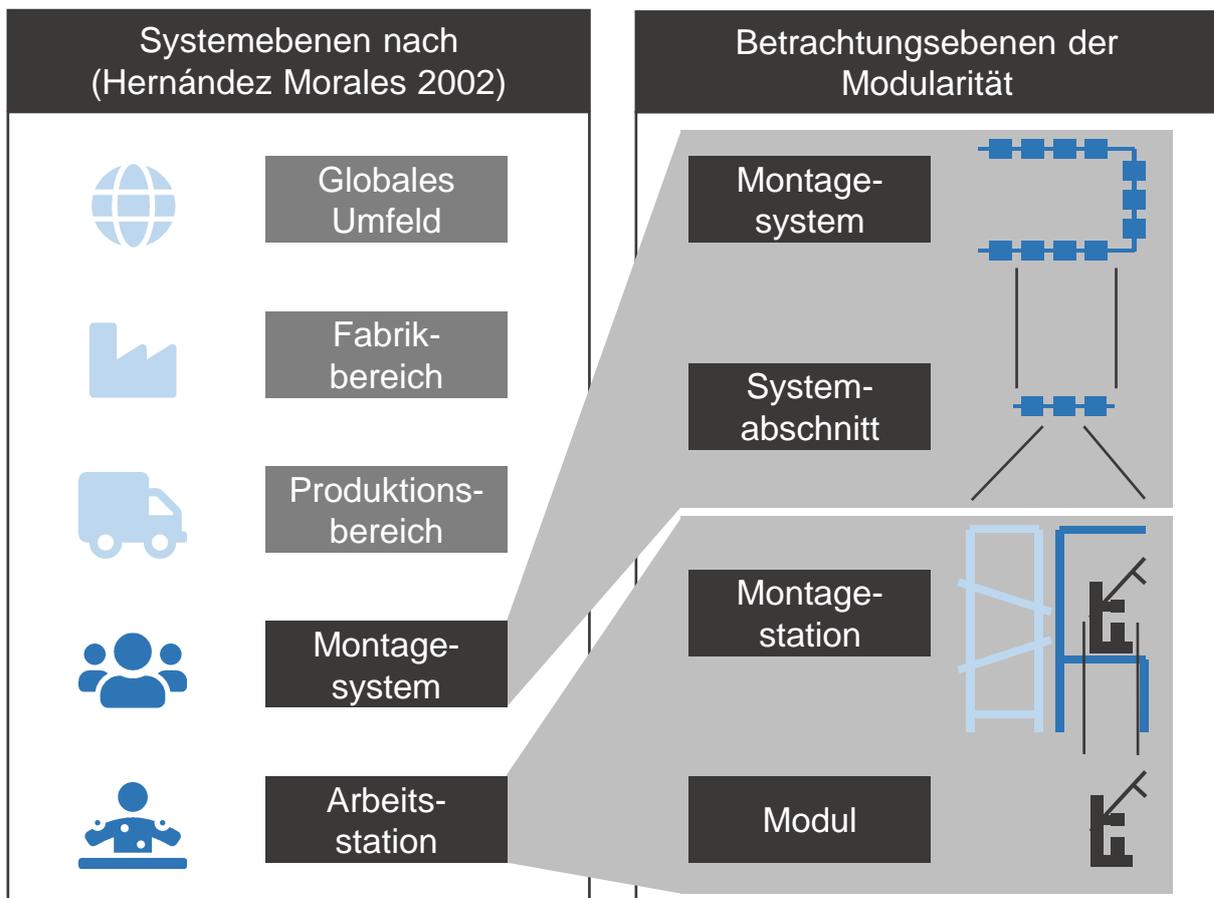


Abbildung 4.10: Betrachtungsebenen des modularen Montagesystems

betrachtet. Das Montagesystem setzt sich zusammen aus Systemabschnitten. In Abbildung 4.12 ist beispielhaft ein Systemabschnitt mit einem dunkelblauen Rahmen markiert, in dem in einer Mensch-Roboter-Kollaboration an zwei Montagestationen parallel Verschraubungen und Fügeoperationen durchgeführt werden. Die Systemabschnitte können als unabhängig voneinander betrachtet werden, sind also überschneidungsfrei. Für ein Montagesystem ist die zu erfüllende Menge der Montageaufgaben definiert. Aus unterschiedlichen Zusammensetzungen der Systemabschnitte, die alle Montageaufgaben des Montagesystems erfüllen, lassen sich unterschiedliche Montagesystemkonfigurationen (MSK) ableiten. Ein Systemabschnitt besteht aus mindestens einer Montagestation. Montagestationen deren Manipulatoren nicht voll ausgelastet sind, werden zu Systemabschnitten zusammengefasst. In Abbildung 4.12 ist die Montagestation mit einem hellgrauen Rahmen markiert, an der innerhalb des abgebildeten Systemabschnitts die Getriebezahnräder gefügt werden. Die verschiedenen Möglichkeiten, einen Systemabschnitt auszugestalten, werden in Systemabschnittskonzepten festgehalten. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass sowohl die einzelnen Montagestationen, als auch der interne Aufbau der Stationen modular ist. Montagestationen und Module werden im Folgenden als modular betrachtet, wenn sie nur durch eine geringe Anzahl physischer und softwareseitiger Schnittstellen mit dem Rest des Systems verbunden sind. Aufgrund der vereinfachten Berechnung von Taktzeit (Formel 4-15) und Gesamtbearbeitungszeit (Formel 4-16) der Montagesystemkonfigurationen ab Seite 74 müssen einige Einschränkungen für die Auswahl der Systemabschnitte vorgegeben werden. Die Berechnungen setzen voraus, dass jedes Produkt, jeden Systemabschnitt des Montagesystems exakt einmal durchlaufen muss. In welcher Reihenfolge dies geschieht, ist für die Berechnung irrelevant. Ein mehrfaches Durchlaufen oder Auslassen eines Systemabschnittes ist jedoch nicht zulässig. Innerhalb eines Systemabschnitts sind auch Mehrfachdurchläufe einer Station zulässig, solange für den Systemabschnitt eine eindeutige Taktzeit und eine eindeutige Bearbeitungszeit angegeben werden können. Dies ist möglich, da diese Werte innerhalb eines Systemabschnitts manuell durch den Planer errechnet werden. Bei der Auswahl der Montageaufgaben einer Montagestation und die Zusammenfassung von Montagestationen in einem Systemabschnitt muss berücksichtigt werden, dass die aus dem Montagevorranggraphen vorgegebene Reihenfolge-Beziehung der Montageaufgaben nicht verletzt wird. Im Montagevorranggraphen sind die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen der Montageaufgaben in einem

Digraph modelliert. Eine ausführliche Erläuterung des Montagevorranggraphen ist in (Scholl 1995; Wiesbeck 2014) zu finden.

Innerhalb der Montagestationen werden drei unterschiedliche Arten von Modulen unterschieden. Diese sind das Transportmodul, das Prozessmodul und das Zuführmodul. In Abbildung 4.11 sind die Module am Beispiel einer Pressstation der Lernfabrik dargestellt. Abbildung 4.12 zeigt beispielhaft das Zuführmodul der Fügestation mit einem hellblauen Rahmen markiert. Es besteht aus einer Materialrutsche, über die Anbauteile in Kleinladungsträgern dem Prozessmodul zugeführt werden können. Das Zuführmodul ist über Schnellspanner mit der Montagestation verbunden und kann leicht ausgetauscht werden.

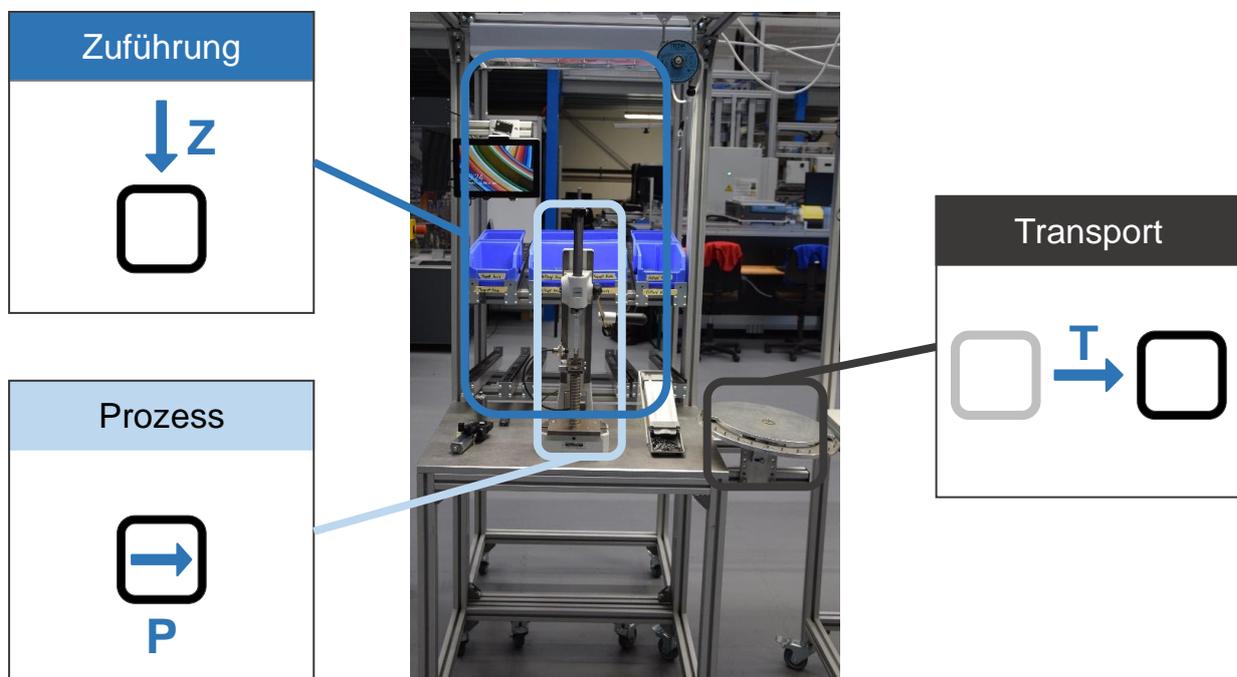


Abbildung 4.11: Transport-, Prozess und Zuführmodul am Beispiel einer Pressstation

Die Modularität der Montagestationen wird in zwei Dimensionen beschrieben. Zum einen werden die Montageaufgaben, welche ein Modul erfüllen muss definiert. Zum anderen wird die Hardware, durch welche die Montageaufgaben erfüllt werden, definiert. Die Montageaufgaben sind eindeutig einem der drei Module zuzuordnen. Das Transportmodul erledigt den Transport des Hauptbauteils aus der Lage im Übergabepunkt des vorgelagerten Montagestationskonzeptes in den Übergabepunkt des betrachteten Montagestationskonzeptes. Alle Prozesse die am Hauptbauteil durchgeführt werden,

sind im Prozessmodul gebündelt. Die Zuführung aller Anbauteile aus der Materialbereitstellung am Montagestationskonzept in das Prozessmodul (ausgenommen das Hauptbauteil) wird dem Zuführmodul zugeordnet.

Das Transportmodul der Fügestation in Abbildung 4.12 muss lediglich den Transport des Hauptbauteils aus der Werkstückaufnahme der vorgelagerten Schraubstation in die Einspannung der Fügestation sowie das Verspannen in der Werkstückaufnahme übernehmen. Das Prozessmodul beinhaltet das Fügen des Getriebedeckels, welcher durch einen Montagedruck zum Einrasten gebracht werden muss sowie die Anwesenheitskontrolle von Zahnrädern und Getriebedeckel. Die Zahnräder werden durch den Deckel im Getriebegehäuse fixiert. Das Zuführmodul beinhaltet die Zuführung der Zahnräder und des Getriebedeckels in die Werkstückaufnahme.

Auf Seiten der modularen Hardware wird in die Kategorien passive Hardware, Medienzuführung/Sensorik und Manipulatoren unterschieden.

- Die passive Hardware umfasst alle Hardware, die für den grundlegenden Aufbau der Montagestation verantwortlich ist, keine eigenständigen Bewegungen ausführt und keine Medien bzw. Daten überträgt. Beispiele für passive Hardware sind Profile, Tischplatten oder auch Rollenbahnen.
- Die Medienzuführung/Sensorik umfasst Hardware, welche genutzt wird um Medien oder Daten zu transportieren, zu erfassen oder auszugeben. Beispiele für

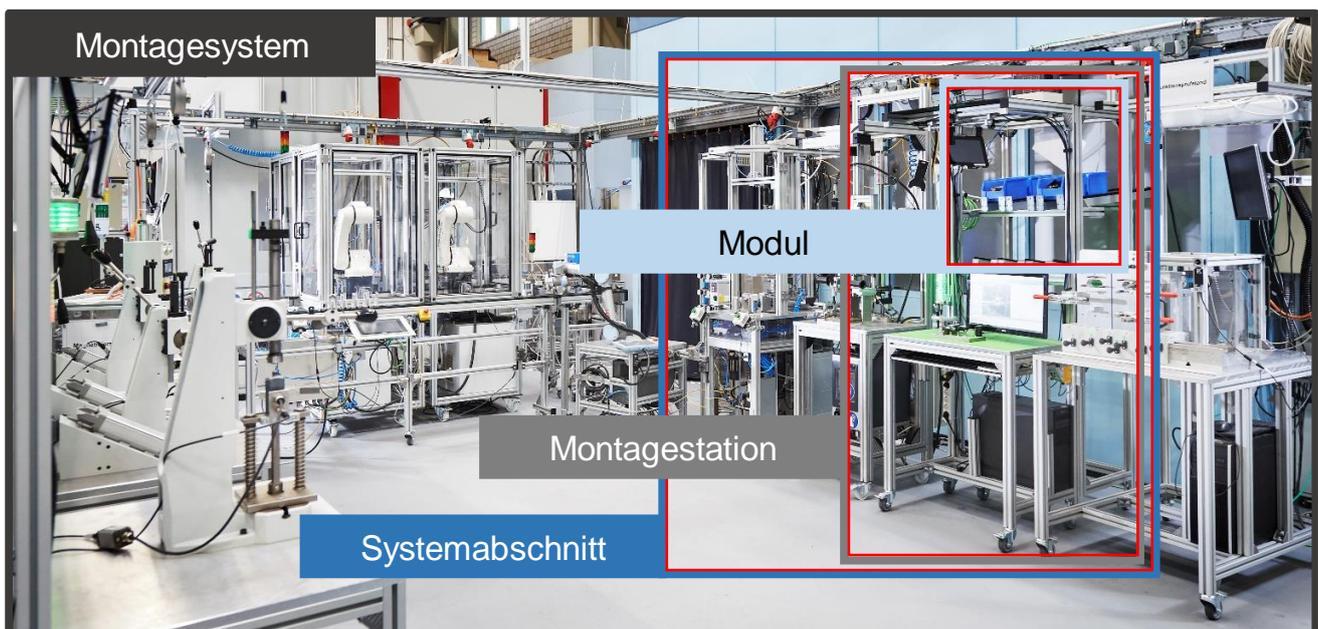


Abbildung 4.12: Betrachtungsebenen des modularen Montagesystems am Beispiel der Lernfabrik

diese Kategorie sind die Stromversorgung, Druckluft, Lichtschranken oder Bedienerschnittstellen.

- Die Manipulatoren umfassen Hardware, die eigenständige Bewegungen ausführt. Beispiele für diese Kategorie sind Roboter, Linearschlitten, Akkuschauber oder auch menschliche Werker. Passive Hardware und Medienzuführung/Sensorik sollten eindeutig einem der drei Module zugeordnet werden und durch eine möglichst geringe Anzahl Schnittstellen miteinander verbunden sein. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass Module einzeln gewandelt werden können. Für die Manipulatoren ist es in vielen Anwendungsfällen sinnvoll, modul- oder sogar montagestationsübergreifend eingesetzt zu werden.

In der in Abbildung 4.12 dargestellten Fügestation besteht die passive Hardware des Zuführungs- und des Prozessmoduls aus physisch getrennten Montageprofilen, Rollenbahnen, Beleuchtung und einer Tischplatte. Medienzuführung/Sensorik ist lediglich im Prozessmodul vorhanden und umfasst RFID-Sensorik für die Nachverfolgung der Motoren mit dem Ziel der Qualitätsdokumentation und Erhebung von Prozesskennzahlen sowie Strom- und Ethernetanschluss. Die Montagestation ist manuell ausgeführt. Ein Werker dient als Manipulator. Das Transportmodul enthält keine Hardware außer dem Werker. Innerhalb der Station führt der Werker sowohl die Zuführung, Prozess als auch den Transport des Werkstücks durch. Im gezeigten Beispiel nutzt der Werker die verbleibende Taktzeit, um an der vorgelagerten Schraubstation Handhabungsaufgaben zu übernehmen. Daher werden Schraub- und Fügestation als zusammenhängender Systemabschnitt betrachtet.

4.2.1.2 Skalierungsmechanismen

Der Erfolg der Planung des skalierbaren Montagesystems hängt wesentlich von der Entwicklung eines umfassenden Lösungsraums technischer und organisatorischer Realisierungen der Montageaufgaben ab. Als Leitlinie für die Erstellung der Lösungen dienen die Skalierungsmechanismen nach Eilers (Eilers 2015). Diese Skalierungsmechanismen werden für die Anwendung in der Methodik neu strukturiert in intrastationäre, interstationäre und organisatorische Skalierungsmechanismen (siehe Abbildung 4.13). Als intrastationäre Mechanismen werden die skalierbare Automatisierung, Stationsaufteilung und die Rekonfiguration von Stationen, bzw. Stationsmodulen definiert. Die Duplikation von Engpässen sowie die Duplikation der Linie werden als interstationäre Mechanismen definiert. Eine Anpassung der eingesetzten Anzahl Mitarbeiter und die

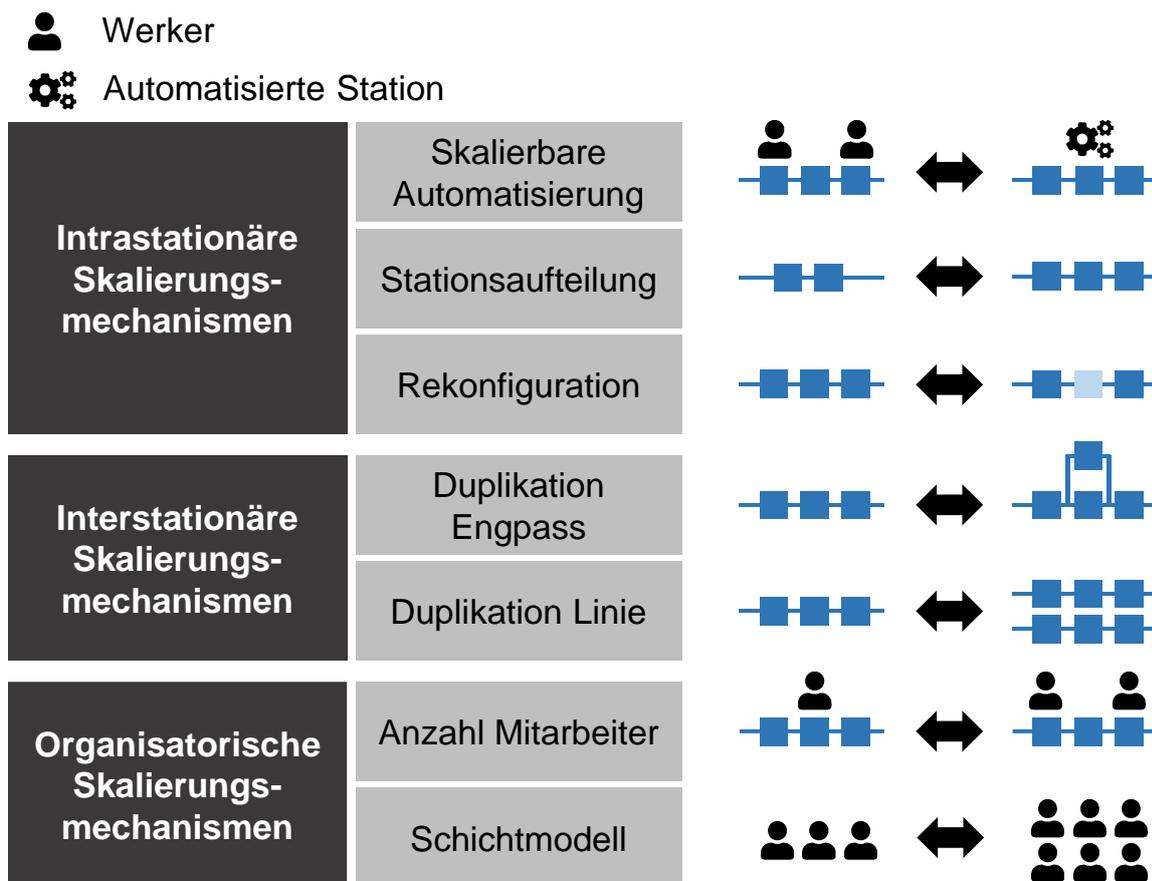


Abbildung 4.13: Skalierungsmechanismen in Anlehnung an (Eilers 2015)

Anpassung des Schichtmodells werden definiert als organisatorische Mechanismen. Die Auslagerung von Montageinhalten in die Vormontage bedeutet gemäß der Definition der Modularitätsebenen im vorherigen Unterkapitel eine Überschreitung der Systemgrenze des Montagesystems und wird daher nicht betrachtet.

Mit der Erstellung der Systemabschnittskonzepte wird die Voraussetzung für die Anwendung der intrastationären Skalierungsmechanismen geschaffen. Für die Umsetzung dieser Skalierungsmechanismen werden Änderungen bis auf Modulebene untersucht. Die interstationären Skalierungsmechanismen betrachten den Systemabschnitt als kleinste Einheit. In den organisatorischen Skalierungsmechanismen wird die vorhandene Hardware im Montagesystem nicht verändert. Mit Abschluss von Schritt 2.1 sind alle vorgedachten Änderungen durch die intrastationären Skalierungsmechanismen in den Systemabschnittskonzepten fixiert.

Die Entwicklung der Systemabschnittskonzepte ist in vier Schritte unterteilt (siehe Abbildung 4.14). Im ersten Schritt wird eine Stationslandkarte erstellt. Die Stationslandkarte spannt die Kombinationen aus Montageaufgaben und Automatisierungsgraden auf. Durch eine Analyse der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse werden im zweiten Schritt die Stationsfelder mit dem besten Nutzen-Hemmnis-Verhältnis identifiziert. Im dritten Schritt werden die ausgewählten Stationsfelder als Montagestationskonzepte ausgeplant. Basierend auf den ermittelten Kennzahlen der Montagestationskonzepte werden in Schritt 4 Systemabschnitte inklusive Wandlungsmatrizen gebildet. Ergebnis des Schritts 2.1 zur Entwicklung von Systemabschnittskonzepten sind die Steckbriefe der Systemabschnitte (siehe Abbildung 4.28) und die Wandlungskosten- und Wandlungsdauermatrizen (siehe Abbildung 4.30).

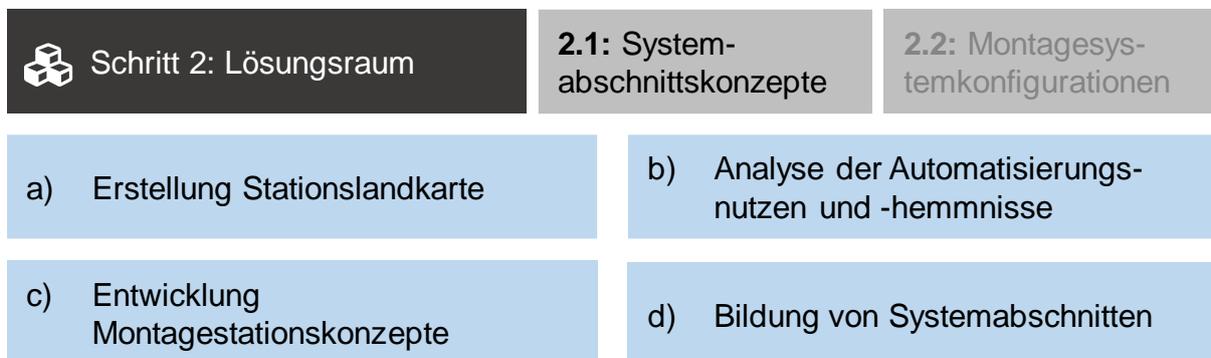


Abbildung 4.14: Prozess der Erstellung von Systemabschnittskonzepten

4.2.1.3 Erstellung Stationslandkarte

Die Stationslandkarte stellt die Kombinatorik möglicher Ausprägungen von Montagstationen dar. Es wird davon ausgegangen, dass jedes Modul einer Montagstation einzeln automatisiert werden kann. Daraus entstehen acht (2^3) mögliche Automatisierungsgrade pro Montagstation. Diese Dimension ist in den Spalten der Stationslandkarte abgebildet. Aus der Aufteilung der Montageaufgaben entstehen verschiedene Möglichkeiten für die Fähigkeiten einer Montagstation. Diese Dimension wird in den Zeilen der Stationslandkarte abgebildet. Um die Zeilenbeschriftung der Stationslandkarte erstellen zu können, muss zunächst eine Liste der Montageaufgaben, die das Montagesystem durchführen kann, erstellt werden. Der Umfang einer Montageaufgabe beinhaltet die Zuführung eines Anbauteils, bzw. die Verbindung eines Anbauteils mit dem Werkstück. Mit der Beschreibung einer Montageaufgabe wird ein Zielzustand beschrieben, ohne die konkrete Ausführung vorzugeben.

In der Lernfabrik werden unter anderen folgende Montageaufgaben erfüllt:

- Verschraubung des Getriebegehäuses mit dem Poltopf
- Einlegen von Zahnrad 1
- Einlegen von Zahnrad 2
- Anwesenheitskontrolle der Zahnräder
- Einlegen des Getriebedeckels
- Einpressen des Getriebedeckels
- Anwesenheitskontrolle des Getriebedeckels

Die Zeilen der Stationslandkarte ergeben sich aus der Kombinatorik der Anordnung von Montageaufgaben in Montagestationen. Ohne Berücksichtigung der Einschränkungen durch den Montagevorranggraphen gemäß der Erläuterungen in Unterkapitel 4.2.1.1 lässt sich die maximale Anzahl möglicher Felder der Stationslandkarte anhand der Anzahl pa der Montageaufgaben des Montagesystems berechnen. Die Zusammensetzung einer Montagestation aus n beliebigen Montageaufgaben lässt sich mit der Ziehung von n Kugeln aus einer Urne mit pa Kugeln ohne zurücklegen vergleichen. Die Anzahl der kombinatorisch möglichen Stationen lässt sich für diesen Fall durch den Binomialkoeffizienten $\binom{pa}{n}$ ausdrücken. Da im gegebenen Fall die Anzahl enthaltener Montageaufgaben beliebig ist, mit der Ausnahme, dass mindestens eine Montageaufgabe enthalten sein muss, lässt sich die Anzahl der möglichen Zusammensetzungen von Montageaufgaben aus einer Zeile des Pascalschen Dreiecks ermitteln. Unter Berücksichtigung der 8 Automatisierungsgrade kann die theoretische maximale Stationslandkarte aus $(2^{pa} - 1) * 8$ Feldern bestehen. Für das Beispiel der Lernfabrik mit insgesamt 14 Montageaufgaben resultiert daraus bereits eine Anzahl von 131.064 Stationsfeldern. Es ist offensichtlich, dass dies eine zu hohe Anzahl manuell zu planender Montagestationskonzepte ergibt.

Um die Komplexität der Planung zu reduzieren, werden schon bei der Erstellung der Stationslandkarte Kombinationen von Montageaufgaben ausgeschlossen. Zu diesem Zweck wird zunächst ausschließlich die Initiallösung in die Zeilen der Stationslandkarte eingetragen. Davon ausgehend wird der Lösungsraum durch Aufteilung, bzw. Zusammenfassen von Stationen erweitert. Die Entscheidung welche Stationen aufgeteilt, bzw. zusammengefasst werden sollten, hängt von zwei Faktoren ab. Zum einen kann mit

einer Umverteilung der Montageaufgaben Einfluss auf die Taktzeit der Montagesystemkonfiguration genommen werden. Zum anderen können leicht automatisierbare Montageaufgaben gezielt in einer eigenen Station isoliert werden um eine wirtschaftliche Automatisierung zu ermöglichen. Für die Umverteilung aus Gründen der Beeinflussung der Taktzeit gibt es zwei Triebfedern.

- Eine ungleichmäßige Austaktung
- Eine hohe Komplexität der Initiallösung des Montagesystems

Abweichungen einzelner Stationen vom Takt führen zu einer ineffizienten Auslastung des Montagesystems. Liegt die Prozesszeit einer Station über dem Takt, spricht man von Überlast. Liegt die Prozesszeit unter dem Takt spricht man von Leerzeit (Pröpster 2015). Überlasten lassen sich nur bei einer Berücksichtigung unterschiedlicher Bearbeitungszeiten je Variante oder einem Einsatz von Springern abbauen (Fisel 2019). Im vorliegenden Fall bestimmt somit die langsamste Prozesszeit den Takt. Ziel der Austaktung, auch Fließbandabstimmung genannt, ist es, Überlasten und Leerzeiten zu minimieren. Im vorliegenden Fall sollte daher die kürzeste Prozesszeit so nah wie möglich an der längsten Prozesszeit liegen. In diesem Fall wird versucht, durch Aufteilung der langsamen Stationen, bzw. Zusammenfassung der schnellen Stationen eine gleichmäßige Austaktung zu erreichen. Für weitergehende Ausführungen zur Fließbandabstimmung sei auf (Fisel 2019) verwiesen. Eine hohe Komplexität der Initiallösungen bei einer gleichzeitigen Prognose von Stückzahlerwartungen, die über die Leistung der Initiallösung hinausgehen, erfordert eine Aufteilung von Montageaufgaben auf mehrere Stationen. In diesem Zusammenhang gilt eine Station als komplex, wenn sie mindestens zwei Montageaufgaben umfasst. Maßgeblich für eine Umverteilung von Montageaufgaben zur Erhöhung der Automatisierbarkeit ist die Identifikation automatisierbarer Montageaufgaben. Eine detaillierte Analyse von Automatisierungsnutzen und -hemmnissen wird erst in einem späteren Schritt durchgeführt. An dieser Stelle werden lediglich Montageaufgaben an denen Bauteile mit einheitlichen Greifpunkten beteiligt sind und Montageaufgaben in denen einheitliche Prozesse genutzt werden, zusammengefasst.

In der Initiallösung der Lernfabrik sind die genannten Montageaufgaben auf eine Schraubstation und eine Fügestation aufgeteilt. Eine Zusammenfassung der Verschraubung mit einem Teil der Montageaufgaben der Fügestation in einer Montagestation ist, aufgrund der um 90 Grad unterschiedlichen Verbaurichtung zwischen Schrauben und Zahnrädern, bzw. dem Getriebedeckel, als nicht sinnvoll einzustufen. Denkbar ist eine Aufteilung der gemeinsamen Montage von Zahnrädern und Getriebedeckel (mit 1 markierte Zeile in Abbildung 4.15) auf zwei getrennte Stationen (mit 2 markierte Zeilen in Abbildung 4.15). Somit ließe sich die Taktzeit reduzieren und ggf. Vorteile erzielen in der technischen Umsetzung der Montage geschmierter Zahnräder und der Automatisierung der Zahnradmontage. Das Ergebnis der Stationsaufteilung ist in der Stationslandkarte von Abbildung 4.15 abgebildet. Der jeweilige Automatisierungsgrad der Ausgangslösung ist dunkel blau markiert.

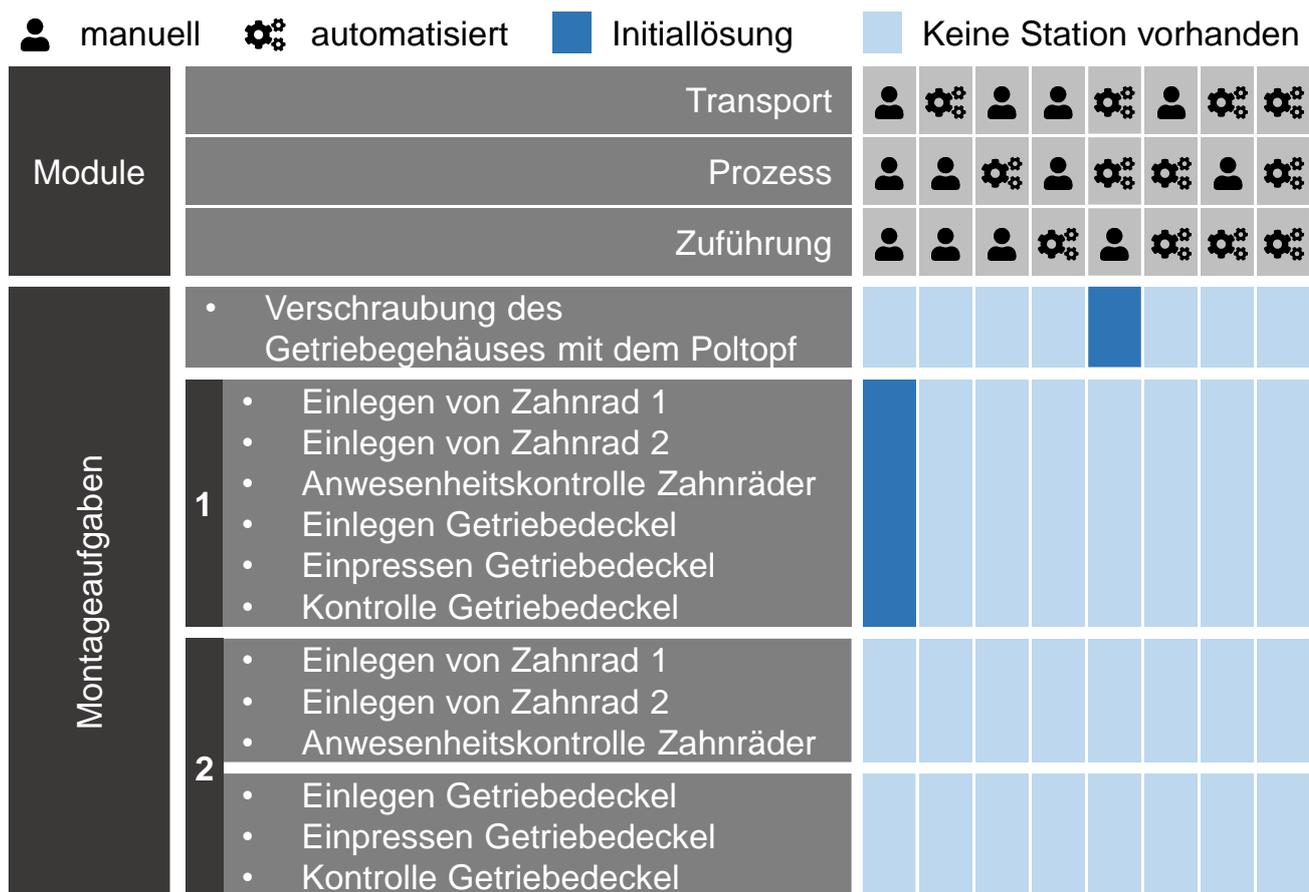


Abbildung 4.15: Ausschnitt aus der Stationslandkarte der Lernfabrik

4.2.1.4 Analyse der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse

In der Stationslandkarte werden diejenigen Felder markiert, für die Systemabschnittskonzepte entwickelt werden sollen. Zunächst wird die Initiallösung in die Stationslandkarte eingetragen. Die Analyse ist an die Nutzwertanalyse angelehnt (Zangemeister 1970). Resultat der Analyse ist die ausgefüllte Stationslandkarte.

In der Analyse der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse wird für jede Kombination automatisierter Module ein Wert für den Automatisierungsnutzen und ein Wert für das Automatisierungshemmnis ermittelt. Anhand dieser Werte wird entschieden, für welche Kombinationen Systemabschnittskonzepte entwickelt werden. Als Bewertungsgrundlage dient die Initiallösung des Montagesystems. Bei der Bewertung eines Felds der Stationslandkarte mit einem niedrigeren Automatisierungsgrad als die Initiallösung werden negative Werte ermittelt, da die Minderung des Automatisierungsnutzens, bzw. die Minderung des Automatisierungshemmnisses bewertet wird. Die Bewertung erfolgt anhand eines Katalogs der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse (Abbildung 4.16). Die Bewertung erfolgt auf einer Skala von 0 bis 5. Abbildung 4.17 bis Abbildung 4.24 zeigen die Vorgaben für die Einordnung auf der Skala für den jeweiligen Automatisierungsnutzen bzw. das jeweilige Automatisierungshemmnis. Die Gewichte der Nutzen und Hemmnisse werden mittels paarweisem Vergleich anwendungsspezifisch festgelegt.

+ Automatisierungsnutzen	- Automatisierungshemmnis
🕒 Reduktion Zykluszeit	🎲 Varianz
👤 Einsparung Mitarbeiter	🔧 Handhabung der Einzelteile
🏆 Erhöhung Qualität	⚙️ Anpass- und Justiertätigkeiten
🛠️ Ergonomie	📏 Fertigungsgenauigkeit

Abbildung 4.16: Automatisierungsnutzen und -hemmnisse

Im Folgenden sind die einzelnen Automatisierungsnutzen anhand des Beispiels der Fügestation der Lernfabrik aus der zweiten Zeile in Abbildung 4.15 beschrieben. Als Beispiel dient die Teilautomatisierung mit automatisierter Zuführung, automatisiertem Prozess und manuellem Transport.

Reduktion Zykluszeit: Die Reduktion der Zykluszeit einer Montagestation durch Automatisierung kann auf zwei Arten erfolgen. Zum einen kann die Zykluszeit durch eine Beschleunigung der einzelnen Montageaufgaben der Montagestationen reduziert werden. Zum anderen kann durch die Automatisierung einzelner Module eine parallelisierte Bearbeitung von Montageaufgaben innerhalb der Montagestation umgesetzt und somit die Zykluszeit der Montagestation reduziert werden.

🕒 Reduktion Zykluszeit	
Wert	Beschreibung
0	Keine Reduktion der Zykluszeit
1	Reduktion der Zykluszeit um 10 %
2	Reduktion der Zykluszeit um 20 %
3	Reduktion der Zykluszeit um 30 %
4	Reduktion der Zykluszeit um 40 %
5	Reduktion der Zykluszeit um mindestens 50 %

Abbildung 4.17: Skala des Automatisierungsnutzens „Reduktion Zykluszeit“

Für die Fügestation kann keine Parallelisierung erreicht werden, da der Mitarbeiter zunächst den Teiletransport durchführen muss und erst im Anschluss die Teile zugeführt werden können. Eine Beschleunigung der Montageaufgaben ist ebenso nicht zu erwarten, da sich Zahnrad und Getriebedeckel stark unterscheiden und voraussichtlich einen Greiferwechsel erfordern würden. Der Nutzen in dieser Kategorie wird mit 0 bewertet.

👤 Einsparung Mitarbeiter	
Wert	Beschreibung
0	Keine Einsparung
1	Einsparung der manuellen Arbeitszeit der Station von 20 %
2	Einsparung der manuellen Arbeitszeit der Station von 40 %
3	Einsparung der manuellen Arbeitszeit der Station von 60 %
4	Einsparung der manuellen Arbeitszeit der Station von 80 %
5	Vollständige Einsparung eines Mitarbeiters

Abbildung 4.18: Skala des Automatisierungsnutzens „Einsparung Mitarbeiter“

Einsparung Mitarbeiter: Die Einsparung von Mitarbeitern an einer Montagestation kann erreicht werden, wenn der Mitarbeiter an der Montagestation durch die Automatisierung eines Moduls nicht mehr die gesamte Zykluszeit an die Station gebunden ist, bzw. bei einer Vollautomatisierung gar nicht mehr benötigt wird.

Durch den weiterhin manuellen Transport kann auf den Mitarbeiter nicht vollständig verzichtet werden. Die Zuführung und der Prozess machen allerdings den wesentlichen Teil in Höhe von ca. 60 % der Montageaufgaben aus. Der Mitarbeiter wäre also frei, für einen Teil des Taktes Montageaufgaben an einer benachbarten Station zu übernehmen. Der Nutzen wird mit 3 bewertet.

Erhöhung Qualität: Durch die Automatisierung, insbesondere des Prozessmoduls kann eine Erhöhung der Qualität erreicht werden. Unter diesem Automatisierungsnutzen sind sowohl Verbesserungen durch eine erhöhte Wiederholgenauigkeit, höhere Präzision als auch die Möglichkeit der Qualitätsdokumentation durch Automatisierung zusammengefasst.

Erhöhung Qualität	
Wert	Beschreibung
0	Keine Erhöhung der Qualität
1	Leichte Erhöhung von Wiederholgenauigkeit und/ oder Präzision, bzw. teilweise Dokumentation von Qualitätsmerkmalen
2	Mäßige Erhöhung von Wiederholgenauigkeit und/ oder Präzision, bzw. Möglichkeit zur umfassenden Dokumentation von Qualitätsmerkmalen
3	Mittlere Erhöhung von Wiederholgenauigkeit und/ oder Präzision, bzw. umfassende, automatisierte Dokumentation von Qualitätsmerkmalen
4	Starke Erhöhung von Wiederholgenauigkeit und/ oder Präzision, bzw. Möglichkeit zur vollständigen Dokumentation von Qualitätsmerkmalen
5	Vollständige Erreichung der Anforderungen von Wiederholgenauigkeit und Präzision, bzw. vollständige, automatisierte Doku. von Q.-merkmalen

Abbildung 4.19: Skala des Automatisierungsnutzens „Erhöhung Qualität“

An die Zuführung und Montage der Zahnräder und des Getriebedeckels werden keine speziellen Anforderungen hinsichtlich Präzision gestellt. Lediglich die Montage der korrekten Teile muss überprüft werden. Dieser Punkt wird in der manuellen Ausführung durch eine manuelle Sichtprüfung realisiert und durch den Werker im MES quittiert.

Dieses Vorgehen ermöglicht eine umfassende Dokumentation von Qualitätsmerkmalen. Durch die Automatisierung des Prozessmoduls würde dieser Schritt automatisiert, was zu einer vollständigen, automatisierten Dokumentation der Qualitätsmerkmale führen würde. Der zusätzliche Nutzen wird mit 3 bewertet.

Ergonomie: Um beispielsweise das Heben schwerer Lasten oder monotone Tätigkeiten zu vermeiden, kann die Automatisierung einzelner Module dabei helfen die Ergonomie eines Arbeitsplatzes zu erhöhen.

+ Ergonomie	
Wert	Beschreibung
0	Keine Verbesserung der Ergonomie
1	Vermeidung monotoner oder Stress verursachender Arbeitsinhalte
2	Vermeidung des regelmäßigen Hebens von Lasten über 10 kg
3	Vermeidung des regelmäßigen Hebens von Lasten über 20 kg
4	Vermeidung von Überkopf-Arbeit
5	Vermeidung des regelmäßigen Hebens von Lasten über 30 kg

Abbildung 4.20: Skala des Automatisierungsnutzens „Ergonomie“

Die an der Fügestation verbauten Spritzgussteile sind wenige Gramm schwer und werden auf einer für den Werker angenehmen Höhe montiert. Der durch die Automatisierung entstehende Nutzen wird daher mit 0 bewertet.

Die Automatisierungshemmnisse werden im Folgenden beschrieben:

Varianz: Unterscheiden sich die Varianten eines Produktes stark, kann dies ein Automatisierungshemmnis darstellen. Unterschiedliche geometrische Abmessungen erschweren das Handling. Verschiedene Arbeitsinhalte je Variante sorgen für eine höhere Komplexität im Programmablauf. Werden an einer Station mehrere Teile montiert, ist auch die Varianz zwischen den Teilen einer Variante ein Automatisierungshemmnis.

An der Fügestation werden viele unterschiedliche Zahnräder und Getriebedeckel verbaut. Zudem gibt es Varianten mit nur einem Zahnrad, als auch Varianten mit zwei Zahnrädern. In Summe müssen 10 unterschiedliche Einzelteile gehandhabt werden. Die geometrischen Abmessungen von Zahnrad zu Getriebedeckel sind stark unterschiedlich. Das Hemmnis wird mit 5 bewertet.

 Varianz	
Wert	Beschreibung
0	Nur ein Bauteil muss gehandhabt werden
1	Handhabung von höchstens 3 Bauteilen mit ähnlichen geometrischen Abmessungen
2	Handhabung von höchstens 3 Bauteilen mit abweichenden geometrischen Abmessungen
3	Handhabung von höchstens 8 Bauteilen mit ähnlichen geometrischen Abmessungen
4	Handhabung von höchstens 8 Bauteilen mit abweichenden geometrischen Abmessungen
5	Handhabung von höchstens mehr als 8 Bauteilen mit abweichenden geometrischen Abmessungen

Abbildung 4.21: Skala des Automatisierungshemmnisses „Varianz“

 Handhabung der Einzelteile	
Wert	Beschreibung
0	Alle Einzelteile weisen den gleichen definierten Greifpunkt auf und werden in eindeutig definierter Lage bereitgestellt
1	Mindestens ein Einzelteil weist keinen definierten Greifpunkt auf
2	Mindestens ein Einzelteil ist biegeschlaff
3	Die Teile werden ohne definierte Orientierung bereitgestellt
4	Mindestens ein Einzelteil ist biegeschlaff und wird ohne eindeutige Orientierung bereitgestellt
5	Mindestens ein Einzelteil ist biegeschlaff, ohne definierten Greifpunkt und wird unorientiert bereitgestellt

Abbildung 4.22: Skala des Automatisierungshemmnisses „Handhabung der Einzelteile“

Handhabung der Einzelteile: Insbesondere biegeschlaffe Teile oder Werkstücke ohne definierte Greifpunkte erschweren eine automatisierte Handhabung. Auch die Teilebereitstellung kann die automatisierte Handhabung erschweren, z.B. bei einer nicht definierten Orientierung der zugeführten Teile.

Zahnräder und Getriebedeckel haben definierte Greifpunkte. Im initialen Aufbau werden die Einzelteile als Schüttgut bereitgestellt. Das Hemmnis wird mit 3 bewertet.

Anteil Anpass-/Justiertätigkeiten: Montageaufgaben, die einen hohen Anteil an Anpass- und Justiertätigkeiten aufweisen, erschweren die Automatisierung. Diese Aufgaben erfordern zum Teil aufwendige Sensorik zur Erfassung des Justierergebnisses und erschweren die Automatisierung.

☰ Anpass- und Justiertätigkeiten	
Wert	Beschreibung
0	Keine Anpass- und Justiertätigkeiten
1	Einfache Anpasstätigkeit ohne den Einsatz von Sensorik erforderlich
2	Einfache Anpasstätigkeit unter Einsatz eines Sensors erforderlich
3	Anpruchsvolle Anpasstätigkeit unter Einsatz eines Sensors erforderlich
4	Komplexe Anpasstätigkeit unter Einsatz eines Sensors erforderlich
5	Komplexe Justage unter Nutzung von Multisensorik erforderlich

Abbildung 4.23: Skala des Automatisierungshemmnisses „Anpass- und Justiertätigkeiten“

Für die Montageaufgaben an der Fügestation fallen keine Anpass-/Justiertätigkeiten an. Das Hemmnis wird mit 0 bewertet.

Fertigungsgenauigkeit der Einzelteile: Durch eine mangelnde Genauigkeit der Einzelteile kann eine Automatisierung erschwert werden. Die zur Handhabung verwendete Aktorik muss die mangelnde Genauigkeit ausgleichen und bei ggf. erschwerter Fügeoperation den eingesetzten Druck anpassen.

🔧 Fertigungsgenauigkeit	
Wert	Beschreibung
0	Keine Einschränkungen durch Fertigungsungenauigkeiten
1	Fertigungsungenauigkeit geringer als die Toleranz am Greifpunkt
2	Fertigungsung. in der Größenordnung der Toleranz am Greifpunkt
3	Fertigungsungenauigkeit geringer als die Fügetoleranz
4	Fertigungsungenauigkeit in der Größenordnung der Fügetoleranz
5	Fertigungsungenauigkeit größer als die Fügetoleranz

Abbildung 4.24: Skala des Automatisierungshemmnisses „Fertigungsungenauigkeit“

Die Toleranzen des Getriebes sind ausreichend groß, dass sich keine Einschränkung für die automatisierte Handhabung ergibt. Das Hemmnis wird mit 0 bewertet.

Aus der Bewertung aller Felder der Stationslandkarte in der Analyse der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse, wird eine Rangfolge der einzelnen Felder erstellt. In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Planungskapazitäten werden nur für die Felder mit der höchsten, positiven Differenz aus Automatisierungsnutzen und Automatisierungshemmnis Systemabschnittskonzepte entwickelt. Die gewählten Felder, für die eigene Stationskonzepte erstellt werden, sind in Abbildung 4.25 dunkel blau markiert.

4.2.1.5 Erstellung Montagestationskonzepte

Der Skalierungsmechanismus „Stationsaufteilung“ wird implizit durch die Stationslandkarte berücksichtigt. Bei der Auswahl der relevanten Montageaufgaben je Montagestation wird die Stationsaufteilung bereits durchgeführt. Bei der Festlegung der wichtigsten Stationsfelder basierend auf der Analyse der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse wird der Skalierungsmechanismus „Skalierbare Automatisierung“ abgebildet. Der Skalierungsmechanismus „Rekonfiguration“ wird genutzt, indem die unterschiedlichen Mo-

		 manuell	 automatisiert	 Konzept	 Initiallösung	 Kein Konzept			
Module	Transport								
	Prozess								
	Zuführung								
Montageaufgaben	<ul style="list-style-type: none"> Verschraubung des Getriebegehäuses mit dem Poltopf 								
	<ul style="list-style-type: none"> Einlegen von Zahnrad 1 Einlegen von Zahnrad 2 Anwesenheitskontrolle Zahnräder Einlegen Getriebedeckel Einpressen Getriebedeckel Kontrolle Getriebedeckel 								
	<ul style="list-style-type: none"> Einlegen von Zahnrad 1 Einlegen von Zahnrad 2 Anwesenheitskontrolle Zahnräder 								
	<ul style="list-style-type: none"> Einlegen Getriebedeckel Einpressen Getriebedeckel Kontrolle Getriebedeckel 								

Abbildung 4.25: Ausschnitt aus der vollständig ausgefüllten Stationslandkarte der Lernfabrik

dule innerhalb ihres Feldes der Stationslandkarte verschieden umgesetzt werden können. Dieser Skalierungsmechanismus wird benötigt um auf Änderungen der Rezeptoren *Produkt* oder *Qualität* zu reagieren. In Abhängigkeit der Anforderungen, welche aus den aggregierten Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen resultieren, kann es erforderlich sein, für das selbe Stationsfeld unterschiedliche Montagestationskonzepte zu entwickeln, welche jeweils in einem anderen Bereich der Rezeptor-Kennzahlen betrieben werden können. Beim Eintritt eines solchen Wandels wird die Wandlung eines Systemabschnitts bei gleichbleibender Aufteilung der Montageaufgaben und Beibehaltung des Automatisierungsgrads als „Rekonfiguration“ bezeichnet.

Falls sich in Abhängigkeit einzelner Varianten des Produktes unterschiedliche Anforderungen an das Montagesystem ergeben, muss eine grundlegende Entscheidung getroffen werden. Einerseits kann für die betroffenen Montageaufgaben ein flexibles Montagestationskonzept geplant werden, das alle Varianten abbilden kann. Andererseits können mehrere Montagestationskonzepte für die gleichen Montageaufgaben geplant werden, die jeweils auf bestimmte Varianten spezialisiert sind. In letzterem Fall wird das Montagesystem gedanklich in mehrere Sub-Montagesysteme entlang der Montageaufgaben aufgespalten. Die Systemabschnitte der Sub-Montagesysteme mit gleichen Montageaufgaben unterscheiden sich dahingehend, dass sie jeweils unterschiedliche Varianten montieren können. Jedes zu modellierende Montagesystem kann alle seine Varianten auf denselben Stationen montieren.

Eine wichtige Entscheidung für die Umsetzung des Stationsfeldes ist die Auswahl der Manipulatoren. Nachdem festgelegt wurde, welche Varianten auf der Station abgebildet werden müssen, werden die erforderlichen Handhabungsoperationen aus den Montageaufgaben des Stationsfeldes abgeleitet und jeweils einem Manipulator zugeordnet.

Eine dedizierte Fügestation ausschließlich für geschmierte Zahnräder wird aufgrund des erwarteten geringen Anteils an der gesamten Stückzahl ausgeschlossen. Es werden alle Stationen des Montagesystems so ausgelegt, dass auf Ihnen alle Varianten montiert werden können. Für das Stationsfeld mit manuellem Transport, automatisiertem Prozess und automatisierter Zuführung mit den Prozessaufgaben *Einlegen Getriebedeckel*, *Einpressen Getriebedeckel* und *Kontrolle Getriebedeckel* wird eine Umsetzung mittels eines Leichtbauroboters und einer Industriekamera gewählt.

Der erste Schritt in der Erstellung eines Montagestationskonzeptes besteht aus der Anfertigung einer groben Skizze des Stationsaufbaus. Aus der Skizze wird insbesondere

der Aufbau der drei Module Zuführung, Transport und Prozess ersichtlich. Basierend auf der Stationskizze wird eine aggregierte Stückliste der für die Umsetzung der Station benötigten Hardware erstellt. Nächster Schritt ist die Kostenbewertung. Während der Planung soll lediglich das günstigste Konzept identifiziert werden. Eine Vollkostenrechnung ist nicht erforderlich. Bei der Abschätzung der Betriebskosten werden lediglich diejenigen Kostenblöcke berücksichtigt, von denen eine deutliche Unterscheidung zwischen verschiedenen Konzepten erwartet wird. Welche Kostenblöcke dies sind, hängt vom spezifischen Anwendungsfall ab. Die Anschaffungskosten für die verwendeten Betriebsmittel werden unabhängig vom Anwendungsfall immer berücksichtigt. Grundlage für diese Bewertung ist die erstellte Liste der benötigten Hardwaremodule. Die Kosten dieser Module werden anhand von Erfahrungswerten und Angeboten von Systemlieferanten abgeschätzt. Aus der anwendungsfallspezifischen Abschreibungsdauer der jeweiligen Hardwaremodule ergeben sich die jährlichen Fixkosten.

Für die Umsetzung der betrachteten Fügestation der Lernfabrik zur Montage des Getriebedeckels wird ein modulares Konzept gewählt. In einem Materialwagen werden die Deckel in Trays in definierter Orientierung im Zuführmodul bereitgestellt. Der Roboter befindet sich zwischen Montagetablett und Zuführmodul. Die Stationskizze inklusive

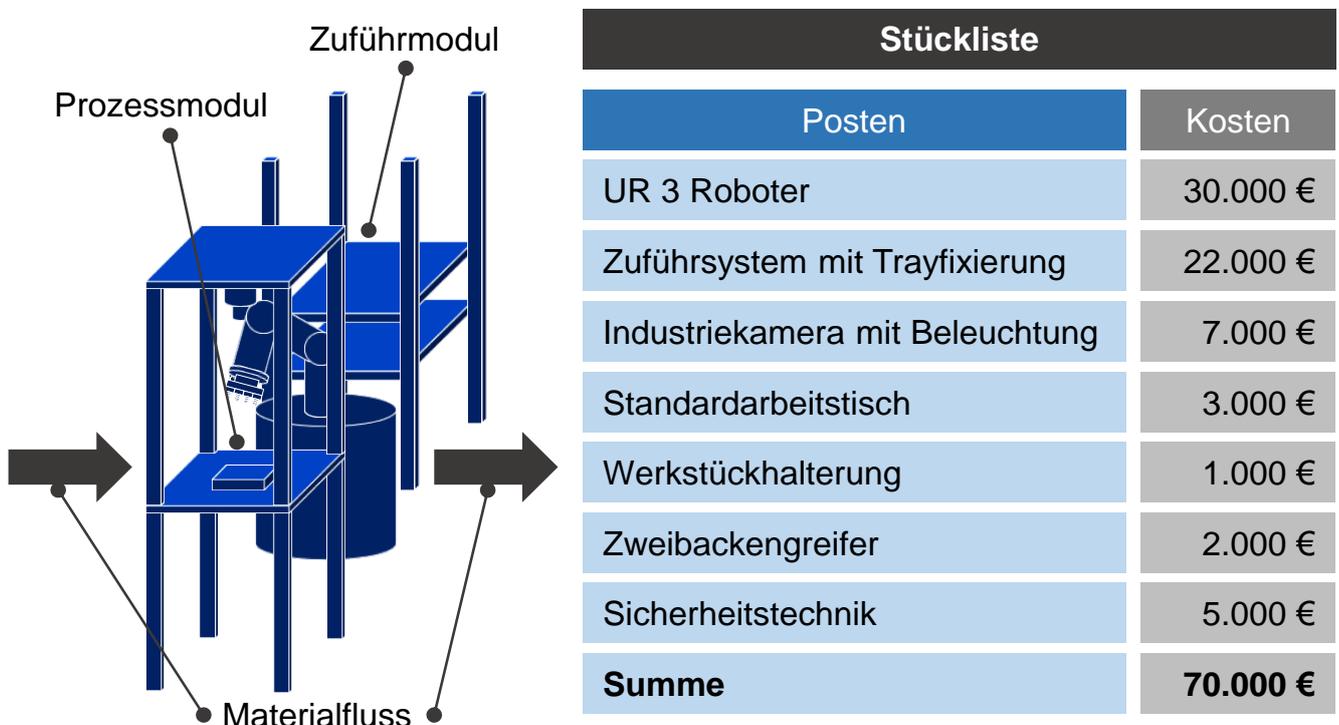


Abbildung 4.26: Skizze des Stationskonzeptes für das Fügen des Getriebedeckels mit automatisierter Zuführung und manuellem Transport

Stückliste und geschätzten Hardwarekosten ist in Abbildung 4.26 dargestellt. Das Stationskonzept erfüllt alle produktseitigen Anforderungen aus den Rezeptor-Kennzahlen *Poltopflänge* und *Geschmierte Zahnräder*. Die Lernfabrik hat als relevante Kostenarten für die Berechnung der Betriebskosten die Anschaffungskosten, Instandhaltungskosten und die Personalkosten festgelegt. Die Hardware wird über 8 Jahre abgeschrieben. Für automatisierte Komponenten werden pauschal jährliche Instandhaltungskosten von 10% der Anschaffungskosten angenommen. Die Instandhaltungskosten der manuellen Komponenten werden vernachlässigt. Abbildung 4.27 zeigt die Ergebnisse der Planung des Montagestationskonzeptes für das teilautomatisierte Fügen des Getriebedeckels in Form eines Stationssteckbriefs.

Name		<i>Teilautomatisiertes Fügen des Getriebedeckels</i>	
	▪ Montageaufgaben	<ul style="list-style-type: none"> • Einlegen Getriebedeckel • Einpressen Getriebedeckel • Kontrolle Getriebedeckel 	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man, aut, aut</i>	
	▪ Durchlaufzeit	<i>00:13</i>	
	▪ Taktzeit	<i>00:13</i>	
	▪ Jährliche Fixkosten	<i>15.750 €</i>	
	▪ Wandlungspotenzialwert	<i>0,5</i>	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

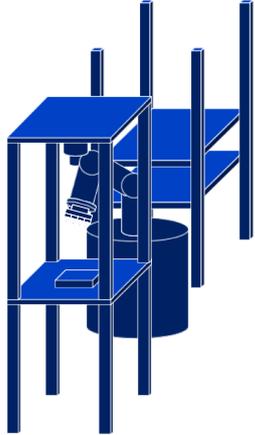


Abbildung 4.27: Stationssteckbrief für Teilautomatisiertes Fügen des Getriebedeckels

An die Erstellung der Stückliste schließt sich die Berechnung der Zeiten an. Die Berechnung von Bearbeitungszeit und Taktzeit orientiert sich an dem erstellten Ablaufplan des Montagestationskonzeptes. Für Montageaufgaben werden Erfahrungswerte und Herstellerangaben verwendet. Die Handhabungsaufgaben werden je nach Art des gewählten Manipulators ermittelt. Für manuelle Handhabung wird die MTM-Methode (Maynard & Stegemerten et al. 1948) verwendet. Die Handhabungszeit bei Einsatz eines Roboters wird durch die Anwendung der RTM-Methode (Choi & Ip 1999) ermittelt.

Handhabungsoperationen durch Manipulatoren, welche aus Linearachsen konfiguriert werden, können anhand von Verfahrenswegen, Beschleunigungswerten und Greifzeiten ermittelt werden.

Die quantitative Bewertung der Montagestationskonzepte umfasst alle im Steckbrief des Systemabschnittskonzepts (siehe Abbildung 4.28) aufgeführten Kennzahlen. Die Montageaufgaben des Montagestationskonzepts ergeben sich direkt aus der Stationslandkarte. Der Automatisierungsgrad ist eine Voraussetzung für die Berechnung der variablen Kosten in Schritt 3 der Gesamtmethodik, der Berechnung der Skalierungsstrategie. Im Steckbrief wird der Automatisierungsgrad als manuell angegeben, falls das Montagestationskonzept einen Werker als Manipulator beinhaltet, selbst wenn dieser nicht über die gesamte Taktzeit genutzt wird. Ein Montagestationskonzept ist automatisiert, wenn es keinen Werker benötigt. Dieser Definition liegt der Umstand zu Grunde, dass ein Werker in der Linie bezahlt wird, unabhängig davon ob er voll ausgelastet ist oder nicht. Eine Teilautomatisierung lohnt sich folglich erst in der Betrachtung von Systemabschnitten, die einem Werker mehrere Montagestationen zuordnen.

Die Restriktionen eines Montagestationskonzepts beziehen sich jeweils auf eine Rezeptor-Kennzahl. Eine Restriktion wird definiert durch die zugehörige Rezeptor-Kennzahl, einen Grenzwert der Rezeptor-Kennzahl und die Angabe ob der Grenzwert eine obere oder untere Schranke angibt.

4.2.1.6 Bildung von Systemabschnittskonzepten

Basierend auf den in Unterkapitel 4.2.1.5 bewerteten Montagestationskonzepten werden Systemabschnittskonzepte gebildet. In diesem Schritt werden benachbarte Montagestationskonzepte, deren Manipulatoren nicht voll ausgelastet sind, in einem gemeinsamen Systemabschnittskonzept zusammengefasst. Die ermittelten Werte der Montagesystemkonzepte werden in die entsprechenden Werte des resultierenden Systemabschnittskonzeptes überführt. Der Automatisierungsgrad aut_s eines Systemabschnittskonzeptes s wird als der Anteil der automatisierten Module im gesamten Systemabschnitt gemäß 4-10 definiert. Montagestationskonzepte, die nicht Teil eines integrierten Systemabschnittskonzeptes sind, werden als Systemabschnittskonzepte mit lediglich einer Montagestation neu deklariert.

$$aut_s = \frac{\text{Anzahl automatisierter Module}}{\text{Gesamtzahl der Module im Systemabschnitt}} \quad 4-10$$

Der Werker, welcher den Teiletransport an der Montagestation „Teilautomatisiertes Fügen des Getriebedeckels“ durchführt, ist nur für 3 Sekunden der 13 Sekunden Bearbeitungszeit aktiv. Als Manipulator ist er nicht voll ausgelastet. Den Teiletransport kann auch der Werker der benachbarten manuellen Station zum Einlegen der Zahnräder übernehmen. Die beiden Montagestationen werden zusammengefasst. Es resultiert ein neuer Systemabschnitt mit den in Abbildung 4.28 dargestellten Kennzahlen.

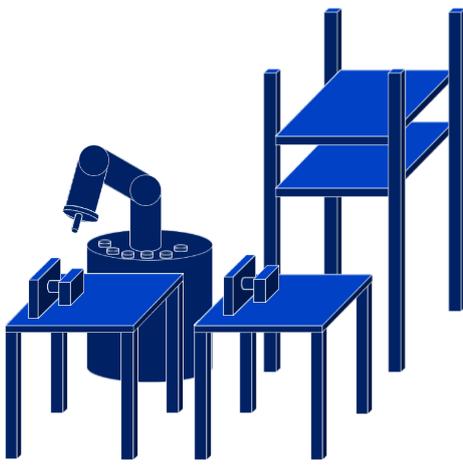
Name		Teilautomatisierte Montage	
	▪ Montageaufgaben	<ul style="list-style-type: none"> - Schraubaufgaben in der Montage auf der Längsseite (3) - Fügeaufgaben in der Montage auf der Längsseite (4) - Schraubaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (5) - Fügeaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (6) 	
	▪ Automatisierungsgrad	20 %	
	▪ Bearbeitungszeit	15:40	
	▪ Taktzeit	8:25	
	▪ Wartezeit	3 Monate	
	▪ Aufbaukosten	32.900 €	
	▪ Abbaukosten	1.500 €	
	▪ Jährliche Fixkosten	89.780 €	
	▪ Restriktionen	keine	

Abbildung 4.28: Steckbrief für „Teilautomatisiertes Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel“

Nächster Schritt ist die Ermittlung von Wandlungskosten wks und Wandlungsdauern wd . Die Wandlungskosten $wks_{r \rightarrow s}$ von Systemabschnitt r auf Systemabschnitt s setzen sich aus den Wandlungsobjektkosten $wks_{r \rightarrow s}^{obj}$, direkten Wandlungsprozesskosten $wks_{r \rightarrow s}^{dip}$ und indirekten Wandlungsprozesskosten $wks_{r \rightarrow s}^{inp}$ zusammen (siehe Unterkapitel 2.1.2.6 und Formel 4-11).

$$wks_{r \rightarrow s} = wks_{r \rightarrow s}^{obj} + wks_{r \rightarrow s}^{inp} + wks_{r \rightarrow s}^{dip}$$

Die Wandlungsdauer resultiert aus der benötigten Zeit, welche von der Auswahl eines Systemabschnittskonzeptes als neue Realisierung bis zur Inbetriebnahme vergeht. Diese Verzögerung resultiert aus Beschaffungszeiten der Hardware und der benötigten Entwicklungszeit. Bei der Berechnung der Wandlungskosten werden für die Wandlungsobjektkosten beim Aufbau eines Montagesystemabschnitts s die Kosten für das Engineering ek_s ermittelt. Zu diesem Zweck wurden Kriterien definiert, anhand derer sich die Komplexität der Automatisierungslösung einordnen lässt. In Absprache mit einem Anbieter für Automatisierungslösungen wurden Einschätzungen der Kosten für Extremfälle der Komplexität erhoben (A_Blumenschein 2018). Abbildung 4.29 zeigt die Berechnungsvorschrift, anhand derer die Engineeringkosten einer Automatisierungslösung geschätzt werden. Beim Abbau wird eine außerordentliche Abschreibung der Betriebsmittel des Systemabschnitts r in Abhängigkeit des Wandlungspotentialwertes wpw_r vorgenommen. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zu Grunde, dass Betriebsmittel mit einem hohen Wandlungspotentialwert mit geringen Änderungen einer neuen Nutzung zugeführt werden können. Betriebsmittel mit einem niedrigen Wandlungspotentialwert müssen der Annahme zufolge im schlimmsten Fall entsorgt werden. Beim Abbau eines Systemabschnitts r entstehen Wandlungsobjektkosten $wks_{r \rightarrow s}^{obj}$ in Höhe der Hälfte der Anschaffungskosten $IK_{r \rightarrow s}$ (Näherung für den verbleibenden Buchwert)

Kriterium	Wert	Kosten [€]
Anz. Produktvarianten mit spezifischem Ablauf	#	$1000 + (\# - 1) * 500$
Anz. Handhabungsoperationen pro Produktvariante	#	$1000 + (\# - 1) * 200$
Anz. Steuerungen mit denen kommuniziert wird	#	$6000 * \#$
Anz. Werkzeuge, bzw. Greifer	#	$1000 * \#$
MRK: Grad der Kollaboration	(1-5)	$2000 * \#$
Einbindung MES	(ja; nein)	$ja = 8000; nein = 0$
Einbindung Sicherheitstechnik	(ja; nein)	$ja = 4000; nein = 0$
Kraftsteuerung erforderlich	(ja; nein)	$ja = 6000; nein = 0$
Sehr hohe Präzisionsanforderung vorhanden	(ja; nein)	$ja = 5000; nein = 0$
Summe		EK_s

Abbildung 4.29: Schätzung der Engineeringkosten in Abhängigkeit der Komplexität der Automatisierungslösung

der bei der Wandlung von Systemabschnitt r zu Systemabschnitt s entfernten Betriebsmittel, abzüglich der Hälfte der Anschaffungskosten, multipliziert mit dem Wandlungspotentialwert des Systemabschnitts. Die Wandlungsobjektkosten $wks_{r \rightarrow s}^{obj}$ für die Wandlung von Systemabschnitt r zu Systemabschnitt s ergeben sich gemäß Formel 4-12.

$$wks_{r \rightarrow s}^{obj} = 0,5 * IK_{r \rightarrow s} * (1 - wpw_r) + ek_s \quad 4-12$$

Die direkten Wandlungsprozesskosten $wks_{r \rightarrow s}^{dip}$ für die Wandlung von Systemabschnitt r zu Systemabschnitt s ergeben sich aus den Abbaukosten abk_r des entfernten Systemabschnitts r und den Aufbaukosten auk_s des hinzugefügten Systemabschnitts s . Auf- und Abbaukosten entstehen aus dem Technikeraufwand, der für die eigentliche Durchführung der Wandlung benötigt werden.

$$wks_{r \rightarrow s}^{dip} = abk_r + auk_s \quad 4-13$$

Die indirekten Wandlungsprozesskosten $wks_{r \rightarrow s}^{inp}$ für die Wandlung von Systemabschnitt r zu Systemabschnitt s verhalten sich proportional zur Stillstandszeit $sz_{r \rightarrow s}$ die bei der Wandlung entsteht und den Anschaffungskosten ak_s des Systemabschnitts s .

$$wks_{r \rightarrow s}^{inp} = sz_{r \rightarrow s} * ak_s \quad 4-14$$

Die Wandlungsdauer ergibt sich aus der Summe der erwarteten Beschaffungszeit und der erwarteten Engineeringdauer, welche analog zu den Engineeringkosten ermittelt wird.

Der Wandel zwischen zwei Systemabschnitten, die sich lediglich in einem Modul unterscheiden, ist günstiger als der Wandel zweier gänzlich verschiedener Systemabschnitte. Daher werden alle durch die Montageaufgaben beschränkten zulässigen Wandlungsmöglichkeiten gesondert betrachtet. Es werden die Wandlungskosten $wks_{r \rightarrow s}$ und die Wartedauer $wd_{r \rightarrow s}$ für die Wandlung zwischen zwei Systemabschnitten r und s basierend auf Formel 4-11 bis Formel 4-14 bestimmt. Die Wandlungskosten für alle Wandlungen zwischen den Systemabschnitten werden in der Wandlungskostenmatrix auf Systemabschnittsebene WKS_a modelliert. Analog umfasst die Wandlungsdauermatrix auf Systemabschnittsebene WDS_a die Wandlungsdauern zwischen den Systemabschnitten der Teilmenge a der beteiligten Montageaufgaben. Ergebnis des Planungsschritts 2.1 sind die Steckbriefe und die Wandlungsmatrizen der Systemabschnittskonzepte.

Für die vier betrachteten Montageaufgaben der Lernfabrik ergeben sich vier unterschiedliche Systemabschnittskonzepte. Basierend auf den Anschaffungskosten, dem Wandlungspotenzialwert und der Lieferzeit der benötigten Komponenten sowie dem Engineeringaufwand für die Umsetzung der Gesamtlösung, ergeben sich jeweils die Wandlungskosten- und dauern (Abbildung 4.30). Es wird davon ausgegangen, dass auf der manuellen Montagestation sowohl alle vier Montageaufgaben als auch die jeweils einzelnen Montageaufgaben durchgeführt werden können. Die Wandlungen zwischen Systemabschnittskonzept 1 und 2, bzw. von 3 oder 4 auf 1 sind daher im Vergleich zu

Wandlungskosten $wks_{r \rightarrow s}$ [€]		Wandlungsdauer $wd_{r \rightarrow s}$ [Monate]		👤 manuell	⚙️ automatisiert	⊖ nicht vorhanden	
Zuführung	Prozess	Transport		1	2	3	4
1	• Einlegen von Zahnrad 1	• Einlegen von Zahnrad 2	• Kontrolle Zahnräder	👤 👤 👤	-	-	-
	• Einlegen Getriebedeckel	• Einpressen Getriebedeckel	• Kontrolle Getriebedeckel				
2	• Einlegen von Zahnrad 1	• Einlegen von Zahnrad 2	• Kontrolle Zahnräder	👤 👤 👤	-	-	-
	• Einlegen Getriebedeckel	• Einpressen Getriebedeckel	• Kontrolle Getriebedeckel				
3	• Einlegen von Zahnrad 1	• Einlegen von Zahnrad 2	• Kontrolle Zahnräder	👤 👤 👤	-	-	-
	• Einlegen Getriebedeckel	• Einpressen Getriebedeckel	• Kontrolle Getriebedeckel				
4	• Einlegen von Zahnrad 1	• Einlegen von Zahnrad 2	• Kontrolle Zahnräder	👤 👤 👤	-	-	-
	• Einlegen Getriebedeckel	• Einpressen Getriebedeckel	• Kontrolle Getriebedeckel				

Abbildung 4.30: Wandlungsmatrix der Lernfabrik

den anderen Wandlungen schnell und günstig. Für die Umsetzung der vollautomatisierten Lösung wird ein größerer Roboter benötigt als für die teilautomatisierte Lösung. Die Wandlungen zwischen Systemabschnittskonzept 3 und 4 sind folglich vergleichsweise langsamer und verursachen höhere Kosten.

4.2.2 Montagesystemkonfigurationen

Wie in Unterkapitel 4.2.1.1 beschrieben, bildet das Montagesystem die am höchsten aggregierte Stufe des Modularitätskonzeptes. Die verschiedenen Ausprägungen des Montagesystems werden als Montagesystemkonfigurationen (MSK) bezeichnet. Alle MSK besitzen die Fähigkeit, die Gesamtmenge der in der Initiallösung gegebenen Montageaufgaben zu erfüllen. Durch die Anwendung der Skalierungsmechanismen auf die Initiallösung entstehen die alternativen MSK.

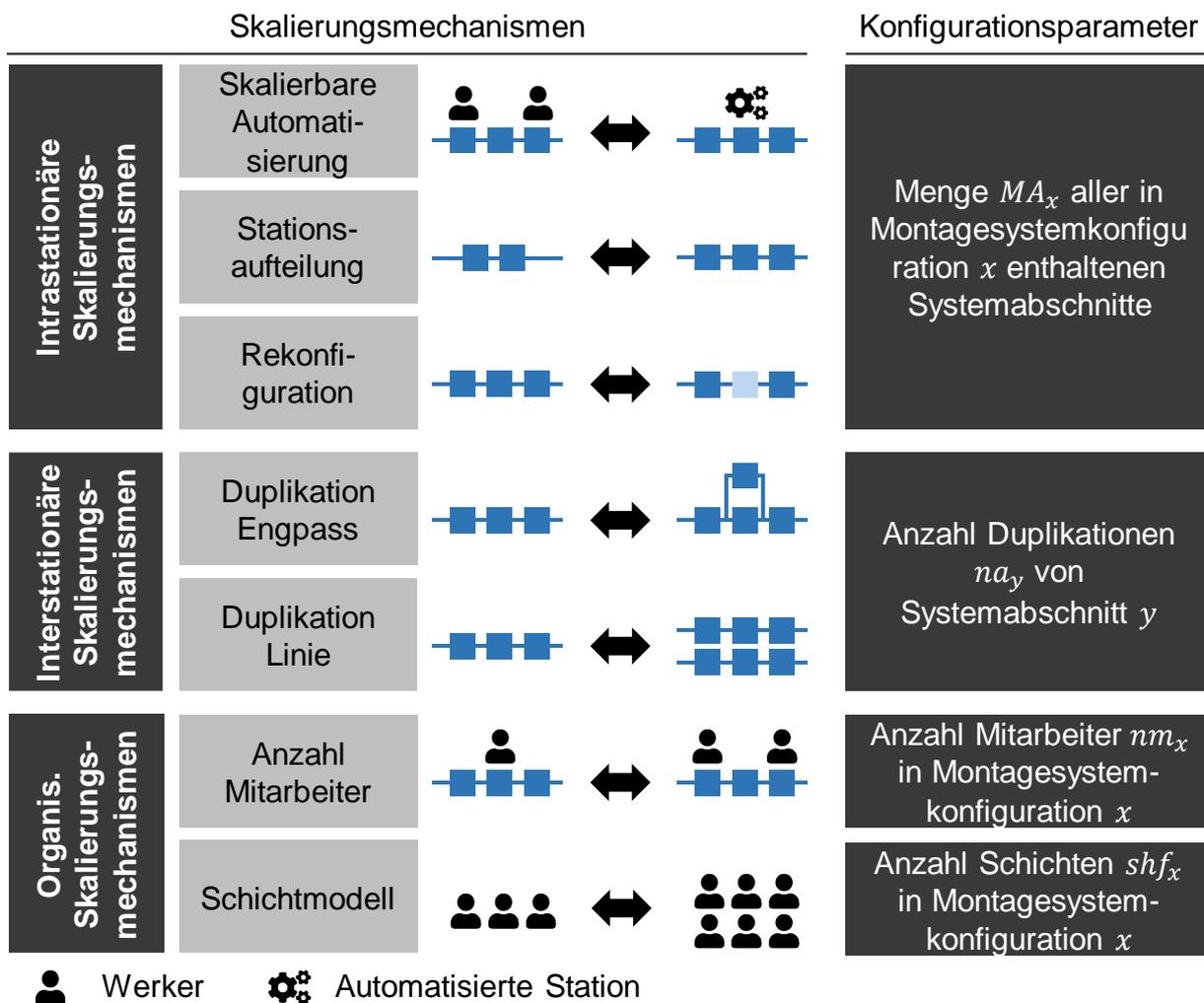


Abbildung 4.31: Umsetzung der Skalierungsmechanismen durch die Konfigurationsparameter der Montagesystemkonfigurationen

Als Konfigurationsparameter der MSK dienen die Menge der in der MSK enthaltenen Systemabschnitte, die Anzahl Duplikationen jedes enthaltenen Systemabschnitts, die Anzahl Mitarbeiter und die Anzahl Schichten. Die Konfigurationsparameter lassen sich jeweils den Skalierungsmechanismen zuordnen (Abbildung 4.31). Aus den eingestellten Konfigurationsparametern werden die weiteren Kennzahlen der Montagesystemkonfiguration berechnet, welche für die Ermittlung der Skalierungsstrategie benötigt werden. Dies sind die Taktzeit TkT^x , die Gesamtbearbeitungszeit gbz_x , die jährlichen Fixkosten FK^x die maximale Jahresstückzahl py_x^{max} sowie die weiteren Restriktionen, welche sich aus den beteiligten Systemabschnitten ableiten.

Die Taktzeit TkT^x der MSK x ergibt sich aus dem Bottleneck. Der Bottleneck resultiert aus einem von zwei Gründen. Einerseits kann der Bottleneck aus dem Verhältnis der Summe manueller Arbeitsinhalte $\sum_s bz_s \forall s$, mit *manuellem Arbeitsplatz* und der Anzahl Mitarbeiter nm_x entstehen. Andererseits kann er aus der Taktzeit bz_s des langsamsten Systemabschnitts unter Berücksichtigung der Duplikationen na_y der Systemabschnitte resultieren. Das Montagesystem kann maximal so schnell produzieren wie die Mitarbeiter die Menge MAM_x aller in MSK x enthaltenen Systemabschnitte mit manueller Tätigkeit bearbeiten können:

$$TkT^x = \max\left(\max\left(\frac{TkT_s}{na_y}, \frac{\sum_s bz_s}{nm_x}\right), \forall y \in MA_x, \forall s \in MAM_x\right) \quad 4-15$$

Abbildung 4.32 zeigt eine beispielhafte MSK der Lernfabrik. Die enthaltenen Systemabschnitte können der Abbildung entnommen werden. Der erste Systemabschnitt wurde dupliziert und ist in der MSK zweimal enthalten. Es arbeiten 6 Mitarbeiter im 1-Schicht-Modell. Für die Berechnung der Taktzeit ergibt sich der längste Takt der Systemabschnitte mit 26 Sekunden aus dem Systemabschnitt *Vollautomatisiertes Pressen 4/Fügen 1*. Der Systemabschnitt *Teilautomatisiertes Pressen 1* hat zwar einen längeren Takt, geht aber durch die Duplikation mit 18 Sekunden in die Berechnung ein. Die Summe der manuellen Zykluszeiten beträgt 193 Sekunden. Die 6 Mitarbeiter können einen idealisierten Takt von knapp 32 Sekunden erreichen. Die Taktzeit der MSK beträgt folglich 32 Sekunden.

In der Gesamtbearbeitungszeit einer MSK werden lediglich die Bearbeitungszeiten berücksichtigt. Liege- und Transportzeiten werden aus Gründen der Vereinfachung nicht berücksichtigt. Bei der Berechnung der Skalierungsstrategie werden durch die Rezep-

tor-Kennzahl Gesamtbearbeitungszeit Anforderungen an die MSK gestellt. Bei der Aufstellung des aggregierten Szenarios dieser Rezeptor-Kennzahl muss bereits beachtet werden, dass ausschließlich die Bearbeitungszeiten in der Gesamtbearbeitungszeit enthalten sind. Die Gesamtbearbeitungszeit gbz_x einer MSK x ergibt sich als Summe der Bearbeitungszeiten bz_s der enthaltenen Systemabschnitte:

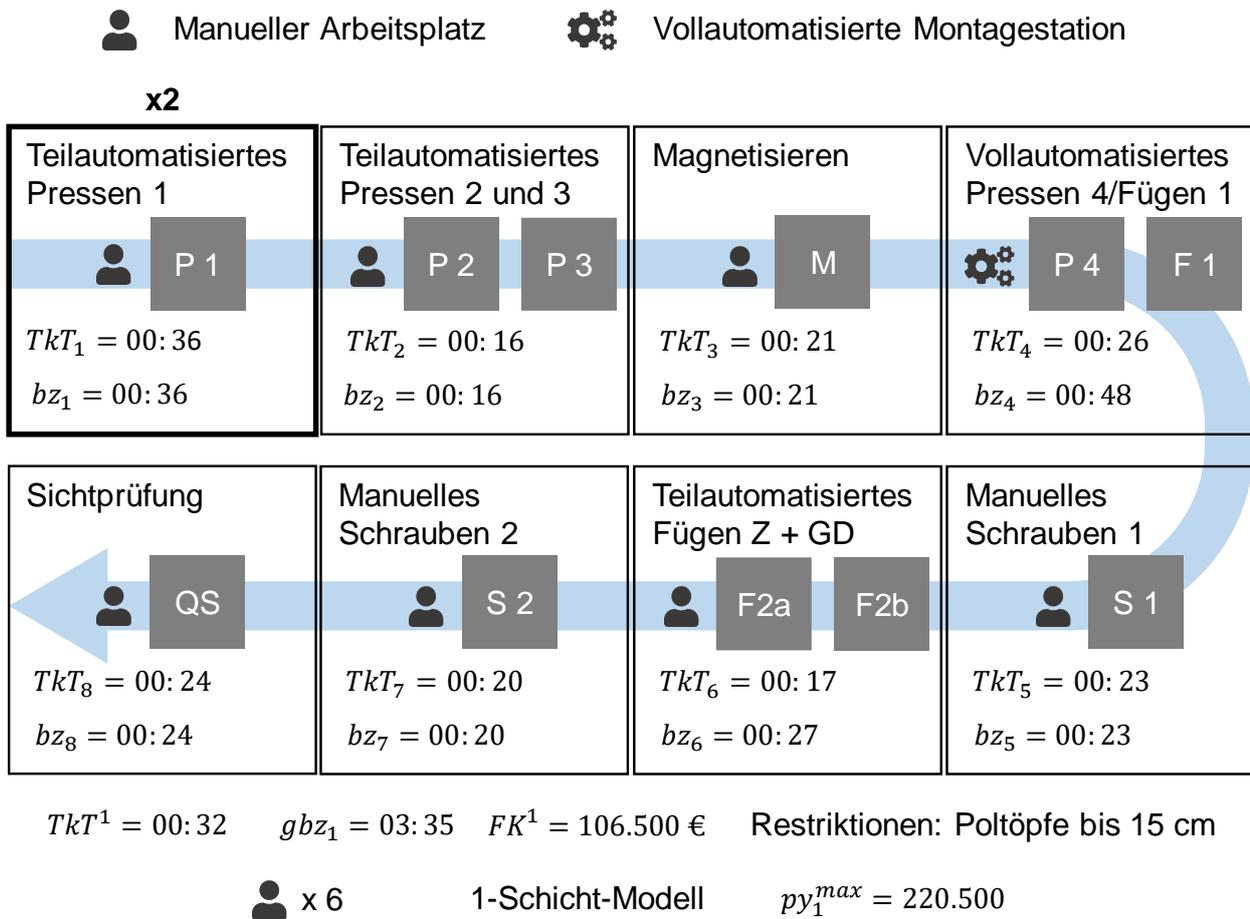


Abbildung 4.32: Beispielhafte Montagesystemkonfiguration der Lernfabrik

$$gbz_x = \sum_{s \in MA_x} bz_s \tag{4-16}$$

Die jährlichen Fixkosten einer MSK x ergeben sich aus der Summe der jährlichen Fixkosten FK_y^a aller enthaltenen Systemabschnitte:

$$FK_x^s = \sum_{y \in MA_x} FK_y^a * na_y \tag{4-17}$$

Für jede Rezeptor-Kennzahl, für die in den Systemabschnitten mindestens eine Restriktion besteht, existiert auch in der MSK eine Restriktion. Die Restriktionen auf Ebene der MSK bestehen im maximalen Fall aus einer Restriktion mit unterer Schranke \underline{limS}_x^m sowie einer Restriktion mit oberer Schranke \overline{limS}_x^m für jede Rezeptor-Kennzahl. Definiert wird der Grenzwert einer Rezeptor-Kennzahl m aus dem restriktivsten Grenzwert der Systemabschnitte:

$$\overline{limS}_x^m = \min(\overline{limA}_y^m), \forall y \in MA_x \quad 4-18$$

$$\underline{limS}_x^m = \max(\underline{limA}_y^m), \forall y \in MA_x \quad 4-19$$

Für den Fall, dass nach Eintritt eines Szenarios eine Restriktion der MSK verletzt wird, entstehen Strafkosten durch Nichtbeachtung von Qualitätsanforderungen oder Lieferausfällen. Die Strafkosten werden entsprechend des Anwendungsfalls je Restriktion auf Ebene der MSK festgelegt. Die Restriktionen der Rezeptor-Kennzahlen Gesamtbearbeitungszeit und Stückzahl bilden Sonderfälle, da sie sich nicht direkt aus Restriktionen der Systemabschnitte ergeben, sondern auf Ebene der MSK berechnet werden. Die Restriktion in Bezug auf die Gesamtbearbeitungszeit ergibt sich direkt aus der Gesamtbearbeitungszeit der MSK als untere Schranke. Festgelegt werden müssen die Strafkosten bei Nichterfüllung der Restriktion. Die Restriktion in Bezug auf die Rezeptor-Kennzahl Stückzahl wird aus der Taktzeit und dem Schichtmodell der MSK sowie den unternehmensweiten Arbeitstagen pro Jahr Anz_{AT} und Arbeitsstunden pro Schicht SD berechnet. Für die Restriktion in Bezug auf die Rezeptor-Kennzahl Stückzahl ergibt sich als obere Schranke py_x^{max} der Jahresstückzahl von MSK x :

$$py_x^{max} = \frac{60min * SD * shf_x * Anz_{AT}}{TkT_x^s} \quad 4-20$$

In der Lernfabrik werden pro Schicht 7 Stunden gearbeitet. Nach Abzug von Wochenenden und Feiertagen wird in der Lernfabrik an 245 Tagen im Jahr gearbeitet. Aus diesen Werten ergibt sich die maximale Jahresstückzahl der in Abbildung 4.32 dargestellten MSK in Höhe von 220.500 Stück. Für die MSK ergeben sich Restriktionen von 220.500 Stück für die Jahresstückzahl und 3:35 Minuten für die Gesamtbearbeitungszeit. Eine Überschreitung der geforderten Gesamtbearbeitungszeit wird mit 50.000 € bestraft und die Nichterfüllung der Stückzahlanforderung mit 10 € pro nicht geliefertem Teil. Bedingt durch die Prozessmodule von Pressen 2 und 3 ergibt sich die Restriktion,

dass Poltöpfe mit einer Länge von maximal 15 cm montiert werden können. Bei Verletzung der Restriktion entstehen 350.000 € Strafkosten. Aus der Rezeptor-Kennzahl *geschmierte Zahnräder* ergibt sich keine weitere Restriktion, da alle beinhalteten Systemabschnitte sowohl Varianten mit geschmierten als auch mit nicht geschmierten Zahnrädern montieren können. Für MSK, welche den Systemabschnitt *Manuelles Fügen Zahnräder und Getriebedeckel auf einer Station* beinhalten, gilt die Restriktion *ungeschmiert* mit Strafkosten in Höhe von 350.000 €, da sie keine Varianten mit geschmierten Zahnrädern montieren können.

Analog zu den wandlungsunspezifischen Kennzahlen werden auch die auf die Wandlung bezogenen Kennzahlen auf die Ebene der MSK übertragen. Aus den Wandlungsmatrizen auf Systemabschnittsebene werden Wandlungsmatrizen auf Montagesystemkonfigurationsebene abgeleitet. Die Wandlungskosten $wk_{c \rightarrow k}$ von MSK c zu MSK k ergeben sich aus der Summe der Wandlungskosten $wks_{\bar{s} \rightarrow \bar{r}}$, $wks_{s \rightarrow 0}$ und $wks_{0 \rightarrow r}$ aller hinzugefügten r , entfernten s und gewandelten \bar{r} , \bar{s} Systemabschnittskonzepte:

$$wk_{c \rightarrow k} = \sum_r wks_{0 \rightarrow r} + \sum_s wks_{s \rightarrow 0} + \sum_{\bar{s}, \bar{r}} wks_{\bar{s} \rightarrow \bar{r}}, \quad 4-21$$

$$\forall r \in R, \forall s \in S, \forall \bar{r} \in \bar{R}, \forall \bar{s} \in \bar{S}$$

Die Wandlungsdauer von MSK c zu MSK k ergibt sich aus dem Maximum der Umbaudauern $wds_{\bar{s} \rightarrow \bar{r}}$, Abbaudauern $wds_{s \rightarrow 0}$ und Aufbaudauern $wds_{0 \rightarrow r}$ aller hinzugefügten R , entfernten S und gewandelten \bar{R} , \bar{S} Montagesystemkonzepte:

$$wd_{c \rightarrow k} = \max(wds_{s \rightarrow 0}, wds_{0 \rightarrow r}, wds_{\bar{s} \rightarrow \bar{r}}), \quad 4-22$$

$$\forall r \in R, \forall s \in S, \forall \bar{r} \in \bar{R}, \forall \bar{s} \in \bar{S}$$

Die Mengen S , R , \bar{S} und \bar{R} sind disjunkt.

4.2.2.1 Intrastationäre Skalierungsmechanismen

Die Entwicklung des Lösungsraums der MSK geht von der Initiallösung aus. Darauf aufbauend werden die weiteren MSK abgeleitet. Im ersten Schritt werden die Skalie-

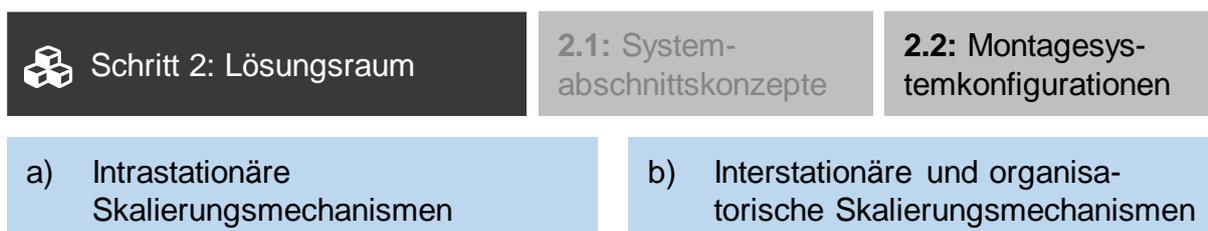


Abbildung 4.33: Prozess der Bildung von Montagesystemkonfigurationen

rungsmechanismen Rekonfiguration, Stationsaufteilung und Skalierbare Automatisierung genutzt, um den intrastationären Lösungsraum aufzuspannen. Für diese erste Stufe werden die Konfigurationsparameter der interstationären und der organisatorischen Skalierungsmechanismen jeweils mit einem konstanten Standardwert belegt und ausschließlich die Menge der enthaltenen Systemabschnitte variiert. Im nächsten Schritt werden die interstationären und organisatorischen Skalierungsmechanismen auf die im ersten Schritt entwickelten MSK angewendet (Abbildung 4.33).

Eine zulässige MSK kann alle Montageaufgaben durchführen. Der Algorithmus beginnt mit der bekannten MSK, welche aus den initialen Systemabschnitten besteht. Durch den sequenziellen Austausch eines Systemabschnitts gegen ein Systemabschnittskonzept, das die gleichen Montageaufgaben erfüllt, werden alle kombinatorisch zulässigen MSK ohne Einsatz der interstationären und organisatorischen Skalierungsmechanismen erzeugt.

Abschließend werden die MSK mit der jeweils abgeleiteten Menge der Systemabschnitte und den Standardwerten für die Anzahl Werker, der Anzahl Schichten und der Anzahl duplizierter Systemabschnitte gespeichert.

4.2.2.2 Interstationäre und organisatorische Skalierungsmechanismen

Mit den interstationären und organisatorischen Skalierungsmechanismen kann die maximale Jahresstückzahl angepasst werden. Neben der gewählten MSK hängt die maximale Jahresstückzahl von den statischen Werten Arbeitsstunden pro Schicht und Arbeitstage pro Jahr ab. Es gibt verschiedene MSK, welche die gleiche maximale Jahresstückzahl produzieren können. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der minimalen Stückkosten und den über den Lebenszyklus des Montagesystems resultierenden Wandlungskosten. Es wird angenommen, dass die Stückkosten nicht gesenkt werden können, wenn eine MSK über die geforderte Jahresstückzahl hinaus durch interstationäre oder organisatorische Mechanismen skaliert wird. Durch eine solche Skalierung würden Ressourcen in Form von Werkern oder Systemabschnitten zur Linie hinzugefügt, die für zusätzliche Kosten sorgen, ohne einen Vorteil generieren zu können. Ebenso wird angenommen, dass sich durch dieses Vorgehen die Wandlungskosten nicht senken lassen. Eine weitere Prämisse ist, dass sich eine Anwendung der Mechanismen Duplikation Engpass und Anzahl Mitarbeiter nur positiv auf die Produktivität des Montagesystems, bzw. die Stückkosten auswirkt, wenn sie auf den Bottleneck angewendet werden. Wie in der Berechnung der Taktzeit einer MSK in Formel 4-15 eingeführt, ist

der Bottleneck entweder auf die langsamste Montagestation oder die Anzahl Mitarbeiter zurückführen. Dementsprechend sollte lediglich der identifizierte Bottleneck durch die Anwendung des entsprechenden Skalierungsmechanismus entfernt werden.

Bei einem Wechsel auf ein Schichtmodell mit einer höheren Anzahl Schichten wirken zwei entgegengesetzte Mechanismen auf die Betriebskosten $BK(z)$ (siehe Formel 4-30). Zum einen kann die maximale Jahresstückzahl der Montagesystemkonfiguration erhöht werden, ohne, dass zusätzliche Fixkosten FK^x entstehen. Zum anderen steigt bei einem Wechsel in ein 3-Schichtmodell der Stundenlohn. Kurzfristig kann sich dieser Schritt auch aufgrund geringer Wandlungskosten gegenüber der Nutzung anderer Skalierungsmechanismen lohnen. Der Skalierungsmechanismus Schichtmodell wird daher ergänzend zu den anderen Skalierungsmechanismen in der Erstellung von MSK genutzt. Jede der durch die intrastationären Skalierungsmechanismen entstandenen MSK

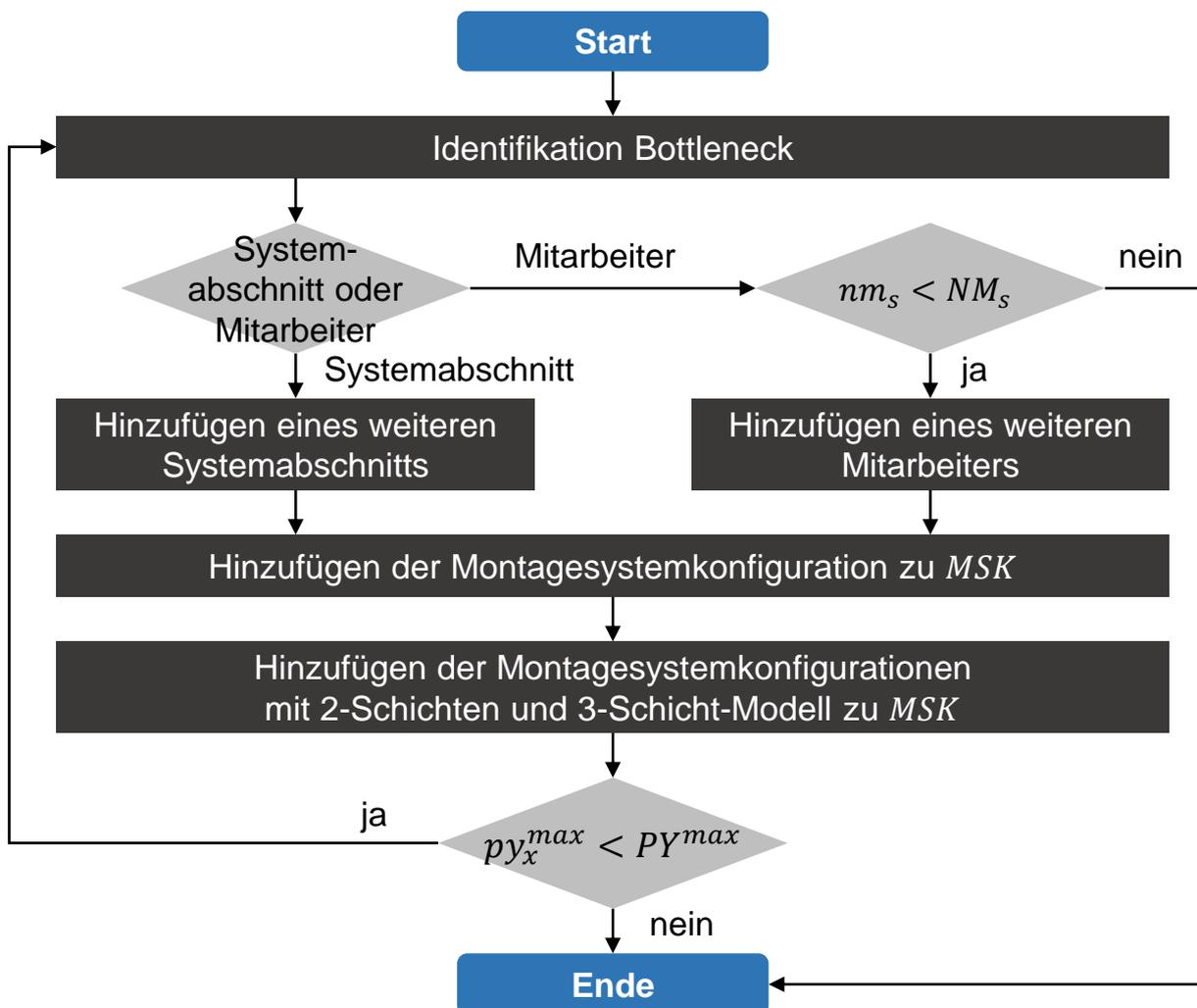


Abbildung 4.34: Algorithmus zur Erzeugung von Montagesystemkonfigurationen durch Anwendung der interstationären und organisatorischen Skalierungsmechanismen

durchläuft den Algorithmus aus Abbildung 4.34, um die aus den interstationären und organisatorischen Skalierungsmechanismen entstehenden MSK zu erzeugen.

Ausgehend von der jeweiligen initialen MSK werden weitere MSK x mit einer höheren maximalen Jahresstückzahl py_x^{max} generiert. Entsprechend des identifizierten Bottlenecks der betrachteten MSK wird entweder ein weiterer Mitarbeiter hinzugefügt oder am Engpass ein Systemabschnitt dupliziert. Jede MSK wird sowohl als 1-Schicht-, 2-Schicht- und 3-Schicht-Modell generiert. Das Abbruchkriterium bildet das Erreichen der maximal erwarteten Jahresstückzahl PY_x^{max} aus der Szenarioanalyse.

4.3 Schritt 3: Skalierungsstrategie

Mit Abschluss des zweiten Planungsschrittes sind sowohl die aggregierten Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen als auch der mögliche Lösungsraum der MSK bestimmt. Es kann nur eine MSK zum Zeitpunkt t aufgebaut werden. Es muss daher entschieden werden, welche der geplanten MSK in der Realität aufzubauen ist. Im Gegensatz zu einem starren System ist ein wandlungsfähiges System darauf ausgelegt, sich zu wandeln, das heißt die MSK zu wechseln. Folglich muss die Entscheidung für die optimale MSK nicht nur einmal, sondern mehrfach getroffen werden. Es liegt ein mehrstufiges Entscheidungsproblem vor. Um eine Entscheidung treffen zu können, muss zunächst das Ziel definiert werden, anhand dessen der Erfolg der Entscheidung gemessen wird (Laux & Gillenkirch et al. 2018). Unternehmen wollen für gewöhnlich zu minimalen Kosten produzieren. Aus diesem Grund werden häufig Kennzahlen wie Stückkosten oder Maschinenstundensätze minimiert. In einer volatilen Unternehmensumwelt führen kurzfristig minimale Produktionskosten nicht zwangsläufig zum Erfolg. Die Wandlung zwischen MSK kostet Geld. So können hohe Wandlungskosten die Vorteile kurzfristig niedriger Stückkosten zunichtemachen. Für ein volatiles Unternehmensumfeld, welches voraussichtlich Wandlungen erforderlich macht, ist das Spannungsfeld zwischen niedrigen Stückkosten und niedrigen Wandlungskosten zu beherrschen. Daher wird die Minimierung der Gesamtkosten des Montagesystems über einen definierten Planungshorizont als Ziel definiert.

Mehrstufige Entscheidungsprobleme unter Unsicherheit lassen sich als Markovsches Entscheidungsproblem (MDP) (Unterkapitel 2.2.1) modellieren (Peters 2013). Eine charakteristische Eigenschaft des MDP ist die Gedächtnislosigkeit. Das heißt, dass für jede Entscheidung, die getroffen wird, nur der aktuelle Zustand des Modells genutzt wird. Es

liegen keine Informationen über die vorangegangenen Entscheidungen vor. Dieser Umstand muss in der Modellierung berücksichtigt werden. Da es möglich ist, dass eine Wandlung sich über mehrere Planungsperioden erstreckt, wird der Zustand des MDP erweitert um die Information, zu welcher MSK im vorliegenden Zustand gewandelt wird. Vereinfachend wird angenommen, dass es sich um ein endliches, diskretes MDP handelt. Dies bedeutet, dass nur zu diskreten Zeitpunkten zwischen MSK gewandelt werden kann und ein endlicher Planungshorizont in der Planung berücksichtigt wird. Ergebnis des MDP ist eine Skalierungsstrategie, welche für jede Entscheidung eine Lösung vorgibt, welche den minimalen Erwartungswert der Gesamtkosten über den Planungshorizont des Montagesystems erzielt. In Abbildung 4.38 sind eine beispielhafte Situation und die zugehörige Empfehlung abgebildet. Im Folgenden wird das vorliegende Entscheidungsproblem zunächst als MDP modelliert und im nächsten Schritt mittels Backward Induction gelöst (Abbildung 4.35).

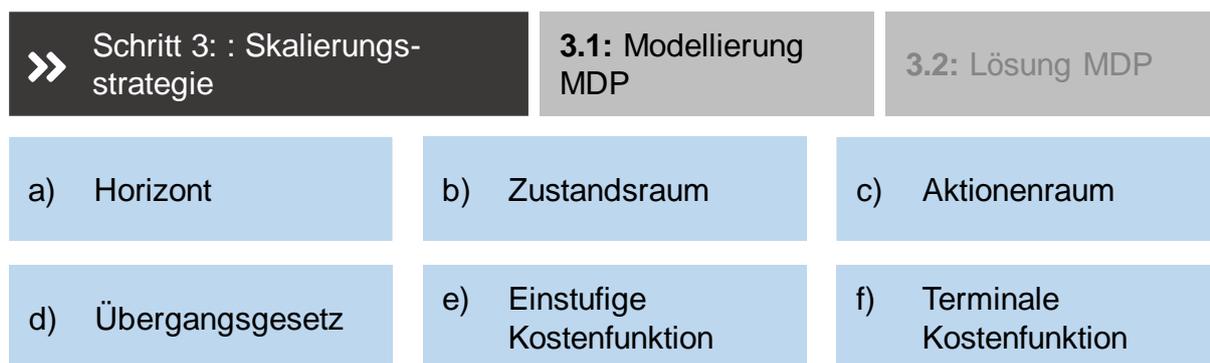


Abbildung 4.35: Prozess der Modellierung als MDP

4.3.1 Modellierung als Markovsches Entscheidungsproblem

Wie bereits in Unterkapitel 2.2 eingeführt, besteht ein endliches, diskretes MDP im Allgemeinen aus folgenden Bestandteilen.

- Horizont
- Zustandsraum
- Aktionenraum
- Übergangsgesetz
- Einstufige Kostenfunktion
- Terminale Kostenfunktion

Im Folgenden wird das Entscheidungsproblem zur Auswahl der kostenminimalen Skalierungsstrategie gemäß dieser Bestandteile modelliert.

4.3.1.1 Horizont

Als Horizont des MDP wird der Planungshorizont T des Montagesystems definiert. Die Zeitschritte werden als Planungsperioden t bezeichnet und entsprechend der Änderungsfrequenz der Rezeptor-Kennzahlen gewählt. Die Dauer der Planungsperiode sollte der Dauer einer Planungsperiode der aggregierten Szenarien entsprechen. Kürzere Planungsperioden würden dazu führen, dass eine neue Entscheidung getroffen werden müsste, bevor sich die Unternehmensumwelt seit der letzten Entscheidung weiterentwickelt hätte. Eine längere Planungsperiode würde dazu führen, dass nicht auf alle Änderungen der Rezeptor-Kennzahlen reagiert werden könnte.

Für die Lernfabrik wird mit einem Planungshorizont von 8 Jahren und einer Periodendauer von einem Quartal gerechnet.

4.3.1.2 Zustandsraum

Der Zustandsraum Z des definierten MDP besteht aus zwei Teilräumen. Dabei wird unterschieden in einen deterministischen Teilraum Z_{det} und einen stochastischen Teilraum Z_{stoch} . Der deterministische Teilraum besteht aus den in Schritt 2 (Unterkapitel 4.2) geplanten MSK. Eine zentrale Eigenschaft eines Markovschen Entscheidungsproblems ist die Gedächtnislosigkeit. Wie in Unterkapitel 4.2.1.6 beschrieben, benötigen einige MSK einen Vorlauf, aufgrund von Beschaffungszeiten für spezielle Komponenten und erforderliches Engineering. Folglich ist es nicht zulässig anzunehmen, dass dem Planer jede der MSK als Option für die Folgeperiode zur Verfügung steht. Einige MSK können erst einige Perioden nach der Entscheidung tatsächlich in Betrieb genommen werden. Aus dieser Tatsache resultiert ein Problem für die Modellierung als MDP. Durch die Gedächtnislosigkeit, ist in einem Zustand unbekannt, welche Entscheidung in der vorausgegangen Periode getroffen wurde. Somit ist es nicht unmittelbar möglich, eine Entscheidung mit über mehrere Perioden verzögerter Auswirkung im MDP abzubilden. Das klassische MDP wird daher auf diese spezielle Anforderung angepasst (A_Derichs 2018, S. 63-65). Der deterministische Teilraum wird von der aktuell betriebenen MSK k erweitert um die Zielkonfiguration k_{ziel} und die verbleibende Anzahl Planungsperioden nk bis zum Abschluss der Wandlung. Ein deterministischer Zustand z_{det} ist definiert als Menge aus aktuell betriebener MSK, Zielkonfiguration und der verbleibenden Anzahl Perioden bis zum Wandel von k zu k_{ziel} :

$$z_{det}: (k, nk, k_{ziel})$$

Der deterministische Teilraum ist folglich definiert als die Menge aller im Planungsprojekt enthaltenen deterministischen Zustände.

Der in Abbildung 4.38 markierte deterministische Zustand (MSK 319, 0, MSK 319) bedeutet, dass in Planungsperiode 5 mit der MSK 319 montiert wird und keine Wandlung geplant ist. Durch die Entscheidung, auf MSK 712 zu wandeln, wechselt das System in den deterministischen Zustand (MSK 319, 1, MSK 712). Aufgrund der Lieferzeit für die Linearführungen der neuen Pressen muss eine weitere Planungsperiode lang die MSK 319 genutzt werden. Die Kombination der Ausprägungen aus den Rezeptor-Kennzahlen Stückzahl, geschmierte Zahnräder und Poltopflänge stellt einen stochastischen Zustand der Lernfabrik dar. In Abbildung 4.36 ist der Zustandsraum der Lernfabrik abgebildet. Beispielhaft ist der stochastische Zustand mit 140.000 Jahresstückzahl, geschmierten Zahnrädern und bis zu 15 cm langen Poltöpfen markiert. Der gesamte stochastische Zustandsraum besteht aus allen Kombinationen der Elemente der Menge aller Ausprägungen I_1, I_2 und I_3 der Rezeptor-Kennzahlen 1, 2 und 3. In Summe enthält der stochastische Zustandsraum der Lernfabrik $8 * 2 * 3 = 48$ Zustände.

I_1	I_2	I_3
80.000 - 120.000	geschmiert	10 cm
120.000 - 160.000	ungeschmiert	15 cm
160.000 - 200.000		20 cm
200.000 - 240.000		
240.000 - 280.000		
280.000 - 320.000		
320.000 - 360.000		
360.000 - 400.000		

Abbildung 4.36: Stochastischer Zustandsraum der Lernfabrik

Der stochastische Teilraum bildet die Unsicherheiten aus den aggregierten Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen ab. Jedes aggregierte Szenario einer volatilen Rezeptor-Kennzahl resultiert in einer Dimension im stochastischen Teilraum. Die Klassen der aggregierten Szenarien stellen die Ausprägungen des stochastischen Teilraumes dar. Ein stochastischer Zustand z_{stoch} ist definiert als eine Menge von Ausprägungen für jede im Planungsprojekt enthaltene Rezeptor-Kennzahl:

$$z_{stoch}: (i_x), \forall x \in RZK$$

Der stochastische Teilraum ist definiert als die Menge aller im Planungsprojekt enthaltenen stochastischen Zustände. Der Zustand eines Montagesystems wird schließlich definiert als ein Tupel aus genau einem deterministischem Zustand und genau einem stochastischen Zustand:

$$z: (z_{det}, z_{stoch}) \quad 4-25$$

Somit ist der gesamte Zustandsraum als die Menge aller kombinatorisch möglichen Zustände definiert.

4.3.1.3 Aktionenraum

In jeder Planungsperiode stehen Aktionen zur Auswahl die den Übergang zu einem neuen Zustand in der folgenden Planungsperiode beeinflussen. Durch eine Aktion lässt sich lediglich der Übergang im deterministischen Teilraum beeinflussen. Der Übergang im stochastischen Teilraum unterliegt dem Zufall. Mit einer Aktion a wird ein deterministischer Zustand aus dem deterministischen Zustandsraum gewählt. In Abhängigkeit des deterministischen Zustands einer Planungsperiode steht eine Untermenge des deterministischen Teilraums als Aktionenraum zur Auswahl. Die Einschränkung des Aktionenraums entsteht aus den Wandlungsdauern der MSK. Es stehen nur deterministische Zustände zur Auswahl, die nicht durch die Logik der Wandlungsdauern blockiert sind (siehe Formel 4-26 und Formel 4-27). Zum einen wird eine begonnene Wandlung immer durchgeführt, auch wenn sie sich über mehrere Planungsperioden erstreckt. In diesem Fall steht ausschließlich der deterministische Zustand mit der um 1 reduzierten Wandlungsdauer zur Auswahl. Zum anderen kann bei der Entscheidung für eine Wandlung stets nur der deterministische Zustand mit der maximalen Wandlungsdauer für die entsprechende Wandlung gewählt werden.

Der Aktionenraum $A(z_{det})$ ist in Abhängigkeit des deterministischen Ausgangszustands für zwei Fälle definiert. Der Aktionenraum für Zustände, in denen auf eine MSK gewartet wird, ist in Fall A definiert. Fall B definiert den Aktionenraum für Zustände, in denen keine Wartedauer begonnen wurde:

Fall A: Entscheidung für Wandel wurde getroffen und es wird gewartet.

$$A(z_{det}) = A(k, nk, k_{ziel}) = \{(k, nk - 1, k_{ziel})\}, nk > 0 \quad 4-26$$

Fall B: Keine Wartedauer wurde begonnen.

$$A(z_{det}) = A(k, 0, k) = Z_{det}/Z_{wait} \quad 4-27$$

Der Teilraum Z_{wait} umfasst die deterministischen Zustände mit begonnener Wartedauer, also alle deterministischen Zustände für die gilt: $nk < \max(nk)$

Die in Abbildung 4.38 dargestellte Entscheidung auf die MSK 712 zu wandeln, stellt eine Aktion dar. In der Planungsperiode 5 steht der Aktionenraum $A(MSK\ 319, 0, MSK\ 319)$ zur Verfügung. Dieser Raum umfasst alle Aktionen, die einen Wechsel auf einen Zustand mit nicht angebrochener Wartezeit beinhalten. Durch die Wahl der Aktion $(MSK\ 319, 1, MSK\ 712)$ besteht der Aktionenraum $A(MSK\ 319, 1, MSK\ 712)$ in der Planungsperiode 6 nur aus der Aktion $(MSK\ 712, 0, MSK\ 712)$. Es kann in dieser Planungsperiode folglich nur auf das Eintreffen der Linearachsen gewartet werden.

4.3.1.4 Übergangsgesetz

Das Übergangsgesetz beschreibt die Übergänge aller Komponenten eines Zustands z_{det} in den Zustand \bar{z}_{det} der nächsten Periode. Der Übergang des deterministischen Teilraums ist durch die Aktion a definiert:

$$z_{det} \xrightarrow{a} \bar{z}_{det} \quad 4-28$$

Der Übergang im stochastischen Teilraum ist unabhängig von der Aktion a . Er hängt von stochastischen Einzelwahrscheinlichkeiten $kp_{i \rightarrow j}$ ab. Die Einzelwahrscheinlichkeit $kp_{i \rightarrow j}$ bezeichnet den Übergang von Klasse i in Klasse j des aggregierten Szenarios einer Rezeptor-Kennzahl. Die Kennzahlenmatrizen $KM_{x,t}$ beinhaltet alle Einzelwahrscheinlichkeiten $kp_{i \rightarrow j}$ in Bezug auf die Rezeptor-Kennzahl x und den Planungszeitpunkt t . Für den Übergang des stochastischen Zustands z_{stoch} in den stochastischen Zustand \bar{z}_{stoch} wird eine erweiterte Kennzahlenmatrix KM_t gebildet, welche die Einzelwahrscheinlichkeiten für alle Kombinationen der Rezeptor-Kennzahl-Klassen beinhaltet. Die Ausprägungen von KM_t für einen konkreten Übergang werden im Vektor \overrightarrow{KM}_t gespeichert. Somit wird der Übergang des stochastischen Zustands z_{stoch} in den stochastischen Zustand \bar{z}_{stoch} definiert durch \overrightarrow{KM}_t :

$$z_{stoch} \xrightarrow{\overrightarrow{KM}_t} \bar{z}_{stoch} \quad 4-29$$

Wie in Unterkapitel 4.3.1.3 beschrieben, bestimmt die Aktion in Planungsperiode 5 den Übergang in den Zustand des Wartens auf MSK 712. Die Aktion wurde auf der Annahme durchgeführt, dass die Stückzahlen ansteigen und die geforderte Poltopflänge sich auf 20 cm erhöht. Angenommen die größere Poltopflänge würde zunächst nicht nachgefragt, die Stückzahl stiege aber stärker als erwartet, könnte sich bspw. (180.000 Stück, geschmiert, 15 cm) als neuer stochastischer Zustand ergeben. Das Übergangsgesetz legt fest, dass der Zustand (MSK 319, 0, MSK 319), (140.000 Stück, geschmiert, 15cm) übergeht in den Zustand (MSK 319, 1, MSK 712), (180.000 Stück, geschmiert, 15cm).

4.3.1.5 Einstufige Kostenfunktion

Die einstufige Kostenfunktion umfasst alle Kosten $K_t(z)$, die in einer Periode anfallen. Diese Kosten sind untergliedert in die Betriebskosten $BK(z)$, Wandlungskosten $wk_{c \rightarrow k}$ (siehe Formel 4-21) und Strafkosten $SK(z)$. Die Betriebskosten $BK(z)$ einer Planungsperiode t berechnen sich aus den Fixkosten FK^x der Montagesystemkonfiguration x und den Personalkosten. Die Personalkosten berechnen sich als Produkt aus der Anzahl Arbeitstage im Jahr Anz_{AT} , der Anzahl Schichten pro Tag shf_x der Montagesystemkonfiguration x , der Schichtdauer in Stunden SD , des Stundenlohns $K_h(z)$ in Abhängigkeit der Rezeptor-Kennzahl Werkerkosten und der Anzahl Werker Anz_w^x in Montagesystemkonfiguration x . Die Betriebskosten werden auf die Dauer einer Periodenlänge Δt bezogen.

$$BK(z) = (FK^x + Anz_{AT} * shf_x * SD * K_h(z) * Anz_w^x) * \Delta t \quad 4-30$$

Die Wandlungskosten umfassen die Kosten, welche aus der Wandlung von der MSK c in $t - 1$ zu der MSK k in t entstanden sind. Sollte eine oder mehrere der Restriktionen der MSK in z durch die Ausprägungen der Rezeptor-Kennzahlen in z verletzt werden, fallen Strafkosten an. $SK(z)$ ist die Summe der resultierenden Strafkosten in Zustand z . Es wird in zwei Arten der Strafkosten unterschieden. Je nach Rezeptor-Kennzahl y fällt bei einer Verletzung der zugehörigen Restriktion der Strafkostenterm sk_y an. Andererseits entstehen für Rezeptor-Kennzahl x Strafkosten aus dem Produkt des Strafkostenterms sk_x und der Abweichung AR_x vom Grenzwert der zugehörigen Restriktion.

$$SK(z) = \sum_x AR_x * sk_x + \sum_y sk_y \quad 4-31$$

Die Gesamtkosten der Periode $K_t(z)$ sind definiert als:

$$K_t(z) = BK(z) + wk_{c \rightarrow k} + SK(z) \quad 4-32$$

Angenommen in Planungsperiode 7 würden die längeren Poltöpfe nachgefragt und die Stückzahl würde deutlich stärker als erwartet auf 260.000 Stück pro Jahr ansteigen. In Planungsperiode 7 entstehen Betriebskosten, Wandlungskosten sowie Strafkosten. Die jährlichen Fixkosten der MSK 712 betragen 121.000 €. Zusätzlich entstehen durch den Einsatz der 6 Mitarbeiter jährliche Personalkosten in Höhe von 210.000 €. Für das Quartal der 7. Planungsperiode entstehen folglich Betriebskosten in Höhe von 82.750 €. Durch den Übergang von MSK 319 auf MSK 712 wird der Systemabschnitt *Teilautomatisiertes Pressen 2 und 3* ausgetauscht. Dadurch entstehen Kosten in Höhe von 8.000 €. Die MSK 712 kann bis zu 225.000 Stück pro Jahr produzieren. Für die drei Monate der Planungsperiode 7 bedeutet dies eine Kapazität von 56.250 Stück. Nachgefragt werden aber 65.000 Stück. Die zusätzlich nachgefragten 8.750 Stück können nicht geliefert werden und führen zu Strafkosten in Höhe von 87.500 €. Die Gesamtkosten für Planungsperiode 7 betragen somit 178.250 €.

4.3.1.6 Terminale Kostenfunktion

Da in der einstufigen Kostenfunktion lediglich Abschreibungen anstatt der vollständigen Anschaffungskosten berücksichtigt werden, entfällt die terminale Kostenfunktion. Eine Ausschüttung der Buchwerte am Ende des Planungshorizonts würde Strategien belohnen, die am Ende des Planungshorizonts möglichst kapitalintensive MSK wählen (Peters 2013).

4.3.2 Lösung Markovsches Entscheidungsproblem

Es existieren in der Literatur zwei Möglichkeiten der analytischen Lösung von MDP (siehe Unterkapitel 2.2.2). Die Politik-Iteration ist für eine große Anzahl Zustände rechenintensiver als die Wert-Iteration. Daher wird in diesem Ansatz die Wert-Iteration gewählt.

Die Lösung des MDP wird in der Skalierungsstrategie *SKS* gespeichert. Die *SKS* ist eine Matrix, in deren Spalten für jede Planungsperiode Tupel aus den Zuständen z des MDP, der optimalen Aktion a_z^t und dem resultierenden Erwartungswert der Gesamtkosten gk_z^t ab der jeweiligen Planungsperiode abgebildet sind. Für die Lösung des MDP wird die

Skalierungsstrategie von der letzten Planungsperiode an rückwärts berechnet. Die Lösung der letzten Planungsperiode lässt sich vereinfacht berechnen, da keine Aktion mehr definiert werden muss und die resultierenden Gesamtkosten der Summe aus Betriebskosten und Strafkosten entsprechen. Für die Aktion $a_z^{t_{max}}$ und den Erwartungswert der Gesamtkosten $gk_z^{t_{max}}$ für den letzten Planungszeitpunkt t_{max} des Planungshorizonts im Zustand z gilt:

$$a_z^{t_{max}} = \emptyset \quad 4-33$$

$$gk_z^{t_{max}} = BK(z) + SK(z) \quad 4-34$$

Ab der vorletzten Planungsperiode wird für jedes Tupel der Skalierungsstrategie eine Aktion definiert. In Abhängigkeit dieser Aktion ist der deterministische Zustand der folgenden Planungsperiode z'_{det} definiert. Unter der Bedingung, dass ein bestimmter stochastischer Zustand z'_{stoch} eintritt, lassen sich die aus der Aktion a resultierenden Gesamtkosten $gk_z^t(z'_{det}, z'_{stoch})$ ab der betrachteten Periode berechnen. Die Gesamtkosten bestehen aus vier Teilen. Dies sind zum einen die Betriebskosten $BK(z)$ und Strafkosten $SK(z)$ der betrachteten Periode selbst. Hinzu kommen die aus der Aktion resultierenden Wandlungskosten $wk_{r \rightarrow s}$. Der vierte Teil sind die erwarteten Gesamtkosten $gk_{(z'_{det}, z'_{stoch})}^{t+1}$ ab der Folgeperiode $t + 1$ für den Zustand $z' = (z'_{det}, z'_{stoch})$. Zusammenfassend ergeben sich die Gesamtkosten wie folgt:

$$gk_z^t(z'_{det}, z'_{stoch}) = BK(z) + wk_{r \rightarrow s} + SK(z) + gk_{(z'_{det}, z'_{stoch})}^{t+1} \quad 4-35$$

Um den Erwartungswert für die Gesamtkosten ab Periode t ohne Kenntnis des stochastischen Zustands der folgenden Planungsperiode zu berechnen, werden die Gesamtkosten $gk_z^t(z'_{det}, z'_{stoch})$ mit den jeweiligen Einzelwahrscheinlichkeiten $zp_{z_{stoch} \rightarrow z'_{stoch}}$ der stochastischen Zustände gewichtet.

$$gk_z^t(z'_{det}) = K_t(z) + \sum_{z'_{stoch}} zp_{z_{stoch} \rightarrow z'_{stoch}} * gk_{(z'_{det}, z'_{stoch})}^{t+1}, \quad \forall z'_{stoch} \in Z_{stoch}, z_{det}, z_{stoch} \in Z \quad 4-36$$

Gemäß der Modellierung des MDP in Unterkapitel 4.3.1 werden in der Lösung des MDP die Gesamtkosten $gk_{z_0}^1$ ab dem Ausgangszustand z_0 in der Planungsperiode 1 minimiert. Daher wird für jeden Zustand einer Planungsperiode t die Aktion gewählt, welche

durch die Wahl des deterministischen Zustandes z'_{det} die minimalen Gesamtkosten ab Planungsperiode t erzielt:

$$a(z, t) = z'_{det}, gk_z^t(z'_{det}) = \min_{z^*_{det}}(gk_z^t(z^*_{det})), \forall z^*_{det} \in A(z) \quad 4-37$$

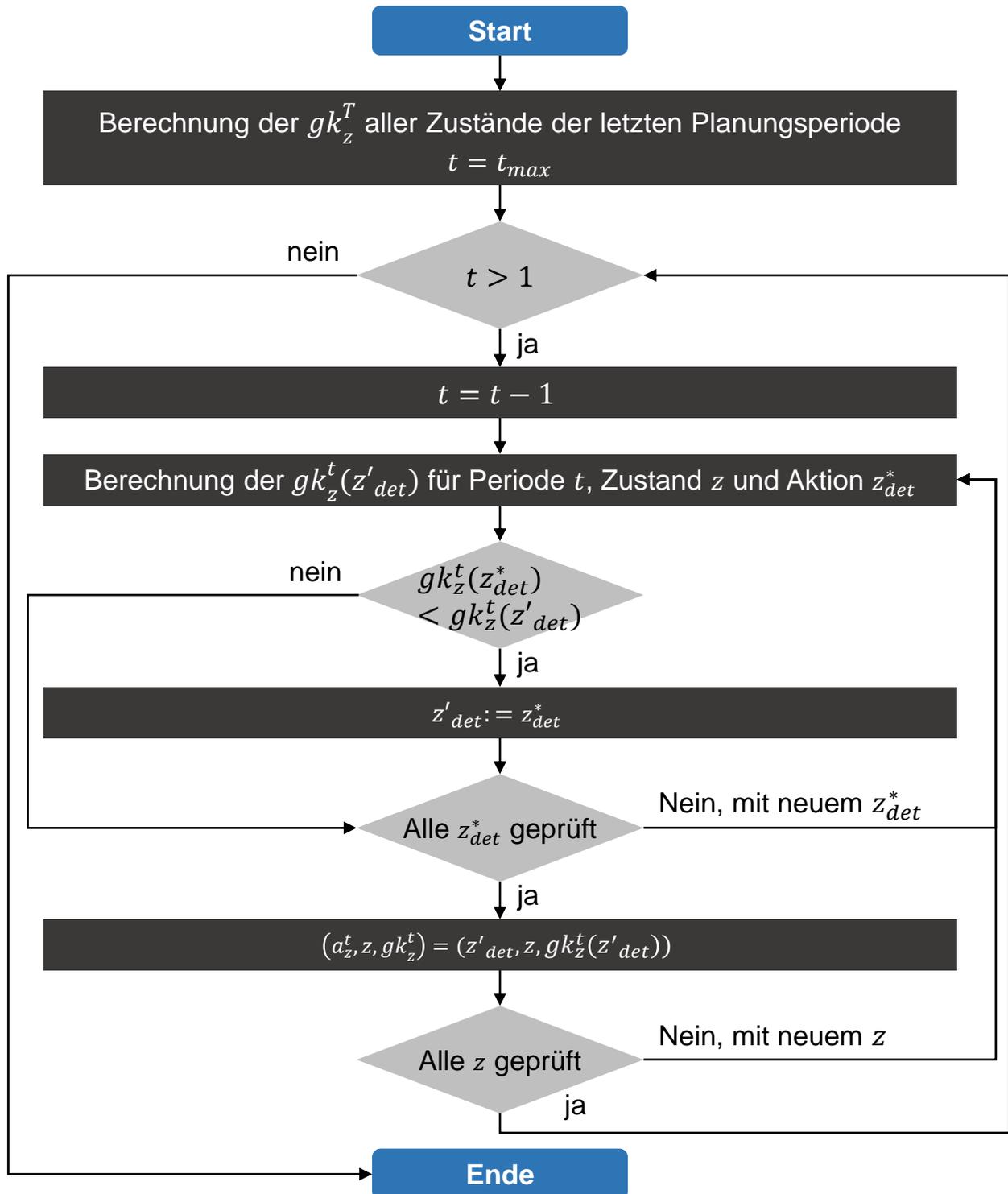


Abbildung 4.37: Algorithmus zur Berechnung der Skalierungsstrategie

Das Vorgehen wird iterativ bis zur ersten Planungsperiode durchgeführt. Abbildung 4.37 visualisiert das Vorgehen zur Berechnung der Skalierungsstrategie mit Rückwärts-Induktion. Im ersten Schritt des Algorithmus werden die Gesamtkosten für jeden der Zustände in der letzten Planungsperiode berechnet. Im Anschluss wird in die vorhergehende Planungsperiode gewechselt. Für jeden der Zustände in der aktuellen Planungsperiode werden für die Wahl einer zulässigen Aktion die erwarteten Gesamtkosten unter Einbeziehung der möglichen stochastischen Zustände der Folgeperiode berechnet. Ab der Berechnung für die zweite Aktion wird geprüft, ob die erwarteten Kosten niedriger sind, als die erwarteten Kosten der bisher kostenminimalen Aktion. Falls eine neue kostenminimale Aktion gefunden wurde, überschreibt diese Aktion die bisher kostenoptimale Aktion. Nachdem alle Aktionen für den Zustand durchlaufen wurden, werden kostenminimale Aktion, Zustand und erwartete Gesamtkosten in die Skalierungsstrategie übernommen. Fortgesetzt wird der Algorithmus mit dem nächsten Zustand der Planungsperiode. Nachdem alle Zustände der Planungsperiode durchlaufen wurden, wird mit der Algorithmus mit der vorhergehenden Planungsperiode fortgeführt, bis die Planungsperiode 1 durchlaufen und die Skalierungsstrategie vollständig berechnet wurde. Mit der vollständigen Berechnung der Skalierungsstrategie ist folglich auch die optimale Aktion im Ausgangszustand bekannt.

In Abbildung 4.38 ist beispielhaft die Situation dargestellt, dass in der fünften Planungsperiode die MSK 319 (siehe Abbildung 4.32) genutzt wird. Es müssen 65.000 Motoren montiert werden, von denen einige geschmierte Zahnräder enthalten. Die maximale Poltopflänge der produzierten Varianten beträgt 15 cm. Jedem dieser Zustände z in jeder Planungsperiode t weist die Skalierungsstrategie eine Aktion zu. Die Aktion beinhaltet einen deterministischen Zustand der für die folgende Planungsperiode eingenommen werden soll. In diesem Fall wird empfohlen, auf die MSK 712 zu wandeln. Die Wandlungsdauer von MSK 319 auf MSK 712 beträgt 1 Planungsperiode. Daher beinhaltet die Aktion den deterministischen Zustand mit aktueller MSK 319, Wartedauer 1 und Ziel-MSK 712, wie in Abbildung 4.38 dargestellt.

Sobald sich an den MSK oder den Rezeptorprognosen etwas ändert, ist die Skalierungsstrategie nicht mehr aktuell. Folglich wird die Planung rollierend durchgeführt. Sollten sich durch eine neue Technologie oder veränderte Kostenstruktur neue Möglichkeiten für die MSK ergeben, werden die Steckbriefe der Systemabschnittskonzepte entsprechend angepasst, bzw. ergänzt. In diesem Fall muss die Methodik ab Schritt 3 erneut durchlaufen werden. Sollten sich durch neue Information die Wandlungstreiber

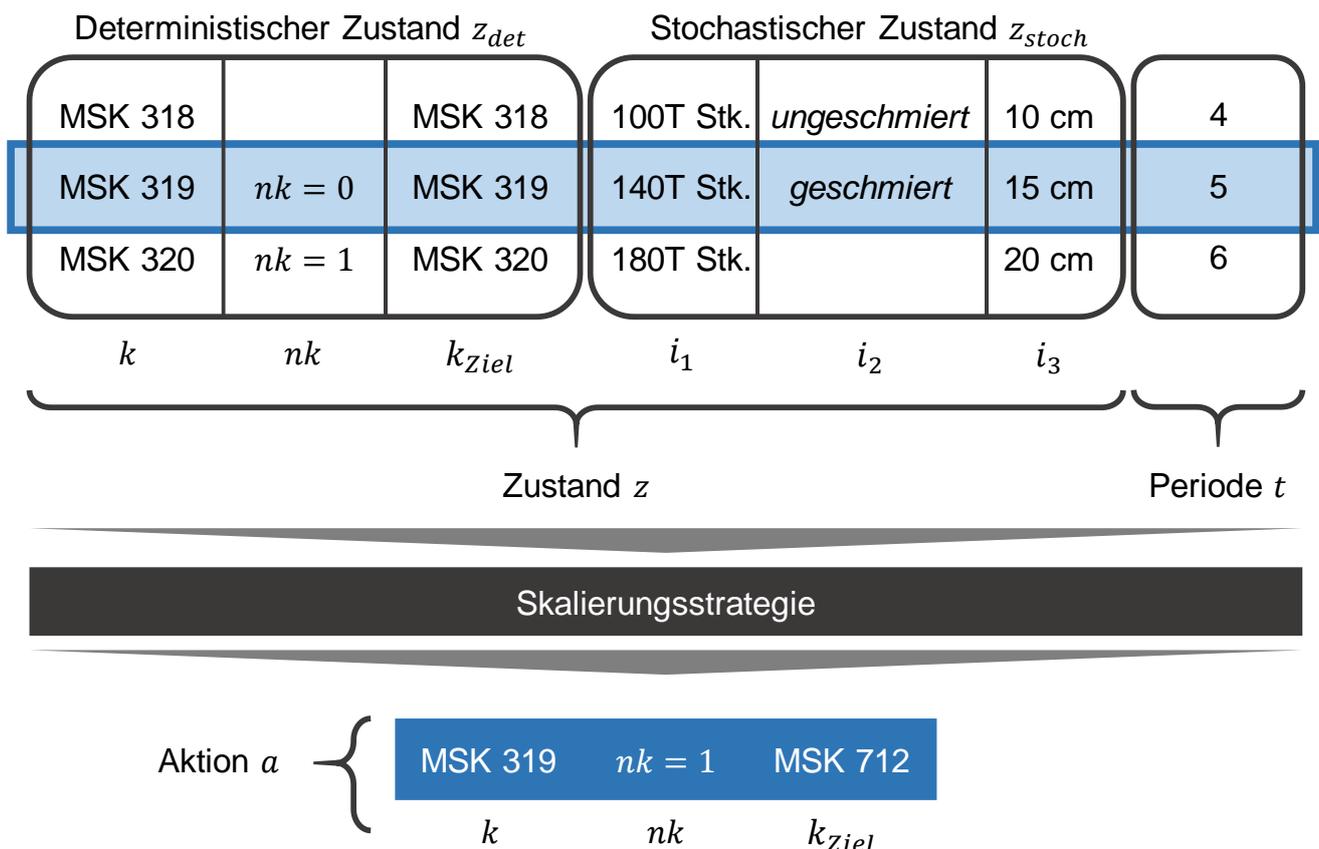


Abbildung 4.38: Beispielhafte Empfehlung aus der Skalierungsstrategie der Lernfabrik ändern, muss die gesamte Methodik ab Schritt 1 erneut durchlaufen werden. Die bestehenden Steckbriefe der Systemabschnittskonzepte dienen in diesem Fall als Grundlage für Schritt 2.

4.4 Schritt 4: Konstruktionsrichtlinien

Die in Schritt 3 entwickelte Skalierungsstrategie beruht auf den in Schritt 2 entwickelten Systemabschnittskonzepten. Diese sind als Grobkonzepte zu verstehen. Nachdem die Entscheidung für die Umsetzung der Grobkonzepte einer MSK getroffen wurde, müssen in der Feinplanung detaillierte Anlagenkonzepte konstruiert werden. Während der Konstruktion werden unter anderem wichtige Detailentscheidungen in Bezug auf die Wandlungsfähigkeit der Anlagen getroffen. In vielen Fällen wird die Wandlungsfähigkeit durch höhere Investitionskosten oder langsamere Prozesszeiten erkauft. Daher ist es wichtig, das richtige Maß der Wandlungsfähigkeit abschätzen zu können. Auf Basis der Skalierungsstrategie können gezielt Konstruktionsrichtlinien abgeleitet werden, die eine optimale Einstellung der Wandlungsfähigkeit unterstützen. Im Folgenden wird erläutert, wie zunächst die Skalierungsstrategie analysiert und anschließend die entsprechenden

Richtlinien abgeleitet werden. Ergebnis des vierten Schritts der Methodik sind die auf einzelne Systemabschnitte bezogenen Konstruktionsrichtlinien.

Mit einer hohen Wahrscheinlichkeit wird die Zuführung der Getriebedeckel des Systemabschnitts mit den Montageaufgaben *Einlegen Zahnrad 1*, *Einlegen Zahnrad 2* und *Einlegen Getriebedeckel* von einer manuellen zu einer automatisierten Ausführung gewandelt. Der Algorithmus wählt basierend auf dieser Analyse Gestaltungsrichtlinien in Bezug auf die Zuführung der Getriebedeckel aus. Eine beispielhafte Gestaltungsrichtlinie ist: „Die Materialbereitstellung für das manuelle Prozessmodul sollte eine definierte Bereitstellung der Teile erfüllen können, welche die Bereitstellung für einen automatisierten Prozess ermöglicht.“

4.4.1 Analyse Skalierungsstrategie

Ziel der Analyse der Skalierungsstrategie ist die Ermittlung eines Erwartungswertes für die Anzahl der Wandlungen auf Systemabschnittsebene. Anhand dieses Wertes lässt sich abschätzen, welche Systemabschnitte, bzw. Module besonders wandlungsfähig konstruiert werden müssen. Im Zuge der Analyse der Skalierungsstrategie werden zunächst die Wandlungen auf Ebene der MSK und aufbauend darauf die Wandlungen auf Ebene der Systemabschnitte betrachtet (Abbildung 4.39).

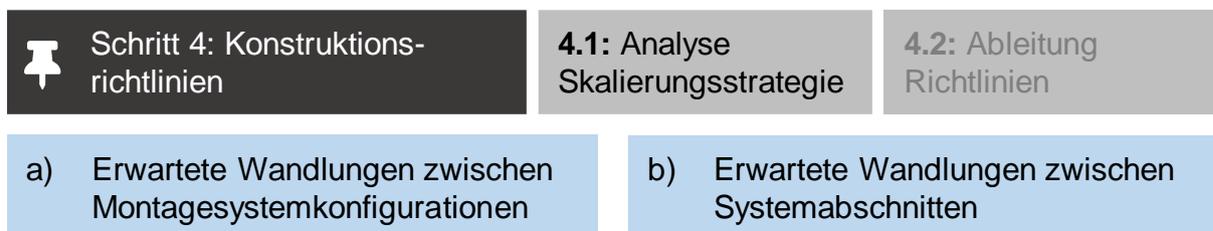


Abbildung 4.39: Prozess der Analyse der Skalierungsstrategie

4.4.1.1 Erwartete Wandlungen zwischen Montagesystemkonfigurationen

In der Skalierungsstrategie ist für jeden Zustand in jeder Planungsperiode eindeutig die zu wählende Aktion definiert. Für den aktuellen Zustand des Montagesystems kann folglich eindeutig ermittelt werden, ob und wenn ja, welche Wandlung zur nächsten Planungsperiode durchgeführt werden wird. Für die folgende Planungsperiode ist somit auch der deterministische Zustand eindeutig definiert. Der stochastische Zustand der folgenden Planungsperiode hängt allerdings von der erweiterten Matrix KM_t der Einzelwahrscheinlichkeiten für die Übergänge zwischen den Zuständen von Planungsperiode

t zu Planungsperiode $t + 1$ ab. Unter der Bedingung, dass ein bestimmter stochastischer Zustand erreicht wird, lässt sich erneut eine definierte Aktion aus dem neuen Zustand ableiten. Dieser neue Zustand wird mit der in KM_t spezifizierten Einzelwahrscheinlichkeit erreicht und geht mit einer Gewichtung in die erwartete Wandlungshäufigkeit $whs_{x \rightarrow y}$ von MSK x auf MSK y ein. Das Gewicht ist durch die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Wandel eintritt, ausgehend vom initialen Zustand der ersten Planungsperiode, definiert.

Durch einen vorwärts gerichteten Algorithmus (Abbildung 4.40) lässt sich, ausgehend von der ersten Planungsperiode, die gesamte Matrix WHS der erwarteten Wandlungshäufigkeiten der MSK berechnen. Die Aneinanderreihung von Zuständen von Planungsperiode t zu Planungsperiode $t + 1$ über den gesamten Planungshorizont wird

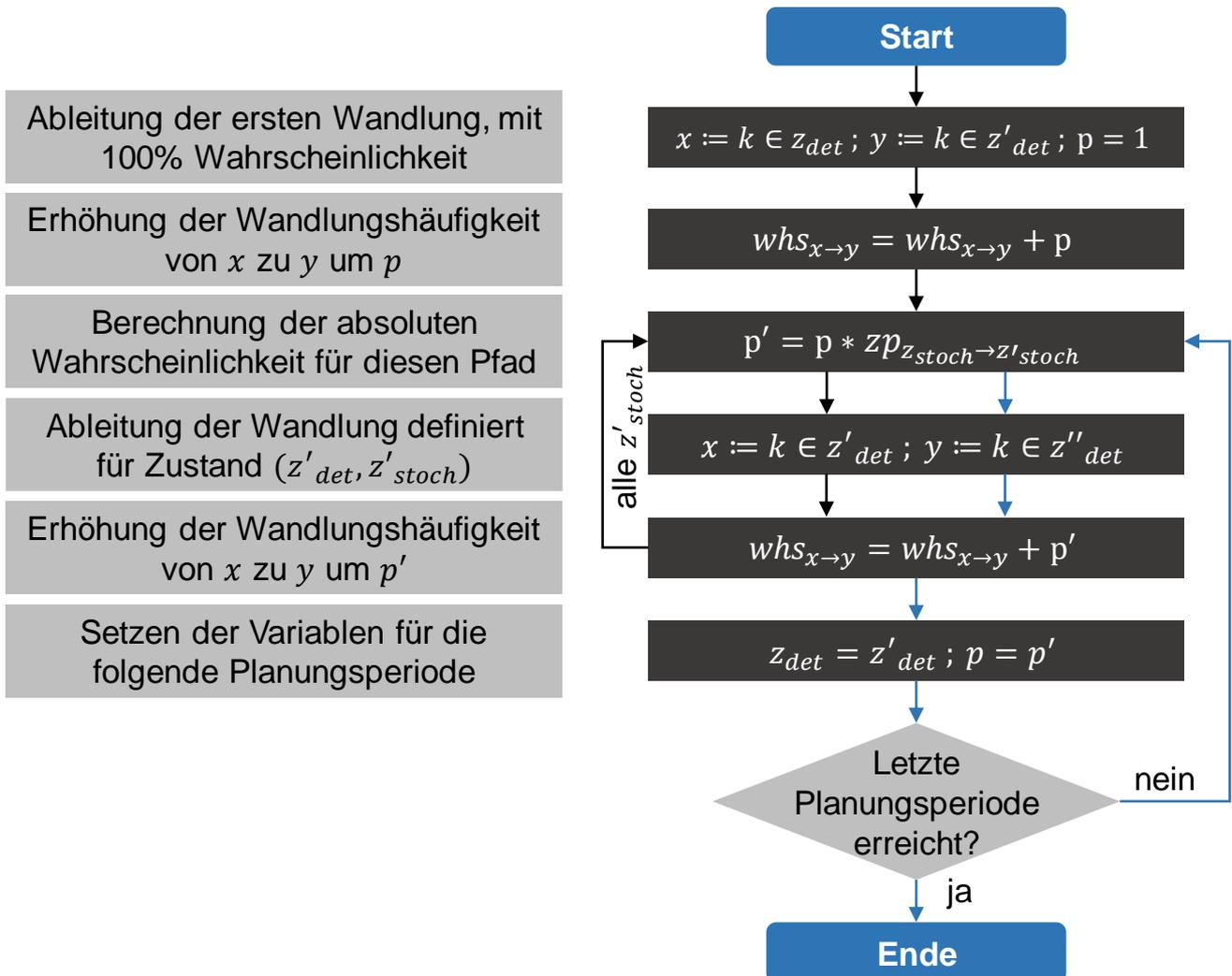


Abbildung 4.40: Algorithmus für die Berechnung der erwarteten Wandlungen zwischen Montagesystemkonfigurationen

als Skalierungspfad bezeichnet. Der Algorithmus durchläuft alle Skalierungspfade, welche durch die Skalierungsstrategie vordefiniert sind. Ein Skalierungspfad teilt sich in jeder Planungsperiode auf in weitere Skalierungspfade, für jeden stochastischen Zustand, der mit einer Wahrscheinlichkeit größer Null erreicht wird. An jeder Verzweigung der Skalierungspfade wird ein neuer Ausführungsstrang des Algorithmus erzeugt, der die Skalierungsstrategie bis zum Ende des Planungshorizonts durchläuft.

Als obere Schranke für die Summe der Erwartungswerte in *WHS* dient die Anzahl Planungsperioden t_{max} im gesamten Planungshorizont. Es kann maximal einmal pro Planungsperiode gewandelt werden.

4.4.1.2 Erwartete Wandlungen zwischen Systemabschnitten

Aus der Wandlung von einer MSK auf die nächste, lässt sich ableiten welche Systemabschnitte entfernt, hinzugefügt oder gewandelt werden müssen. Die Wandlungen auf Ebene der MSK werden vollständig ausgewertet und die resultierenden Wandlungen auf Systemabschnittsebene mit dem Erwartungswert der Wandlung auf Ebene der MSK gewichtet einer Liste hinzugefügt. Es resultiert eine Liste, welche die vollständigen Wandlungshäufigkeiten auf Ebene der Systemabschnitte $wha_{0 \rightarrow y}$, $wha_{x \rightarrow 0}$ und $wha_{x \rightarrow y}$ enthält. Zentraler Schritt bei der Überführung der Wandlungshäufigkeiten der MSK auf die Wandlungshäufigkeiten ist die Auswertung einer Wandlung zwischen zwei MSK. Relevant ist in diesem Schritt lediglich die Differenz zwischen den in der ursprünglichen MSK enthaltenen Systemabschnitten und den in der zukünftigen MSK enthaltenen Systemabschnitten. Aus einer Wandlung zwischen zwei MSK, können mehrere Wandlungen zwischen Systemabschnitten resultieren. Dabei werden zunächst alle Paare aus Systemabschnitten identifiziert, welche die gleichen Montageaufgaben erfüllen, sich aber zwischen den MSK unterscheiden. Jedes dieser Paare wird als eigenständige Wandlung in die Liste der Wandlungen auf Systemabschnittsebene aufgenommen, bzw. auf die aus anderen Wandlungen bestehende Wandlungshäufigkeit addiert. Anschließend werden die Systemabschnitte identifiziert, für die kein Partner in der jeweils anderen MSK existiert, da sie entweder aus der ursprünglichen MSK entfernt oder zu der neuen MSK hinzugefügt werden. Diese Systemabschnitte werden jeder einzeln in die Liste der Wandlungen der Systemabschnitte eingetragen.

Eine beispielhafte Auswertung einer Wandlung zwischen MSK 319 und MSK 712 ist in Abbildung 4.41 abgebildet. Die Systemabschnitte der beiden MSK unterscheiden sich an Pressen 2 und 3. Es findet eine Wandlung von Teilautomatisiertes Pressen 2 und 3

bis 15 cm auf Teilautomatisiertes Pressen 2 und 3 bis 20 cm statt. Die zugehörige Wandlungshäufigkeit wird um die Wandlungshäufigkeit der Wandlung von MSK 319 auf MSK 712 in Höhe von 0,2 erhöht. Nach dem Vorgehen für die in Abbildung 4.41 dargestellte Wandlung, werden die weiteren Wandlungen der Lernfabrik ausgewertet. Es resultiert eine Liste der Wandlungen auf Systemabschnittsebene unter Angabe der jewei-

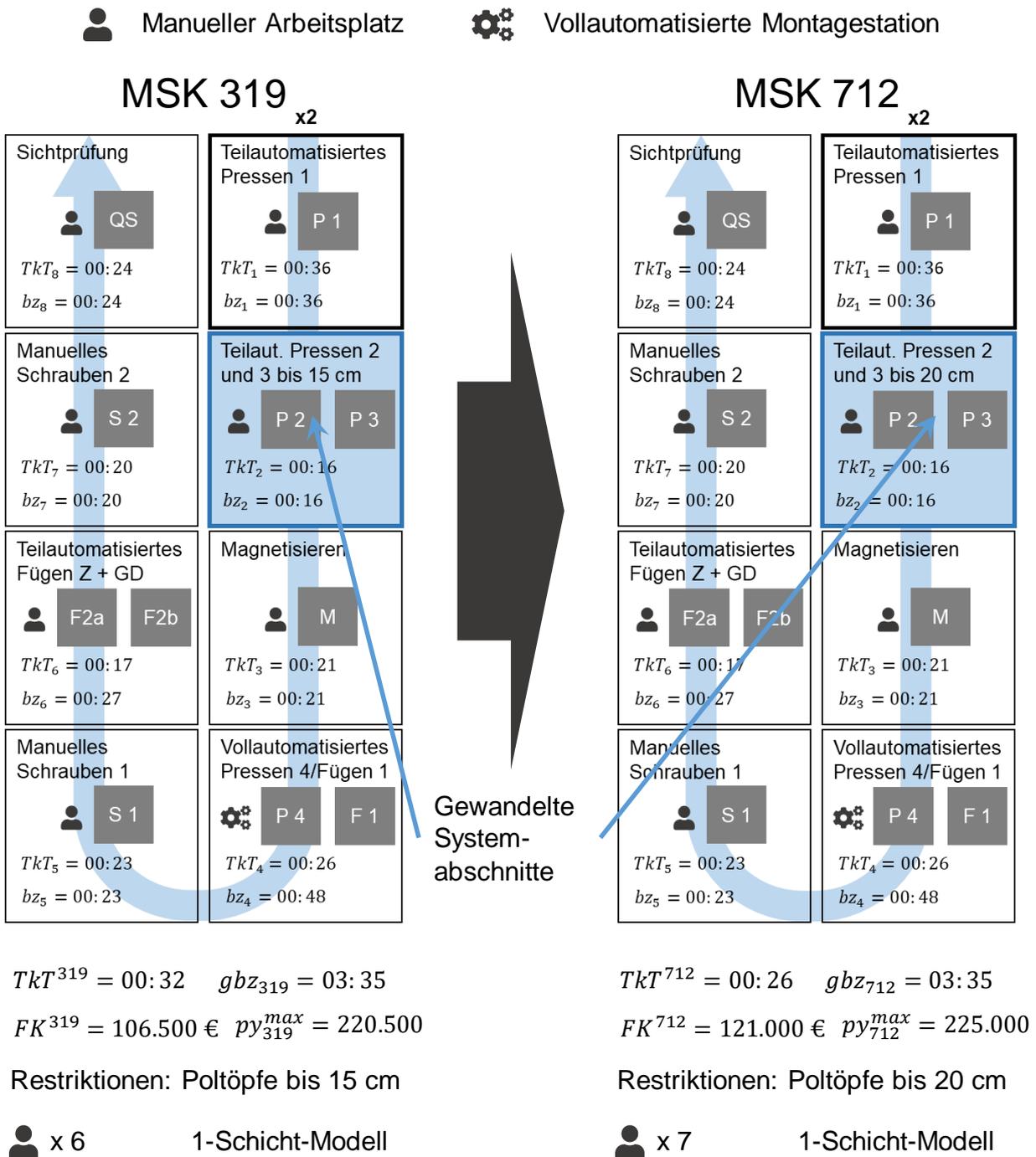


Abbildung 4.41: Wandlung von MSK 319 auf MSK 712

ligen Wandlungshäufigkeit. In Abbildung 4.42 werden auszugsweise die vier Wandlungen mit den höchsten Wandlungshäufigkeiten der Lernfabrik dargestellt. Der Wandel mit dem höchsten Wert ist die Wandlung vom Systemabschnitt *Manuelles Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel* zum Systemabschnitt *Teilautomatisiertes Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel*. Über den Planungshorizont von 8 Jahren wird erwartet, dass diese Wandlung 0,8-mal stattfindet. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Wandlung zumindest einmal stattfindet, beträgt 80%. Die zweite Wandlung beinhaltet die Teilautomatisierung von Pressen 1. Die in Abbildung 4.41 dargestellte Wandlung ist in der dritten Zeile eingetragen. Die Duplizierung der teilautomatisierten Presse 1 führt zu einer Wandlung bei der lediglich ein Systemabschnitt hinzugefügt, jedoch keiner entfernt wird. Daher bleibt in der vierten Zeile die erste Spalte frei.

Entfernter Systemabschnitt r	Hinzugefügter Systemabschnitt s	$wha_{r \rightarrow s}$
Manuelles Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel	Teilautomatisiertes Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel	0,8
Manuelles Pressen der Magnete und Bügelfedern	Teilautomatisiertes Pressen der Magnete und Bügelfedern	0,6
Teilautomatisiertes Pressen 2 und 3 bis 15 cm	Teilautomatisiertes Pressen 2 und 3 bis 20 cm	0,4
	Teilautomatisiertes Pressen der Magnete und Bügelfedern	0,3

Abbildung 4.42: Auszug aus den Wandlungen auf Systemabschnittsebene der Lernfabrik

4.4.2 Ableitung konstruktiver Richtlinien

Die relevanten Wandlungen und ihre erwartete Häufigkeit sind mit Abschluss des Teilschritts 4.1 bekannt. Der Schritt 4.2 (Abbildung 4.43) dient der Ableitung geeigneter Richtlinien für die Konstruktion der Anlagen. Zu diesem Zweck werden die identifizierten Wandlungen auf Ebene der Systemabschnitte zunächst in einem morphologischen Kasten (Abbildung 4.44) charakterisiert. Anschließend werden die Richtlinien gemäß der Einordnung abgeleitet.

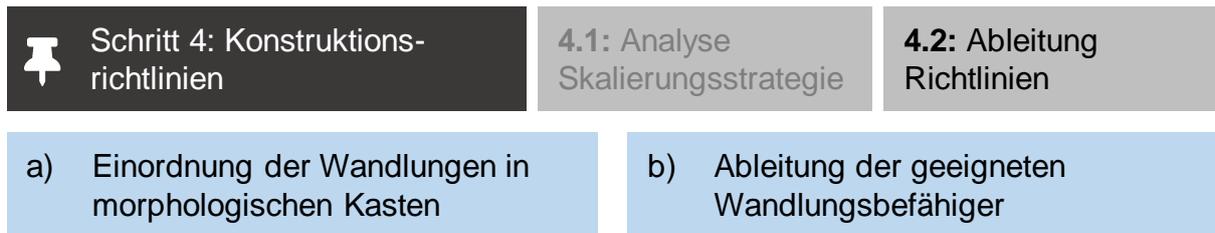


Abbildung 4.43: Prozess der Ableitung von Richtlinien

4.4.2.1 Einordnung der Wandlungen in morphologischen Kästen

Um geeignete Richtlinien ableiten zu können, werden die Wandlungen zunächst anhand von sechs Kriterien in einen morphologischen Kasten eingeordnet. Diese Charakterisierung wird für jede der in Schritt 4.1 identifizierten Wandlungen auf Basis der Listen der Wandlungen und den Steckbriefen der beteiligten Systemabschnittskonzepte durchgeführt. Abbildung 4.44 zeigt die Einordnung in den morphologischen Kasten am Beispiel der in Abbildung 4.42 dargestellten wahrscheinlichsten Wandlung. Die sechs Kategorien werden im Folgenden anhand dieser Wandlung beschrieben:

Einordnung der Wandlung von „manuelles Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel“ auf „Teilautomatisiertes Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel“ in den morphologischen Kasten				nicht gewähltes Feld
Kriterium	Ausprägung			
Wandlungsart	Rein	Raus	Austausch	
Wandlungshäufigkeit	Niedrig	Mittel	Hoch	
Investitionsvolumen	Niedrig	Mittel	Hoch	
Gegenereignis	ja	nein		
Betroffenes Modul	Transport	Prozess	Zuführung	
Automatisierungsgrad	Manuell → Manuell	Manuell → Automatisiert	Automatisiert → Manuell	Automatisiert → Automatisiert

Abbildung 4.44: Morphologischer Kasten mit einer beispielhaften Ausprägung für die Lernfabrik

Wandlungsart: Mit diesem Kriterium wird unterschieden, ob bei der Wandlung ein Systemabschnitt hinzugefügt wurde, entfernt wurde oder ein Systemabschnitt gegen einen anderen ausgetauscht wurde.

Der Systemabschnitt „Manuelles Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel“ wird zugunsten des Systemabschnitts „Teilautomatisiertes Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel“ gewandelt. Es wird also ein Systemabschnitt gegen einen anderen getauscht, daher ist für die Wandlungsart „Austausch“ zu wählen.

Wandlungshäufigkeit: Die Wandlungshäufigkeit $wha_{x \rightarrow y}$ der betrachteten Wandlung gibt den Erwartungswert für die absolute Häufigkeit der betrachteten Wandlung an. Für die Auswahl geeigneter Wandlungsbefähiger ist es wichtig zu berücksichtigen, ob ein Systemabschnitt lediglich einmal oder sogar mehrfach gewandelt wird. Für den Fall der mehrfachen Wandlung muss berücksichtigt werden, dass die vollzogene Wandlung mit geringem Aufwand wieder rückgängig gemacht werden kann. Der Wert von $wha_{x \rightarrow y}$ wird auf die Kategorien *niedrig* $[0; 1]$, *mittel* $(1; 3]$ und *hoch* $(3; \infty]$ übertragen. Die Grenze zwischen den Kategorien *niedrig* und *mittel* wird gewählt, da ab dieser Schwelle eine zumindest einfache Wandlung als wahrscheinlich gilt. Die Grenze zwischen den Kategorien *mittel* und *hoch* wird gewählt, da ab dieser Schwelle eine mehrfache Wandlung als sehr wahrscheinlich gilt. Die absolute Wandlungshäufigkeit $wha_{x \rightarrow y}$ kann direkt aus dem Eintrag der Wandlung in der entsprechenden Wandlungsliste übernommen werden.

Mit einer erwarteten Wandlungshäufigkeit von 0,8 wird die Wandlungshäufigkeit als niedrig bewertet.

Investitionsvolumen: Die Anschaffungskosten der Systemabschnitte werden über die jährlichen Fixkosten in den Betriebskosten abgeschrieben (siehe Formel 4-30). Wird ein Systemabschnitt aus der Montagesystemkonfiguration entfernt, führt dies zu einer außerordentlichen Abschreibung in Abhängigkeit des Wandlungspotenzialwerts. Das Investitionsvolumen bezieht sich daher an dieser Stelle auf die Betriebsmittel, welche durch die Wandlung aus dem Montagesystem entfernt werden. Diese Betriebsmittel lösen eine außerordentliche Abschreibung in Relation zu ihrem Wandlungspotenzialwert aus (siehe Unterkapitel 4.2.1.6). Daher spielt die Wandlungsfähigkeit insbesondere für Betriebsmittel mit einem hohen Investitionsvolumen eine große Rolle. Die Investitionskosten $IK_{r \rightarrow s}$ der bei der Wandlung von Systemabschnitt r auf Systemabschnitt s , bzw. der Entfernung von Systemabschnitt r entfernten Betriebsmittel, werden

auf die Gesamtinvestition IK_S und die Anzahl Systemabschnitte NA_s der initialen MSK s normiert. Das normierte Investitionsvolumen $|IK_{r \rightarrow s}|$ wird definiert als: $|IK_{r \rightarrow s}| = IK_{r \rightarrow s} * \frac{NA_s}{IK_S}$. Der Wert von $|IK_{r \rightarrow s}|$ gibt an, in welchem Verhältnis der Anschaffungswert der entfernten Betriebsmittel zu den Kosten einer durchschnittlichen Montagestation des Montagesystems stehen. $|IK_{r \rightarrow s}|$ wird auf die Kategorien *niedrig* $[0; 0,5]$, *mittel* $(0,5; 1,5]$ und *hoch* $(1,5; \infty)$ übertragen. Bei einer Wandlung aus der Kategorie *niedrig*, wird folglich ein Systemabschnitt entfernt, der maximal halb so teuer wie der Durchschnitt ist. Das absolute Investitionsvolumen $IK_{r \rightarrow s}$ wird auf Basis der Steckbriefe der Systemabschnittskonzepte berechnet.

Bei der Wandlung von Systemabschnitt *Manuelles Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel* zum Systemabschnitt *Teilautomatisiertes Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel* wird an der Station für das Fügen der Getriebedeckel die Zuführung automatisiert. Dabei wird lediglich die bestehende Rollenbahn für die Zuführung der Getriebedeckel aus dem System entfernt. Die Anschaffungskosten für die Rollenbahn betragen 2.000 €. Die Anschaffungskosten für die 8 Systemabschnitte der Ausgangskonfiguration betragen 263.000 €. Das normierte Investitionsvolumen für diese Wandlung beträgt 0,06 und ist somit niedrig. Die Neuinvestitionen werden über die regelmäßige Abschreibung berücksichtigt.

Gegenereignis: Als Gegenereignis zur Wandlung von Systemabschnitt x auf Systemabschnitt y ist die Wandlung von Systemabschnitt y auf Systemabschnitt x definiert. Analog dazu ist das Gegenereignis des Hinzufügens von Systemabschnitt x das Entfernen des Systemabschnitts x aus der MSK. Falls das Gegenereignis zu einer Wandlung mit einer Wahrscheinlichkeit größer Null in der Wandlungsliste geführt wird, deutet dies darauf hin, dass Betriebsmittel der beteiligten Systemabschnitte mehrfach über den Lebenszyklus des Montagesystems in einer MSK verwendet werden. Die Information für dieses Kriterium stammt aus der Wandlungsliste der Systemabschnitte.

Für die betrachtete Wandlung tritt kein Gegenereignis in der Liste auf. Folglich ist nicht zu erwarten, dass der Systemabschnitt *Teilautomatisiertes Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel* wieder in den Systemabschnitt *Manuelles Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel* rückgebaut wird.

Betroffenes Modul: Wenn bei einer Wandlung zwischen Systemabschnitten lediglich einzelne Module der Systemabschnitte getauscht werden, ist eine wandlungsfähige Auslegung der Module besonders wichtig. Diesem Umstand wird mit diesem Kriterium

Rechnung getragen. Es wird angegeben welche der Module Transport, Zuführung oder Prozess, bzw. ganzer Systemabschnitt, an der Wandlung beteiligt sind. Diese Information lässt sich aus den Steckbriefen der Systemabschnittskonzepte ablesen.

Von der Wandlung ist lediglich das Zuführmodul betroffen. Es wird ausschließlich die Zuführung an der Montagestation zum Fügen der Getriebedeckel automatisiert.

Automatisierungsgrad: Die Konstruktionsrichtlinien unterscheiden sich je nachdem, ob sie sich auf einen automatisierten oder einen manuellen Systemabschnitt beziehen. Dabei spielen ggf. beide an der Wandlung beteiligten Systemabschnitte eine Rolle. Wenn der Automatisierungsgrad eines oder mehrerer Module angepasst wird, sind besondere Richtlinien wichtig. Es wird unterschieden in die vier Fälle „manuell zu manuell“, „manuell zu automatisiert“, „automatisiert zu manuell“ und „automatisiert zu automatisiert“. Die Zuordnung zu einem Modul oder dem gesamten Systemabschnitt erfolgt über das Kriterium „Betroffenes Modul“. Die benötigten Informationen können aus den Steckbriefen der Systemabschnittskonzepte entnommen werden.

Bei der betrachteten Wandlung wird die manuelle Zuführung der Montagestation zum Einlegen der Getriebedeckel automatisiert. Die Wandlung wird in die Kategorie „manuell zu automatisiert“ eingeordnet.

4.4.2.2 Ableitung der geeigneten Wandlungsbefähiger

In Unterkapitel 2.1.2.1 wurde das Konzept der Wandlungsbefähiger eingeführt. Durch gezielten Einsatz von Wandlungsbefähigern können Anlagen mit der richtigen Wandlungsfähigkeit ausgestattet werden. In (Pachow-Frauenhofer 2012) wird ein Katalog präsentiert, der für Prozesseinrichtungen, Ressourcen, die Organisation und den Menschen in den Rubriken Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität konkrete Gestaltungsmerkmale vorschlägt. Dieser Katalog bildet die Grundlage für die Konstruktionsrichtlinien, welche sich aus dem morphologischen Kasten ergeben. Berücksichtigt werden im morphologischen Kasten ausschließlich die Gestaltungsmerkmale für Prozesseinrichtungen und Ressourcen, da die Konstruktionsrichtlinien lediglich auf die Hardware abzielen, nicht auf die Organisation oder den Menschen.

In einem Katalog der Konstruktionsrichtlinien (siehe Abschnitt A7) sind die Gestaltungsmerkmale aus (Pachow-Frauenhofer 2012) ergänzt um weitere selbstentwickelte Richtlinien aufgeführt. Jede der Konstruktionsrichtlinien ist mit mindestens einer Kombination der Kriterienausprägungen des morphologischen Kastens verknüpft. Auf diese Weise

können die für eine konkrete Wandlung zugewiesenen Konstruktionsrichtlinien identifiziert werden.

Aufgrund der Einordnung der betrachteten Wandlung der Lernfabrik in den morphologischen Kasten werden fünf Gestaltungsrichtlinien empfohlen (siehe Abbildung 4.45).

Die basierend auf den wahrscheinlichsten Wandlungen abgeleiteten Gestaltungsrichtlinien bilden den Abschluss der „Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme“. Die Gestaltungsrichtlinien werden zur Unterstützung bei der Erreichung der optimalen Wandlungsfähigkeit an die Konstruktion übergeben.

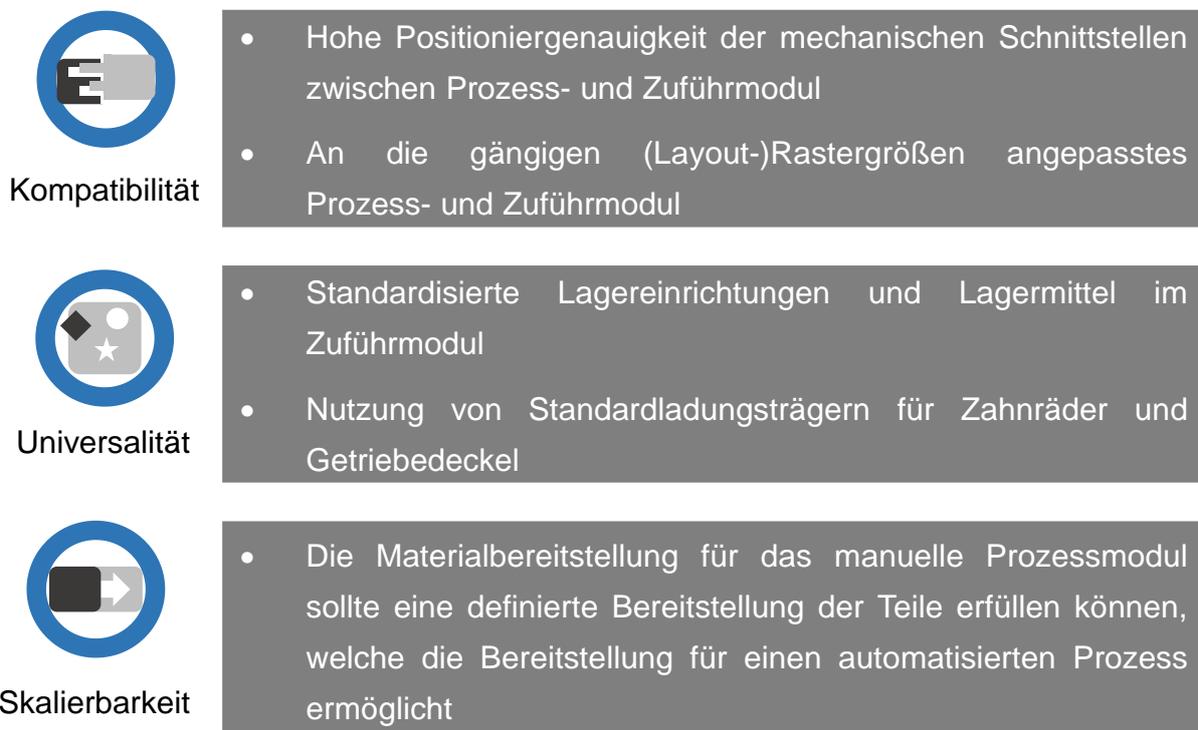


Abbildung 4.45: Abgeleitete Gestaltungsrichtlinien für den Systemabschnitt *Manuelles Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel*

5 Prototypische Anwendung in der Brennstoffzellenproduktion

In diesem Kapitel wird die Anwendung der Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme mithilfe der eigenentwickelten Planungssoftware „Planung von Montagesystemen mit **skalierbarem Automatisierungsgrad**“ (SkaliA) vorgestellt. Als Anwendungsbeispiel dient die Produktion von Hochdruckventilen für den Einsatz in mobilen Brennstoffzellen bei einem Industriepartner. Die Erprobung der Methodik wurde im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „Inline“ durchgeführt (EU Inline 2017). Der Anwendungspartner produziert Hochdruckventile in zwei Produktfamilien. Es werden sowohl 700 Bar Ventile für den Einsatz in automobilen Anwendungen, als auch 350 Bar Ventile für den Einsatz in Bussen, Flurförderzeugen, etc. in verschiedenen Varianten montiert.

Der Produktionsprozess von Hochdruckventilen beim Anwendungspartner besteht aus zwei Schritten außerhalb des Reinraums und vier Hauptschritten innerhalb des Reinraums. Der Gussrohling für den Ventilkörper wird von einem Lieferanten bezogen. Der Ventilkörper wird in einem Bearbeitungszentrum zerspannt. Der Ventilkörper wird mehreren Oberflächenbehandlungen bei externen Dienstleistern sowie einem internen Waschprozess unterzogen. Die anschließenden 4 Hauptschritte werden in einem Reinraum durchgeführt, da bereits kleine Verunreinigungen unter einem Betriebsdruck von bis zu 700 Bar die Dichtungen des Ventilkörpers beschädigen können. Der Ventilkörper verfügt über Ein- und Ausgänge, um Funktionen wie Betankung, manuelle Evakuierung oder Übertemperaturlöschung realisieren zu können. Die Module für den Einbau in die Ein- und Ausgänge werden in der „Modulmontage“ (a) vormontiert. Beim „Einbau der Module“ (b) werden die Module in den Ventilkörper eingebaut. Es schließt sich die „Dichtheitsprüfung/ EOL“ (c) an. Den letzten Hauptschritt bildet die „Verpackung“ (d) des Ventils.

Die internen und externen Fertigungsschritte am Ventilkörper stehen nicht im Fokus der entwickelten Methodik. Es werden ausschließlich die Montageprozesse betrachtet. Somit bildet der Reinraum die Systemgrenze des Anwendungsfalls. Die Hauptschritte des Montageprozesses im Reinraum sind in Abbildung 5.1 dargestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Planungssoftware SkaliA entwickelt. Der Einsatz von SkaliA erfüllt drei Ziele. Erstens führt SkaliA den Planer durch die Methodik, indem

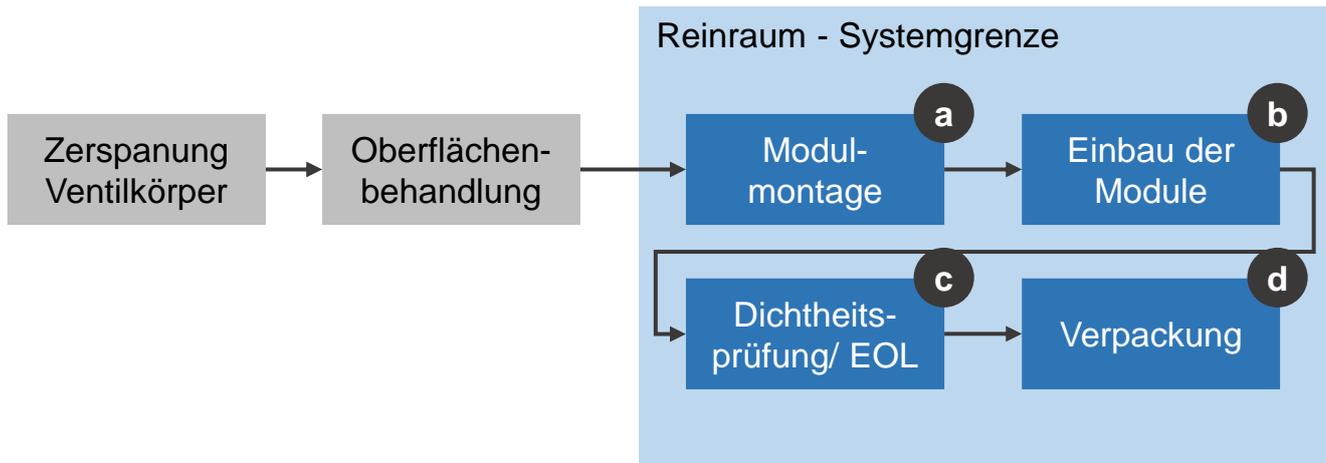


Abbildung 5.1: Produktionsprozess der Hochdruckventile beim Anwendungspartner die vier Schritte durchlaufen werden. Zweitens führt SkaliA die komplexen Berechnungen durch, welche insbesondere bei der Berechnung der aggregierten Szenarien und der Skalierungsstrategie erforderlich sind. Drittens visualisiert SkaliA die Ergebnisse der Methodik um die intuitive Verwendung der Ergebnisse zu erleichtern (siehe Abbildung 5.9 bis Abbildung 5.12 sowie Abbildung 5.23 und Abbildung 5.24). Je nach Komplexität des Anwendungsfalls erfordert die Methodik einen sehr hohen Rechenaufwand. Daher wurde SkaliA als Webanwendung mit einem eigenen Server für die Durchführung der Berechnungen und einer getrennten Benutzeroberfläche entwickelt. Die Planungsergebnisse werden in einer Datenbank gespeichert. Diese Architektur ermöglicht es, die Berechnung unabhängig vom Endgerät des Planers auf einem leistungsfähigen Computer durchzuführen.

5.1 Schritt 1: Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit

Die Aufnahme der Informationen zur Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit wurde in Interviews mit Produktmanagern und Konstrukteuren beim Anwendungspartner durchgeführt. Die ermittelten Schätzwerte wurden in SkaliA eingepflegt und in die aggregierten Szenarien überführt.

5.1.1 Szenariomodell

Das finale Szenariomodell für den Anwendungsfall besteht aus der Verknüpfung von 13 Wandlungstreibern mit 6 Rezeptor-Kennzahlen. Die Werte für das Szenariomodell wurden in (A_Bouchhima 2019) erhoben.

5.1.1.1 Aufnahme Wandlungstreiber

Basierend auf den Interviews mit den Experten wurden 13 Wandlungstreiber $w_1 - w_{13}$ definiert, von deren Eintreten spürbare Auswirkungen auf den Anwendungspartner erwartet werden. Abbildung 5.2 zeigt eine Übersicht der Wandlungstreiber. Im Folgenden werden die definierten Wandlungstreiber beschrieben.

Nummer	Wandlungstreiber
W_1	Japanischer Zulieferer tritt in den internationalen Markt ein
W_2	Kleiner Konkurrent erlangt Serienkompetenz
W_3	Hyundai beginnt mit der Serienproduktion
$W_4 - W_7$	Audi ₄ , BMW ₅ , Daimler ₆ , Honda ₇ beginnt mit der Serienproduktion
W_8	Chinesen beenden Brennstoffzellen-Strategie
W_9	Chinesischer BZ-Bus-Markt floriert
W_{10}	Chinesischer BZ-Bus-Markt wird für Ausländer geschlossen
W_{11}	Normung und Standardisierung auf europäischer Ebene
W_{12}	Anbieter von Tanksystemen werden neue Kunden
W_{13}	Belieferung für BZ-Kräne im Hafen von Los Angeles

Abbildung 5.2: Übersicht der definierten Wandlungstreiber

W_1 : Der Markt für mit Brennstoffzellen angetriebene Fahrzeuge wird dominiert durch Toyota. Für die benötigten Hochdruckventile hat Toyota lediglich einen exklusiven Lieferanten qualifiziert. Mit seinen aktuellen Kapazitäten ist der Hersteller mit dem Toyota-Auftrag voll ausgelastet. Die Experten beim Anwendungspartner erwarten jedoch, dass der **japanische Zulieferer** sich öffnet und versuchen wird, auf den internationalen Markt zu treten, um weitere OEMs zu beliefern.

W_2 : Neben dem Zulieferer von Toyota und dem Anwendungspartner befasst sich eine Gruppe kleiner Unternehmen mit der Entwicklung eigener Hochdruckventile. Diese Unternehmen sind zum Teil in der Lage, prototypische Ventile in der geforderten Qualität zu produzieren. Allerdings fehlen ihnen die Möglichkeiten, ein Hochdruckventil in Serie

zu produzieren. Mit einem Technologiesprung oder einem externen Investor könnte einer dieser **kleinen Produzenten von Hochdruckventilen** zu einem direkten Konkurrenten des Anwendungspartners werden.

Neben Toyota entwickeln weitere OEMs eigene Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Stärkster Konkurrent ist Hyundai (W_3) mit dem SUV Nexo. Als weitere Konkurrenten gelten laut dem Anwendungspartner in erster Linie Audi (W_4), BMW (W_5), Daimler (W_6) und Honda (W_7). Von all den genannten OEMs erwartet der Anwendungspartner einen Einstieg in **die Serienproduktion von Brennstoffzellen-Fahrzeugen**.

W_8 : Ein wichtiger Markt für den Absatz der 350 Bar Ventile ist der chinesische Markt für Busse. Einige Tausend Busse mit Brennstoffzellenantrieb sind in China bereits im Einsatz. Ein massiver Ausbau der Kapazitäten ist im 10-Jahres-Plan der chinesischen Regierung verankert. Der Anwendungspartner sieht jedoch die Gefahr, dass **die Chinesen ihre Strategie für Brennstoffzellen-Busse aufgeben**. Dies wäre ein starker Dämpfer für den Absatz von 350 Bar Ventilen.

W_9 : Der Anwendungspartner sieht die Chance, sich weiter **im chinesischen Markt** für Busse zu etablieren und von einem **massiven Anstieg** der Nachfrage zu profitieren.

W_{10} : Eine weitere Entwicklung des **Bus-Geschäfts in China** könnte eine **protektionistische Haltung** der Regierung sein. Der Anwendungspartner befürchtet, dass der Markt sich zwar positiv entwickeln, die chinesische Regierung ihn aber vor ausländischen Lieferanten abschotten könnte.

W_{11} : Die **internationalen Normen und Standards** für Brennstoffzellen sind sehr heterogen. In der Folge müssen auch die Hochdruckventile gezielt auf die unterschiedlichen Märkte angepasst werden. Diese Fragmentierung hemmt das Wachstum der Absatzmärkte. Der Anwendungspartner hält eine zeitnahe Konsolidierung der Normen zumindest auf europäischer Ebene für möglich.

W_{12} : Ein elementarer Aspekt der Verbreitung des individuellen Automobilverkehrs mit der Brennstoffzelle ist die Dichte des Tankstellennetzes. Sollte die Brennstoffzelle sich im Automobil durchsetzen, werden auch im Bereich der Tankstellen viele Ventile nachgefragt werden. Der Druck von **Tanksystemen** liegt bei 1000 Bar, was eine neue Anforderung für den Anwendungspartner darstellt, falls er Kunden in diesem Marktsegment gewinnt.

W_{13} : Die Regierung des Bundesstaates Kalifornien fördert den Einsatz der Brennstoffzelle in mehreren Initiativen. Ein großes Projekt unterstützt die Ausstattung der **Verladekräne im Hafen von Los Angeles** mit Brennstoffzellen. Die Systeme basieren auf den 350 Bar Ventilen. Die Brennstoffzellen für den Einsatz in Verladekränen müssen im Vergleich zu den Brennstoffzellen, die im Bus eingesetzt werden, eine höhere Leistung erbringen. Diese Anforderung führt dazu, dass ein erhöhtes Volumen pro Zeit an Wasserstoff in den Stack der Brennstoffzelle eingespeist werden muss. Daraus resultiert die Anforderung an einen erhöhten Fließgrad des Tankventils.

5.1.1.2 Zuordnung Wandlungstreiber und Rezeptoren

Die Wandlungstreiber werden den in Unterkapitel 2.1.2.4 eingeführten Rezeptoren zugeordnet. Abbildung 5.3 zeigt die Zuordnung der 13 Wandlungstreiber zu den Rezeptoren, auf welche sie einen Einfluss haben. Die Rezeptoren Qualität, Technologie und

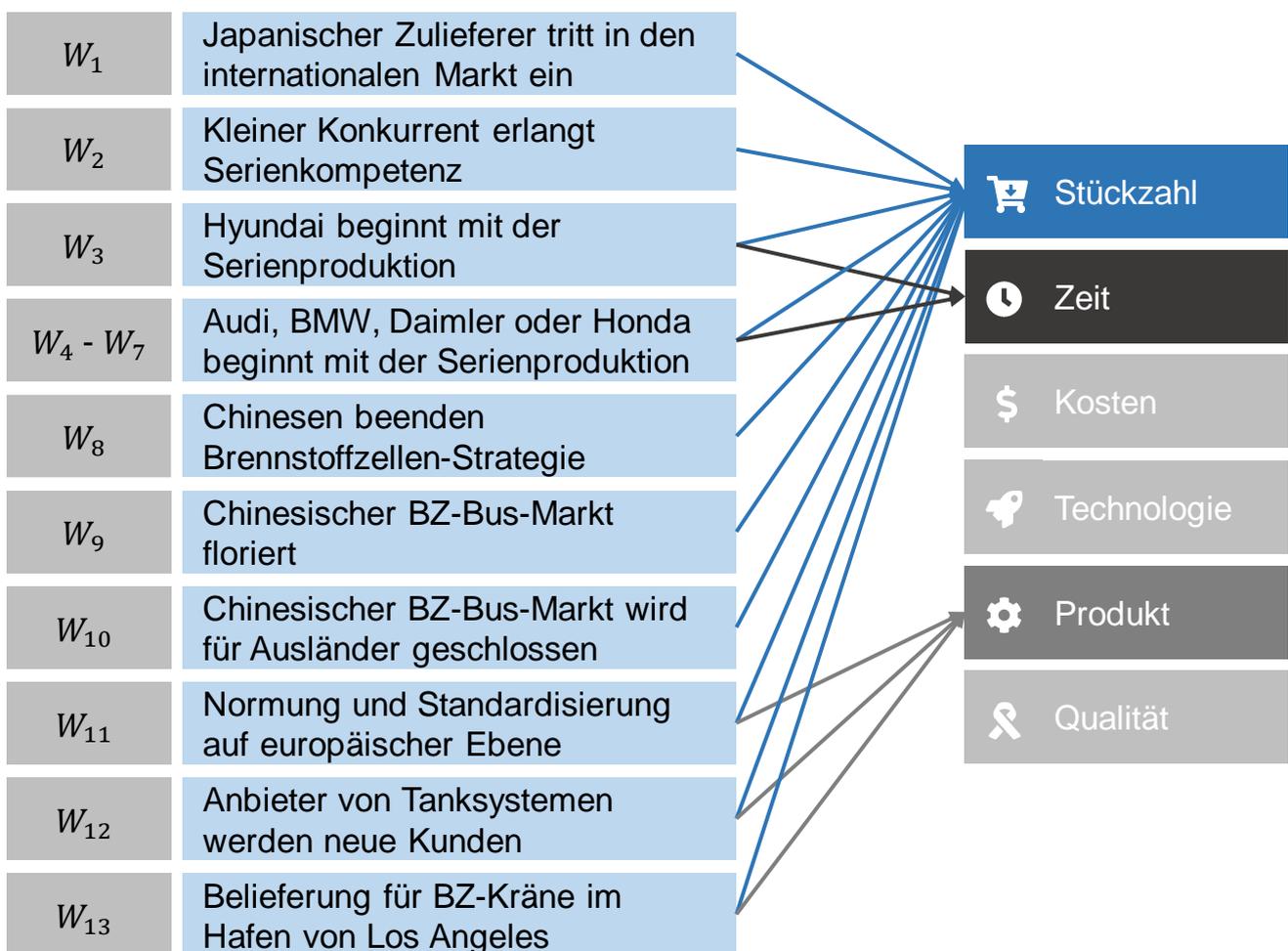


Abbildung 5.3: Verknüpfung Wandlungstreiber und Rezeptoren

Kosten werden nicht durch die definierten Wandlungstreiber beeinflusst. Für die Erstellung des Szenariomodells wird folglich angenommen, dass sich diese Rezeptoren statisch verhalten werden.

Der Eintritt des japanischen Zulieferers in den internationalen Markt (W_1) und die Erlangung der Serienkompetenz eines kleinen Konkurrenten (W_2) wirken sich auf den Rezeptor Stückzahl aus, da erwartet wird, dass ein Teil des Marktanteils des Anwendungspartners an die neuen Konkurrenten gehen wird. Beim Eintritt in die Serienproduktion eines neuen OEMs ($W_3 - W_7$), erwartet der Anwendungspartner sowohl steigende Stückzahlen, als auch strengere Vorgaben für die Lieferzeit, als sie bisher für Prototypen und in der Kleinserie gefordert werden. Vom Eintritt der Wandlungstreiber W_8 , W_9 und W_{10} mit Bezug auf den chinesischen Markt werden lediglich Auswirkungen auf die Stückzahl erwartet. Der Anwendungspartner erwartet beim Inkrafttreten einheitlicher Normen und Standards in Europa (W_{11}) zwei Effekte. Zum einen wird sich durch die Stärkung der Technologie die Stückzahl erhöhen. Zum anderen werden die Ventile an die neuen Anforderungen angepasst werden müssen. Es gibt also eine Auswirkung auf den Rezeptor Produkt. Sollten Anbieter von Tanksystemen als neue Kunden gewonnen werden (W_{12}), erwartet der Anwendungspartner Auswirkungen auf den Rezeptor Stückzahl, da ein neues Kundensegment mit neuen Aufträgen gewonnen wird. Ebenso wird eine Auswirkung auf den Rezeptor Produkt erwartet, da die Ventile an die neuen Anforderungen, insbesondere den höheren Druck angepasst werden müssen. Auch beim Zugewinn der Ventile für Hafenkranen (W_{13}) werden Auswirkungen sowohl auf die Stückzahl als auch auf das Produkt erwartet.

5.1.1.3 Definition Rezeptor-Kennzahlen

Wie in Unterkapitel 5.1.1.1 beschrieben, wirken sich die Wandlungstreiber auf die im Reinraum montierten Ventile (350 Bar, 700 Bar sowie ggf. 1000 Bar) unterschiedlich aus. In der Montage wirkt sich der Unterschied im Wesentlichen durch spezielle Dokumentationspflichten für die Automotive-Ventile aus. Daher wird für den Rezeptor „Stückzahl“ in die Rezeptor-Kennzahlen „Stückzahl Automotive“ und „Stückzahl sonstige“ unterschieden. Für den Rezeptor „Zeit“ wird eine einheitliche Rezeptor-Kennzahl „Gesamtbearbeitungszeit“ festgelegt. Die Ventilkörper für die 350 Bar und die 700 Bar Ventile werden aus Aluminium gefertigt. Für die höheren Anforderungen der 1000 Bar Ventile werden Ventilkörper aus Edelstahl benötigt. Für den Rezeptor „Produkt“ wird die

Rezeptor-Kennzahl „Material“ definiert, welche die Werte *Aluminium* und *Edelstahl* annehmen kann. Für den Einsatz in Hafenkranen müssen die Ventile einen höheren Fließgrad erreichen, als die bisher angebotenen Produkte. Um diesen Fließgrad zu erreichen, muss der Ventilkörper dahingehend umkonstruiert werden, dass er breitere Kanäle erhält. Es resultiert ein Ventil mit größeren geometrischen Abmessungen. Für den Rezeptor „Produkt“ wird als zweite Rezeptor-Kennzahl die geforderte „Fließrate“ festgelegt. Die „Fließrate“ ließe sich als stetige Kennzahl definieren. Die Anforderungen beziehen sich allerdings auf diskrete Niveaus der Fließrate. Sie wird somit als diskrete Kennzahl mit den Werten *hoch* und *normal* definiert.

5.1.1.4 Quantitative Beziehung Wandlungstreiber und Rezeptor-Kennzahl

Die Auswirkungen der Wandlungstreiber wurden auf die einzelnen Rezeptor-Kennzahlen konkretisiert. Abbildung 5.4 zeigt die Gesamtheit der Abhängigkeiten im Szenariomodell des Anwendungspartners.

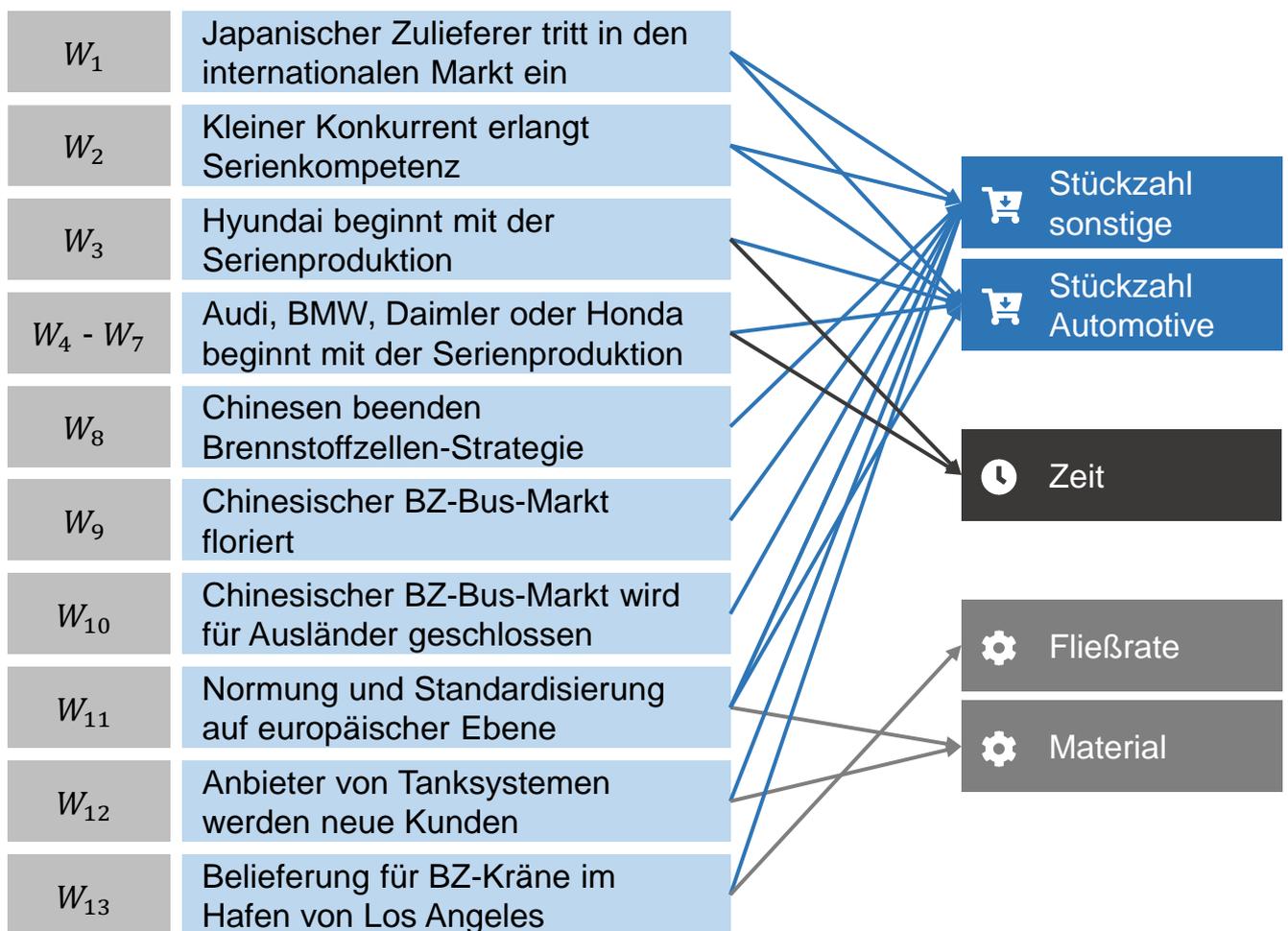


Abbildung 5.4: Verknüpfung Wandlungstreiber und Rezeptor-Kennzahlen

Die quantitativen Auswirkungen auf eine Rezeptor-Kennzahl bei Eintreten eines verknüpften Wandlungstreivers wurden durch die Experten des Anwendungspartners geschätzt. Wie in Unterkapitel 4.1.1.4 beschrieben, werden die Rezeptor-Kennzahlen in stetige und diskrete Kennzahlen unterschieden. Abbildung 5.5 zeigt die Einflüsse der

Rezeptor-Kennzahl	Wandlungstreiber	Einfluss [min ; max]		
		Absolut	Relativ	Steigung
 Stückzahl sonstige	W_1, W_2	[-]	[0,6 ; 0,8]	[-125]
	W_8	[-]	[0,2 ; 0,4]	[-250]
	W_9	[-]	[-]	[3000 ; 5000]
	W_{10}	[-]	[0,5 ; 0,5]	[-180]
	W_{11}	[-]	[-]	[500 ; 1000]
	W_{12}	[1000 ; 1000]	[-]	[500 ; 650]
	W_{13}	[-]	[4 ; 4]	[-]
 Stückzahl Automotive	W_1, W_2	[-]	[0,6 ; 0,8]	[-125]
	W_3	[-]	[-]	[5000 ; 5000]
	$W_4 - W_7$	[-]	[-]	[3000 ; 3000]
	W_{11}	[-]	[-]	[500 ; 1000]

Abbildung 5.5: Quantitative Auswirkungen der Wandlungstreiber auf die stetigen Rezeptor-Kennzahlen

Rezeptor-Kennzahl	Wandlungstreiber	Einflussvektor [Wert ; Eintrittswahrscheinlichkeit]	
 Zeit	$W_3 - W_7$	[8 Wochen ; 100 %]	[24 Wochen ; 0 %]
 Fließrate	W_{13}	[niedrig ; 0 %]	[hoch ; 100 %]
 Material	W_{11}, W_{12}	[Aluminium ; 0 %]	[Edelstahl ; 100 %]

Abbildung 5.6: Quantitative Auswirkungen der Wandlungstreiber auf die diskreten Rezeptor-Kennzahlen

Wandlungstreiber auf die stetigen Rezeptor-Kennzahlen. Die Einflüsse der Wandlungstreiber auf eine stetige Rezeptor-Kennzahl werden durch einen Absolut-, einen Relativ- und einen Steigungsteil abgebildet. Für die betreffenden Anteile wurden durch die Experten beim Anwendungspartner Minimal- und Maximalwerte geschätzt, welche in die Berechnung der aggregierten Szenarien eingehen. Die Auswirkungen auf die diskreten Rezeptor-Kennzahlen sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Für die diskreten Rezeptor-Kennzahlen legten die Experten einen Wahrscheinlichkeitsvektor fest, welcher die Einzelwahrscheinlichkeiten für den Eintritt in eine der diskreten Klassen bei Eintreten des Wandlungstreibers angibt. Für alle Auswirkungsbeziehungen im Anwendungsfall wählten die Experten den Grenzfall in dem der Eintritt eines Wandlungstreibers zu 100 Prozent zum Übergang in genau eine bestimmte Klasse führt.

5.1.2 Aggregierte Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen

Aus dem für den Anwendungsfall definierten Szenariomodell werden in diesem Schritt die aggregierten Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen berechnet. Zunächst wird die erwartete Entwicklung der Wandlungstreiber geschätzt. Im Anschluss werden die aggregierten Szenarien berechnet.

5.1.2.1 Zukunftsszenarien der Wandlungstreiber

Für jeden der Wandlungstreiber wurde eine Eintrittswahrscheinlichkeit p sowie frühestes, wahrscheinlichstes und spätestes Eintrittszeitpunkt durch die Experten geschätzt. Die Schätzungen sind in Abbildung 5.7 zusammengefasst. Basierend auf diesen Einschätzungen werden auch der Planungshorizont und die Periodendauer festgelegt. Die Experten sehen es als ausreichend an, den Planungshorizont quartalsweise zu betrachten, da die Entwicklungen der Wandlungstreiber nicht in kürzeren Zeitinkrementen prognostiziert werden können. Die Periodendauer Δt wird somit auf 0,25 Jahre festgelegt. Der späteste Eintrittszeitpunkt eines Wandlungstreibers wird auf das 4. Quartal im Jahr 2025 geschätzt. Um gegebenenfalls die Auswirkungen dieses Wandlungstreibers in der Skalierungsstrategie zu berücksichtigen, wird die Entwicklung bis Ende des Jahres 2026 betrachtet. Startpunkt der Planung und Planungsperiode 0 ist das 4. Quartal 2018. Somit wird der Planungshorizont T auf 8 Jahre festgelegt. Es resultieren 33 Planungsperioden bis zum Erreichen der letzten Planungsperiode t_{max} über die 8 Jahre des Planungshorizonts.

Wandlungstreiber		Eintrittszeitpunkt/-wahrscheinlichkeit			
		<i>p</i>	Früh	Wahrsch.	Spät
W_1	Japanischer Zulieferer tritt in den internationalen Markt ein	0,9	2021:Q1	2021:Q3	2022:Q1
W_2	Kleiner Konkurrent erlangt Serienkompetenz	0,5	2019:Q1	2020:Q1	2021:Q1
W_3	Hyundai beginnt mit der Serienproduktion	1	2020:Q1	2021:Q1	2022:Q1
W_{4-7}	Audi, BMW, Daimler oder Honda beginnt mit der Serienproduktion	1	2020:Q1	2021:Q1	2022:Q1
W_8	Chinesen beenden Brennstoffzellen-Strategie	0,4	2020:Q1	2020:Q3	2021:Q1
W_9	Chinesischer BZ-Bus-Markt floriert	0,8	2019:Q1	2020:Q1	2021:Q1
W_{10}	Chinesischer BZ-Bus-Markt wird für Ausländer geschlossen	0,5	2020:Q1	2022:Q2	2025:Q4
W_{11}	Normung und Standardisierung auf europäischer Ebene	0,3	2024:Q4	2025:Q3	2025:Q4
W_{12}	Anbieter von Tanksystemen werden neue Kunden	0,5	2019:Q1	2020:Q1	2021:Q1
W_{13}	Belieferung für BZ-Kräne im Hafen von Los Angeles	0,7	2019:Q1	2021:Q1	2023:Q1

Abbildung 5.7: Eintrittszeitpunkte und -wahrscheinlichkeiten der Wandlungstreiber

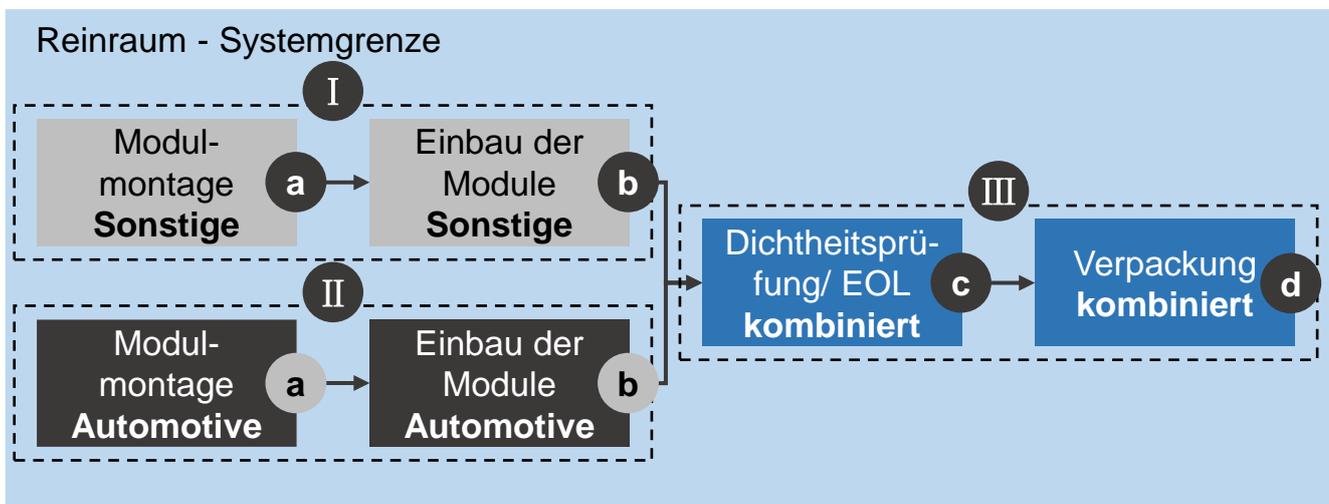


Abbildung 5.8: Aufteilung des Montagesystems in drei Subsysteme

5.1.2.2 Aggregierte Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen

Um den Dokumentationspflichten als Automobilzulieferer nachzukommen, muss der Anwendungspartner die Modulmontage und den Einbau der Module auf Anlagen durchführen die vom Rest der Montage getrennt sind. Aus diesem Grund wird die Montage im Reinraum in drei Subsysteme gemäß Abbildung 5.8 aufgeteilt. Das Subsystem I umfasst die Hauptschritte „Modulmontage“ (a) und „Einbau der Module“ (b) für die sonstigen 350 Bar Ventile. Subsystem II umfasst die „Modulmontage“ (a) und den „Einbau der Module“ (b) für die Automotive 700 Bar Ventile. Die kombinierte „Dichtheitsprüfung/EOL“ (c) und „Verpackung“ (d) aller Ventile ist in Subsystem III zusammengefasst.

Stückzahl kumuliert (* 100.000 Stück)

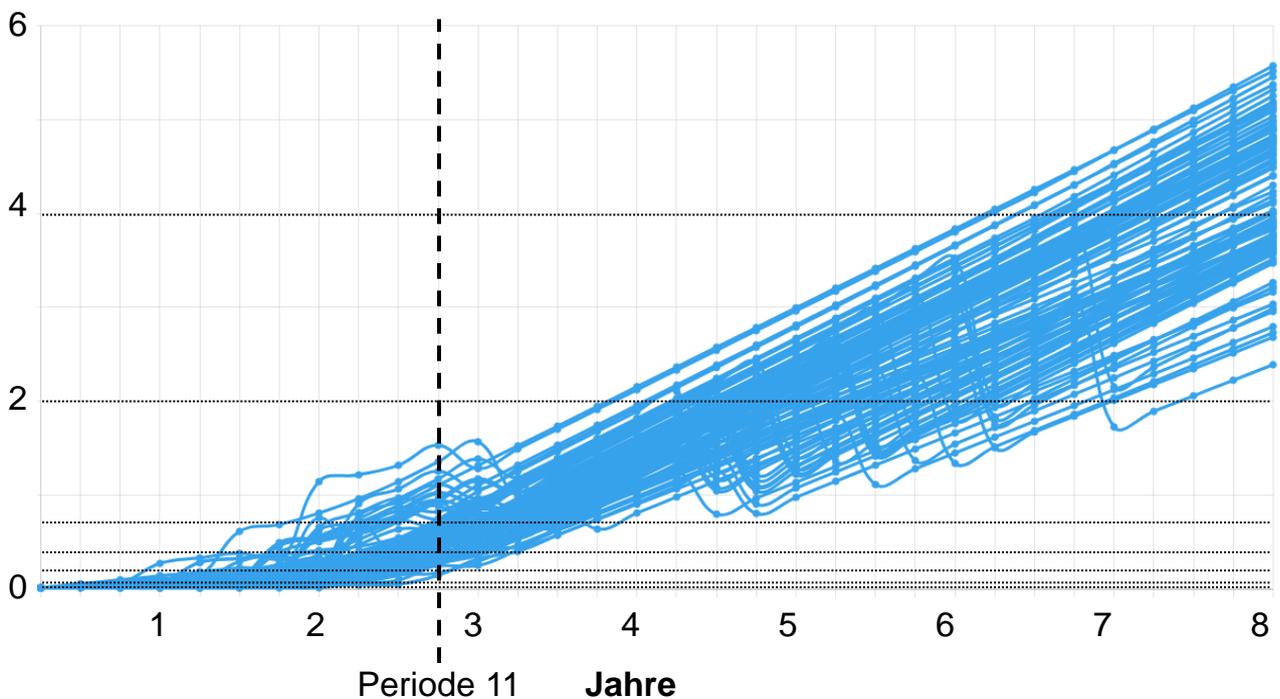


Abbildung 5.9: Ergebnis der Monte Carlo Simulation für die kumulierte Stückzahl aus allen Ventil-Varianten nach 100 Iterationen

Durch diese Aufteilung ist gewährleistet, dass innerhalb eines Subsystems jeder Systemabschnitt alle Ventilvarianten bearbeiten kann. Die Berechnung der aggregierten Szenarien findet in SkaliA statt. Für jedes der drei Subsysteme wird ein eigenes Montagesystem in SkaliA angelegt. Dabei werden zunächst die in Unterkapitel 5.1.2.1 eingeführten Werte Planungsperiodendauer und Planungshorizont eingegeben. Ebenso wird die Schichtdauer SD auf 7 Stunden und die Anzahl Jahresarbeitsstage Anz_{AT} auf

280 Tage für das Montagesystem festgelegt. Es werden anschließend die Wandlungstreiber angelegt und mit den in Unterkapitel 5.1.2.1 definierten Werten hinterlegt. Für die Rezeptor-Kennzahlen werden die in Unterkapitel 5.1.1.4 festgelegten Beziehungen zu den Wandlungstreibern verwendet. Dabei wird in jedem Subsystem nur eine Rezeptor-Kennzahl Stückzahl angelegt, welche die im entsprechenden System zu produzierende Stückzahl darstellt. Der Nutzer kann sich beispielhafte Iterationen der Monte Carlo-Simulation (MC-Simulation) in einem Graphen anzeigen lassen, um mögliche Entwicklungen einer Rezeptor-Kennzahl einschätzen zu können.

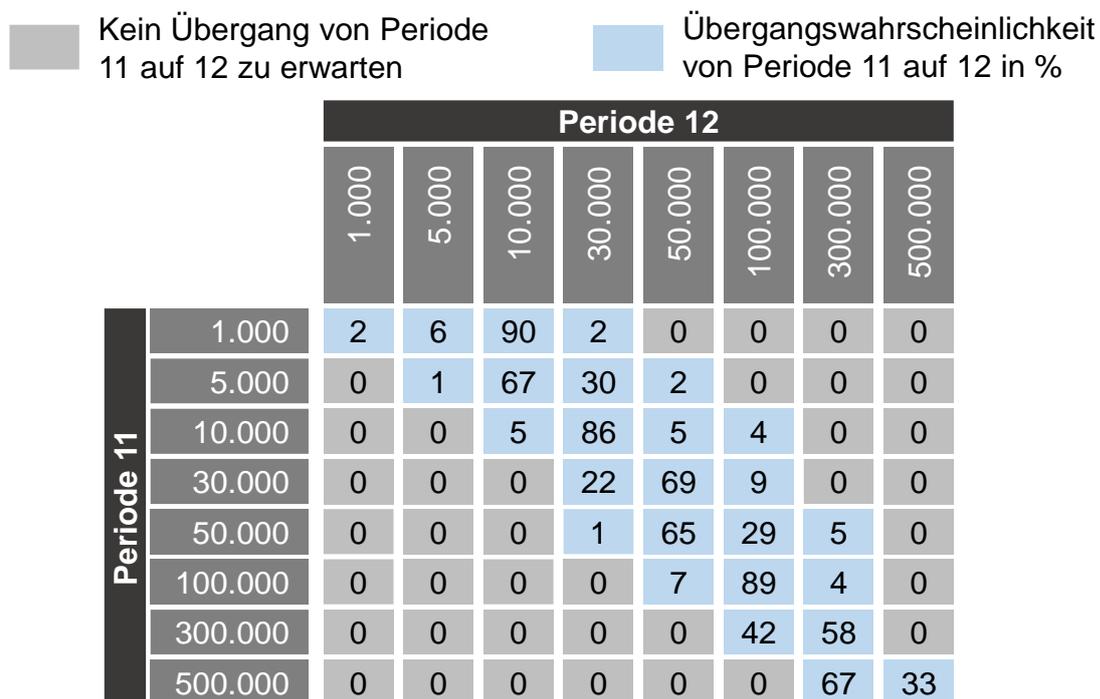


Abbildung 5.10: Auszug aus dem aggregierten Szenario der kumulierten Stückzahl

Abbildung 5.9 zeigt 100 Iterationen der MC-Simulation für die kumulierte Stückzahl aller Ventil-Varianten. Für die ersten zwei Jahre lässt sich ein verhaltener Anstieg ablesen. Ab dem dritten Jahr des Planungshorizonts verbreitert sich der Unsicherheitskorridor stark. Entscheidend ist diese Darstellung für die Auswahl der Klassen des aggregierten Szenarios der Stückzahl. Die Extremwerte bewegen sich zwischen 1.000 und 550.000 Stück im Jahr. Die äußeren Klassengrenzen sind somit definiert. Die Klassenmitten werden im unteren Stückzahlbereich enger gewählt, da dieser Stückzahlbereich insbesondere in den ersten Perioden gefordert ist. In späteren Planungsperioden wächst die Unsicherheit bezüglich der geforderten Stückzahl, sodass von der Wahl nah beieinan-

der liegender Klassenmitten keine Erhöhung der Prognosegüte erwartet wird. Die gewählten Klassengrenzen der kumulierten Stückzahl sind in Abbildung 5.9 durch parallel zur Zeitachse verlaufende, gepunktete Linien gekennzeichnet.

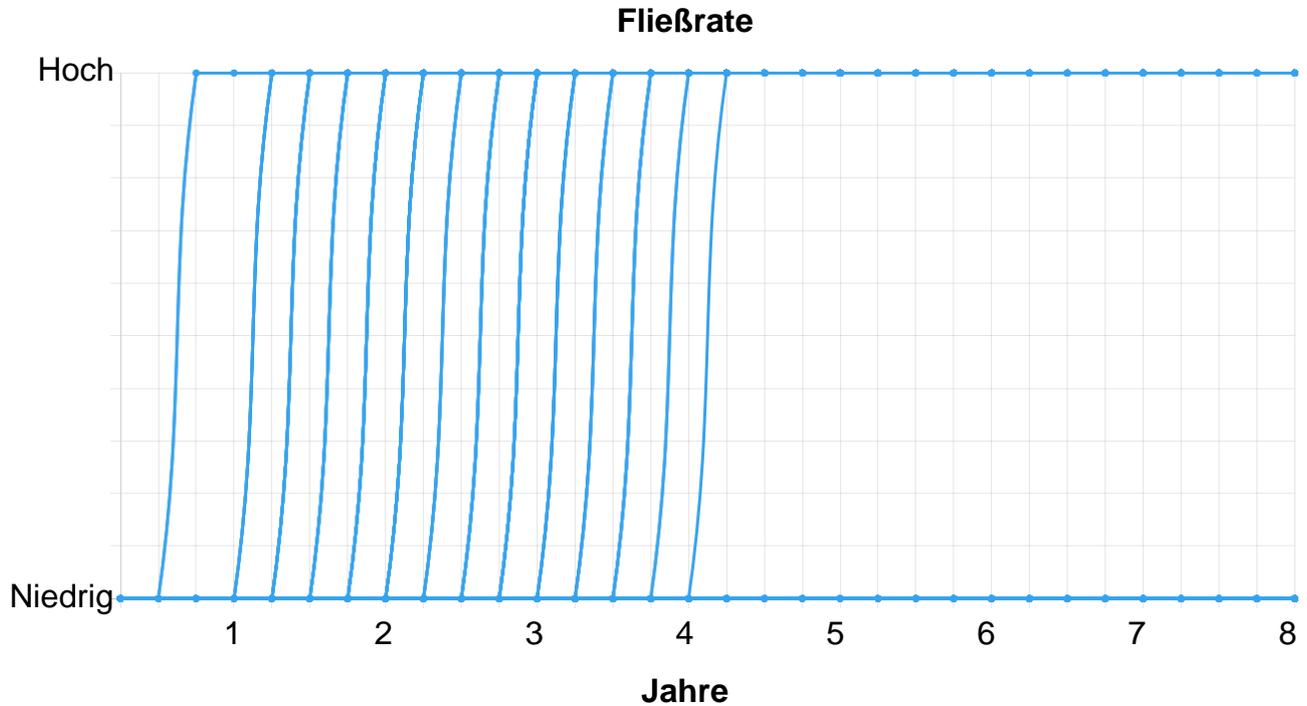


Abbildung 5.11: Ergebnis der Monte Carlo Simulation für die Fließrate nach 100 Iterationen

Für die Berechnung der Anzahl an Iterationen der MC-Simulation für die Berechnung des aggregierten Szenarios wird das Signifikanzniveau $\gamma = 99\%$ und die maximal zulässige Abweichung $E = 0,1\%$ definiert. Gemäß Formel 4-9 zur Berechnung der Anzahl an Iterationen werden 1.664.100 Iterationen der MC-Simulation durchgeführt. Das aggregierte Szenario wird nach Definition der Klassenmitten automatisiert in SkaliA berechnet. Das resultierende aggregierte Szenario ist zu umfangreich für eine übersichtliche, analoge Darstellung. Ein beispielhafter Auszug des aggregierten Szenarios der kumulierten Stückzahl für Periode 11 ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Dieser Abbildung sind auch die gewählten Klassenmitten zu entnehmen. Auf diese Werte werden die Stückzahlen, die innerhalb der in Abbildung 5.9 eingezeichneten Klassengrenzen liegen, gerundet. Die in Abbildung 5.10 dargestellten Werte geben jeweils die Wahrscheinlichkeit an, dass in Periode 12 die in der Spalte angegebene kumulierte Stückzahl nachgefragt wird. Die Wahrscheinlichkeiten gelten unter der Bedingung, dass zur Periode 11 die in der Zeile angegebene kumulierte Stückzahl nachgefragt wird. Die in

Abbildung 5.10 dargestellten Wahrscheinlichkeiten beziehen sich folglich auf die in Abbildung 5.9 durch die parallel zur Wert-Achse verlaufende gestrichelte Linie markierte Planungsperiode 11. In den dargestellten 100 Iterationen ist kein Verlauf enthalten, der in Periode 11 bereits die oberste Klasse erreicht. Im aggregierten Szenario, basierend auf 1.664.100 Iterationen der MC-Simulation lässt sich jedoch ablesen, dass diese hohen Stückzahlen bereits in Planungsperiode 11 erreicht werden könnten.

Kein Übergang beim Wechsel in die Folgeperiode zu erwarten
 Übergangswahrscheinlichkeit beim Wechsel in die Folgeperiode in %

	Periode 1		Periode 2		Periode 3		Periode 4		Periode 5		Periode 6	
	niedrig	hoch										
niedrig	100	0	99	1	97	3	96	4	95	5	94	6
hoch	0	0	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
	Periode 7		Periode 8		Per. 9		Per. 10		Per. 11		Per. 12	
	niedrig	hoch										
niedrig	93	7	90	10	87	13	87	13	88	12	88	12
hoch	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100
	Per. 13		Per. 14		Per. 15		Per. 16		P. 17-30			
	niedrig	hoch										
niedrig	89	11	90	10	93	7	96	4	100	0		
hoch	0	100	0	100	0	100	0	100	0	100		

Abbildung 5.12: Aggregiertes Szenario der Fließrate, basierend auf 1.664.100 Iterationen der MC-Simulation

Die Rezeptor-Kennzahl Fließrate ist als diskret definiert. Es wurden die 2 Klassen „niedrig“ und „hoch“ definiert. Abbildung 5.11 zeigt 100 Verläufe der MC-Simulation für die Rezeptor-Kennzahl Fließrate. Wie in Abbildung 5.4 erkennbar, hängt die Entwicklung der Rezeptor-Kennzahl ausschließlich vom Eintritt des Wandlungstreibers W_{13} ab. Bei Eintritt des Wandlungstreibers wechselt die durch die Rezeptor-Kennzahl Fließrate

ausgedrückte Anforderung auf „hoch“. Durch die niedrige Klassenanzahl lässt sich das resultierende aggregierte Szenario der Rezeptor-Kennzahl Fließrate übersichtlich in Abbildung 5.12 darstellen. In Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 ist ersichtlich, dass die „Fließrate“ nur zwischen Planungsperiode 1 und 16 von „niedrig“ auf „hoch“ wechseln kann. Ist die für die „Fließrate“ ein „hoch“ gefordert, wird diese Anforderung nicht mehr auf „niedrig“ zurückgehen. Wie in Abbildung 5.7 zu sehen, beträgt die Eintrittswahrscheinlichkeit des Wandlungstreibers w_{12} 70 %. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 30 % wird daher nie eine hohe Fließrate gefordert sein. Dieser Wahrscheinlichkeit ergibt sich auch aus dem Produkt der in Abbildung 5.12 dargestellten Wahrscheinlichkeiten für den Übergang von „niedrig“ zu „niedrig“ über alle Planungsperioden. Die Verläufe nach 100 Iterationen der MC-Simulation für die weiteren Rezeptor-Kennzahlen sind im Anhang in Abschnitt A1 abgebildet.

5.2 Schritt 2: Lösungsraum

Während Produktions-Begehungen beim Anwendungspartner wurde der Ist-Zustand der Ventilmontage im Reinraum aufgenommen. Darauf aufbauend wurde in Zusammenarbeit mit den Experten des Anwendungspartners der technische Lösungsraum der skalierbaren Montagelinie erstellt. Während der Analyse stellte sich heraus, dass die Montage im Reinraum nur einen sehr geringen Freiraum für eine Reduktion der Gesamtbearbeitungszeit der Ventile bietet. Die größten Einsparpotenziale bieten die Oberflächenbearbeitungsprozesse bei den externen Zulieferern sowie eine Verlagerung des Kundenentkopplungspunktes. Somit wird die Rezeptor-Kennzahl „Gesamtbearbeitungszeit“ in der weiteren Betrachtung nicht weiter berücksichtigt. Bei der Analyse der Auswirkungen der Rezeptor-Kennzahl „Material“ stellte sich heraus, dass der Wechsel des Materials des Ventilkörpers lediglich einen Einfluss auf die Zerspanungsbearbeitung hat, nicht aber auf die Montage im Reinraum. Daher wird die Rezeptor-Kennzahl „Material“ im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Für das Subsystem I gelten die aggregierten Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen „Stückzahl sonstige“ und „Fließrate“. Im Subsystem II gelten „Stückzahl Automotive“ und „Fließrate“. Die Rezeptor-Kennzahlen „Stückzahl kumuliert“ und „Fließrate“ gelten in Subsystem III.

5.2.1 Systemabschnittskonzepte

In diesem Unterkapitel wird die Entwicklung der Systemabschnittskonzepte beim Anwendungspartner beschrieben.

5.2.1.1 Erstellung Stationslandkarte

Während der Analyse des Ist-Prozesses wurde zunächst die Liste der durchzuführenden Montageaufgaben erstellt. Die vollständige Liste ist im Anhang abgebildet (Tabelle A.1). Für eine übersichtliche Darstellung in dieser Arbeit werden die Montageaufgaben zu Aufgabenblöcken gruppiert (siehe Abbildung 5.13). Die Zuordnung der Aufgabenblöcke zu den Montagestationen im Ist-Zustand lässt sich in der initialen Stationslandkarte (siehe Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15) ablesen. Dort sind die bestehenden Stationen dunkelblau markiert. Alle Montageprozesse im Ist-Zustand werden vollständig manuell durchgeführt. Die durch den Ist-Zustand vorgegebene Aufteilung der Montageaufgaben wird hinsichtlich Austaktung und Automatisierbarkeit untersucht. Abbildung 5.16 zeigt die Prozesszeiten der initialen Montagestationen. Die Nummerierung der initialen Montagestationen ist einheitlich in Abbildung 5.14 und Abbildung 5.16. Der End of Line (EOL) Test ist der Engpass und lässt sich nicht durch eine Aufteilung der Montageaufgaben auflösen. Bei einer Betrachtung der verbleibenden Stationen beträgt die Prozesszeit der Endmontage lediglich 20 % der Prozesszeit der Montage.

Index	Montageaufgabenblock	Hauptschritt		
1	Pressaufgaben in der Vormontage	Modulmontage (a)	Subsystem I	Subsystem II
2	Sonstige Fügeaufgaben in der Vormontage			
3	Schraubaufgaben in der Montage auf der Längsseite	Einbau der Module (b)		
4	Fügeaufgaben in der Montage auf der Längsseite			
5	Schraubaufgaben in der Montage auf der Stirnseite			
6	Fügeaufgaben in der Montage auf der Stirnseite			
7	Dichtheitsprüfung/ EOL	Dichtheitsprüfung (c)	Subsystem III	
8	Montage der Abdeckung des Magnetventils	Verpackung (d)		
9	Endmontage			
10	Verpackung			

Abbildung 5.13: Montageaufgabenblöcke im Anwendungsfall

👤 manuell
 ⚙️ automatisiert
 ■ Initiallösung
 ■ Keine Station vorhanden

Module	Transport	👤 ⚙️ 👤 👤 ⚙️ 👤 ⚙️ ⚙️								
	Prozess	👤 👤 ⚙️ 👤 ⚙️ ⚙️ 👤 ⚙️								
	Zuführung	👤 👤 👤 ⚙️ 👤 ⚙️ ⚙️ ⚙️								
Montageaufgaben	<ul style="list-style-type: none"> • Pressaufgaben in der Vormontage (1) • Sonstige Fügeaufgaben in der Vormontage (2) 	1								
	<ul style="list-style-type: none"> • Schraubaufgaben in der Montage auf der Längsseite (3) • Fügeaufgaben in der Montage auf der Längsseite (4) • Schraubaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (5) • Fügeaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (6) 	2								
	<ul style="list-style-type: none"> • Dichtheitsprüfung/ EOL (7) 	3								
	<ul style="list-style-type: none"> • Montage der Abdeckung des Magnetventils (8) 	4								
	<ul style="list-style-type: none"> • Endmontage (9) • Verpackung (10) 	5								
	<ul style="list-style-type: none"> • Pressaufgaben in der Vormontage (1) 									
	<ul style="list-style-type: none"> • Sonstige Fügeaufgaben in der Vormontage (2) 									
	<ul style="list-style-type: none"> • Schraubaufgaben in der Montage auf der Längsseite (3) • Fügeaufgaben in der Montage auf der Längsseite (4) 									
	<ul style="list-style-type: none"> • Schraubaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (5) • Fügeaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (6) 									
	<ul style="list-style-type: none"> • Schraubaufgaben in der Montage auf der Längsseite (3) • Schraubaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (5) 									

Abbildung 5.14: Initiale Stationslandkarte 1 von 2

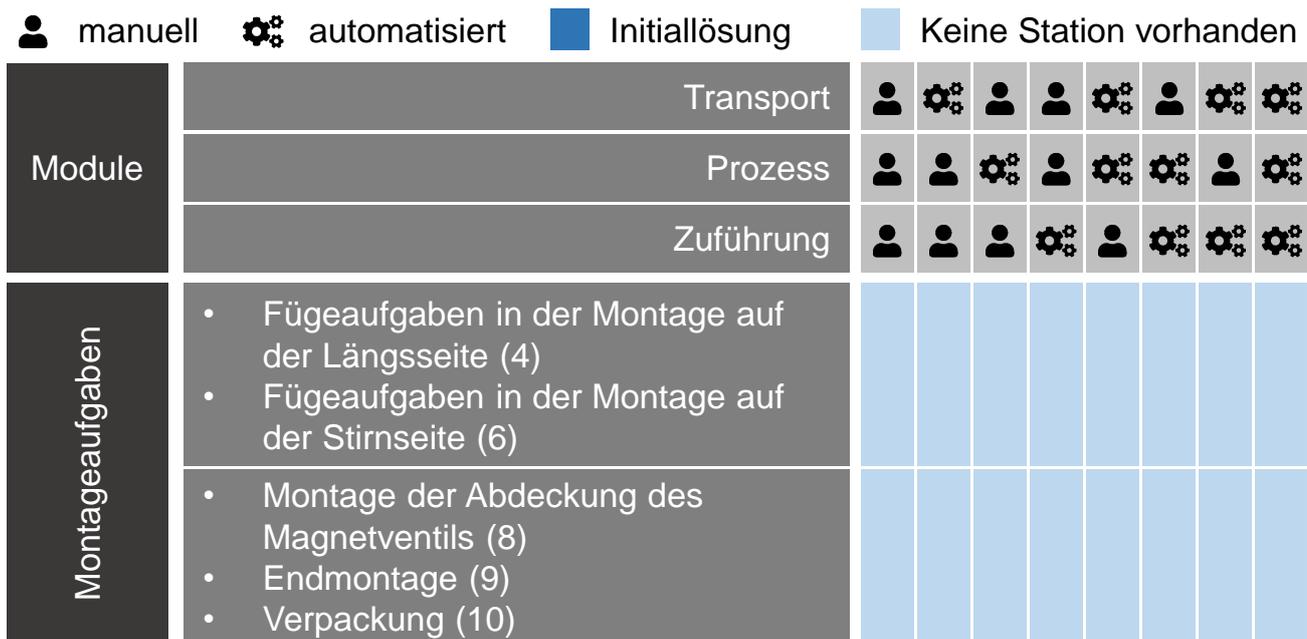


Abbildung 5.15: Initiale Stationslandkarte 2 von 2

1	2	3	4	5
Vormontage	Montage	EOL	Endmontage	Verpackung
8:00 min	15:00 min	30:00 min	3:00 min	10:00 min

Abbildung 5.16: Prozesszeiten der initialen Montagestationen

Die Zusammenlegung der Montageaufgaben von Endmontage und Verpackung wird in Bezug auf die Austaktung mit in die Stationslandkarte aufgenommen. Nach dem EOL-Test ist die Montage mit einer Prozesszeit von 15 Minuten der Engpass. Die Station wird daher in die Montageaufgaben auf der Längsseite und die Montageaufgaben an der Stirnseite des Ventilkörpers aufgeteilt. Die Station mit der kürzesten Prozesszeit nach dieser Umverteilung ist die Montage an der Stirnseite mit 7:10 Minuten. Diese Station benötigt somit 72 % der Prozesszeit der Verpackung. Die Pressaufgaben in der Vormontage sowie die Schraubaufgaben in der Montage wurden als potenziell automatisierbare Montageaufgaben identifiziert. Im Zuge der Umverteilung von Montageaufgaben hinsichtlich Automatisierbarkeit wurden daher die Schraubaufgaben und Pressaufgaben in eine jeweils eigene Zeile der Stationslandkarte ausgegliedert. Die abschließende Übersicht der Umverteilung der Montageaufgaben ist in Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15 zu sehen. Die Zeilen ohne dunkelblaue Markierung sind neue Aufteilungen der Montageaufgaben.

5.2.1.2 Analyse der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse

Die Analyse der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse wurde in Zusammenarbeit mit Experten des Anwendungspartners während einer Begehung der bestehenden Produktionsstätte erstellt. In der Gewichtung der Automatisierungsnutzen wurden die wirtschaftlichen Aspekte höher priorisiert als die Ergonomievorteile für den Werker. Die Automatisierungshemmnisse wurden einheitlich gewichtet. Es resultieren Gewichtungsfaktoren in Höhe von 0,283 für die Automatisierungsnutzen „Reduktion Zykluszeit“, „Einsparung Mitarbeiter“ und „Erhöhung Qualität“. Der Automatisierungsnutzen „Ergonomie“ wird mit 0,15 gewichtet. Die Automatisierungshemmnisse „Varianz“, „Handhabung der Einzelteile“, „Anpass- und Justiertätigkeiten“ und „Fertigungsgenauigkeit“ werden einheitlich mit Faktor 0,25 gewichtet. Zusätzlich lässt die Methode eine Gewichtung zwischen Nutzen und Hemmnissen zu. Somit kann eine Risikoaversion hinsichtlich der Automatisierungsfälle zum Ausdruck gebracht werden. Bei einer höheren Gewichtung der Automatisierungsnutzen werden Lösungen mit hohem Nutzen und hohem Hemmnis eher umgesetzt gegenüber Lösungen mit niedrigem Nutzen bei niedrigen Hemmnissen. Der Anwendungspartner ist in dieser Hinsicht neutral und gewichtet Automatisierungsnutzen und -hemmnisse jeweils mit 0,5.

Anhand der Kategorisierung für die einzelnen Automatisierungsnutzen und -hemmnisse (siehe Unterkapitel 4.2.1.4) wurde jedes Feld der Stationslandkarte bewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.17 zusammengefasst. In dieser Darstellung sind in der Spalte „Indizes“ die Indizes der Montageaufgaben (siehe Abbildung 5.13) auf die sich die Spalte bezieht, angegeben. Der Anwendungspartner gab eine Kapazität von vier Konzepten für die Planung automatisierter Stationskonzepte vor. Die Konzepte mit der höchsten Summe aus Automatisierungsnutzen und -hemmnis sind die Automatisierung des Prozessmoduls in den Zeilen „EOL-Test“, „Presstation Vormontage“ und „Schraubstation“ sowie die Vollautomatisierung des „EOL-Test“. Die Montageaufgaben dieser drei Zeilen beinhalten keine Zuführaufgaben, daher sind die Werte in Abbildung 5.17 für Felder mit automatisiertem und manuellem Zuführmodul dieser Zeilen identisch. Für die verbleibenden, aus der Stationsaufteilung entstandenen Zeilen wurde zusätzlich das Feld mit dem höchsten Wert für die Erstellung eines Konzeptes ausgewählt, damit der Skalierungsmechanismus „Umverteilung von Montageaufgaben“ in der Planung Berücksichtigung findet.

 manuell
  automatisiert
  Ausgewählt für Konzepterstellung

		Transport							
		Prozess							
		Zuführung							
Stationsbezeichnung	Indizes								
Vormontage	1, 2	0,00	-0,88	-0,44	-0,44	-0,57	-0,30	-0,44	-0,26
Modulmontage	3 - 6	0,00	-0,13	-0,29	-0,04	-0,29	-0,40	-0,04	-0,26
EOL Test	7	0,00	-0,11	0,85	0,00	0,74	0,85	-0,11	0,74
Endmontage	8, 9	0,00	-0,13	-0,23	-0,09	-0,23	-0,47	-0,23	-0,18
Verpackung	10	0,00	-0,13	-1,08	-0,86	-1,08	-0,93	-0,86	-0,93
Pressstation Vormontage	1	0,00	-0,11	0,60	0,00	0,35	0,60	-0,11	0,35
Fügestation Vormontage	2	0,00	-0,23	-0,34	-1,16	-0,47	-0,56	-1,03	-0,28
Modulmontage Längsseite	3, 4	0,00	-0,13	-0,04	-0,04	-0,04	-0,40	-0,04	-0,26
Modulmontage Stirnseite	5, 6	0,00	-0,13	-0,04	-0,04	-0,04	-0,40	-0,04	-0,26
Schraubstation	3, 5	0,00	-0,14	0,62	0,00	0,51	0,62	-0,14	0,51
Fügestation Montage	4, 6	0,00	-0,13	-0,63	-0,75	-0,63	-0,88	-0,47	-0,45
Erweiterte Endmontage	8 - 10	0,00	-0,13	-1,08	-0,86	-1,08	-0,93	-0,86	-0,93

Abbildung 5.17: Ergebnisse der Analyse der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse

Der EOL-Test bietet ein hohes Potenzial bei der Automatisierung des Prozessmoduls. Die Dichtheitsprüfung im Status Quo wird vollständig manuell durchgeführt, indem das Ventil in einer Prüfkammer mit Druck beaufschlagt wird. Ein Werker überprüft kritische Punkte des Ventils mit einer Messsonde auf austretendes Prüfgas. Einer Automatisierung dieses Prozesses wird ein hohes Potenzial zugesprochen, bei geringen Hemmnissen. Die Handhabung des Ventils im Transportmodul wird ebenfalls als gut durchführbar eingestuft. Durch die Isolierung der Pressvorgänge in der Vormontage in einer eigenen Station sinken die Hemmnisse für die Automatisierung des Prozessmoduls gegenüber der kombinierten Station. Es müssen lediglich Pressvorgänge für verschiedene Anbauteile durchgeführt werden. Die Automatisierung bietet hohes Potenzial bei der Einsparung manueller Arbeitskräfte. Analog zur Pressstation führt auch die Isolierung der Schraubvorgänge in der Montage zu einer Einsparung von Werkern bei geringen Hemmnissen und erlaubt eine effiziente Automatisierung dieses Prozessmoduls.

Die verbleibenden Zeilen der Stationslandkarte beinhalten komplexe Montageaufgaben, wie das Schmieren von Gewindebauteilen, Handling von O-Ringen oder Einsetzen von Federn. Die Hemmnisse überwiegen den Nutzen bei diesen Montageaufgaben. Daher werden für diese Zeilen der Stationslandkarte manuelle Stationskonzepte erstellt.

5.2.1.3 Erstellung Montagestationskonzepte

Über alle drei Subsysteme des Anwendungspartners hinweg muss für jedes in Abbildung 5.17 markierte Feld mindestens ein Montagestationskonzept erstellt werden. In Summe müssen also mindestens 9 Montagestationskonzepte erstellt werden. Die Konzepte sind in Steckbriefen dokumentiert. Für die bereits bestehenden Montagestationen werden ebenso eigene Steckbriefe erstellt. Somit liegen insgesamt 16 Steckbriefe vor. Die 16 Steckbriefe sind im Anhang unter Abschnitt A3 abgebildet. Im Folgenden wird die Erstellung des Montagestationskonzeptes für die Montageaufgabenblöcke 3 „Schraubaufgaben auf der Längsseite“ und 5 „Schraubaufgaben auf der Stirnseite“ mit manuellem Transport- und automatisiertem Prozessmodul beschrieben. Die Zuführung der Anbauteile in den Ventilkörper findet in der vorgelagerten Station statt. Die Montageaufgabenblöcke, welche das Montagestationskonzept erfüllen muss, beinhalten 8 Montageaufgaben. Abbildung 5.18 zeigt eine Explosionszeichnung einer beispielhaften Ausprägung des 350 Bar Ventils. Die Montageaufgaben beinhalten ausschließlich Verschraubungsaufgaben der vormontierten Baugruppen an den 2 Längsseiten und den 3 Stirnseiten des Ventilkörpers.

Erster Schritt in der Erstellung des Montagestationskonzeptes ist die Wahl eines Manipulators für die Durchführung der automatisierten Aufgaben des Prozessmoduls. Zu diesem Zweck werden die Anforderungen an die Verschraubungen aufgenommen. Die 8 Verschraubungen müssen auf 5 unterschiedlichen Ebenen durchgeführt werden. Der Ventilkörper und der Manipulator müssen ihre Orientierung zueinander flexibel ändern können. Eine weitere Herausforderung sind die 6 unterschiedlichen Schraubköpfe der Anbauteile. Es sind folglich 6 Werkzeugwechsel für die Verschraubung eines Ventils erforderlich. Zusätzlich werden je nach Verschraubung unterschiedliche Anforderungen an das Anzugsdrehmoment der Verschraubung gestellt. Die drei Anforderungen Umorientierung, Werkzeugwechsel sowie Drehmomentregelung und -überwachung müssen folglich durch den Manipulator erfüllt werden.

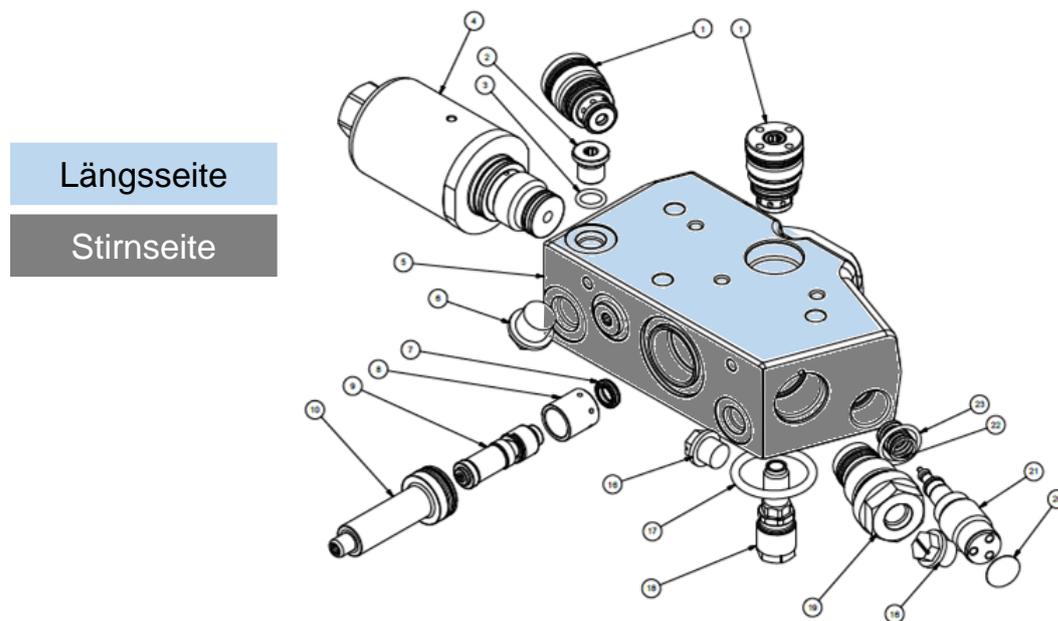


Abbildung 5.18: Explosionszeichnung des Ventils

Aus der Anforderung der Umorientierung und der Geometrie des Ventilkörpers ergibt sich der Bedarf einer 5-Achs-Kinematik für die Zustellung des Schraubers zum Verschraubungsort. Die geforderten Freiheitsgrade ließen sich durch Anbringung der Kinematik am Schrauber, am Ventilkörper oder einer Kombination aus beidem realisieren. Die Möglichkeit der Aufteilung der Kinematik wurde aus Kostengründen verworfen. Eine Anbringung der Kinematik an der Werkstückhalterung resultiert in einer Sondermaschine und wurde aufgrund der geringen Wandlungsfähigkeit verworfen. Als Manipulator für die Ausführung der Verschraubungsaufgaben wurde ein Leichtbauroboter ausgewählt. Viele Leichtbauroboter beinhalten eine 5-Achs-Kinematik und werden als Standardprodukt angeboten, welches für vielfältige Applikationen genutzt werden kann. Diese Lösung bietet daher eine hohe Wandlungsfähigkeit. Um die Anforderung an Drehmomentüberwachung und -dokumentation zu erfüllen, wird eine Schraubspindel mit integrierter Drehmomentüberwachung am Roboter montiert. Für den Bitwechsel wird ein Schnellwechselsystem an der Schraubaufnahme verwendet und ein Magazin mit den benötigten Bits in die Station integriert. Für die Aufnahme des Ventilkörpers wird die in der ursprünglichen Station vorhandene Werkstückaufnahme verwendet. Diese ermöglicht das manuelle Schwenken des Ventilkörpers um 180 Grad, was eine verbesserte Erreichbarkeit der Verschraubungsorte gewährleistet. Basierend auf dieser

Lösung werden die benötigten Handhabungsoperationen abgeleitet und auf die Manipulatoren Werker und Roboter verteilt. Abbildung 5.19 zeigt die getroffene Verteilung.

Werker	Roboter
Einspannen des Ventilkörpers	Einschrauben des manuellen Ventils
Schwenken des Ventilkörpers	Einschrauben des Belüftungsventils
Entnahme des Ventilkörpers	Wechsel Schraubwerkzeug
	Einschrauben des Magnetventils
	Einschrauben des Einlassstutzens
	Wechsel Schraubwerkzeug
	Einschrauben des thermischen Sicherheitsventils
	Wechsel Schraubwerkzeug
	Einschrauben des Stöpsels
	Wechsel Schraubwerkzeug
	Einschrauben des Tankventils
	Wechsel Schraubwerkzeug
	Einschrauben des Druckregulators
	Wechsel Schraubwerkzeug

Abbildung 5.19: Verteilung der Handhabungsoperationen

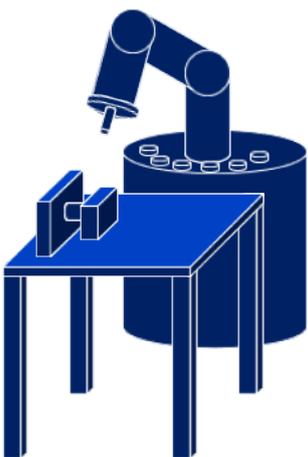
Name	Teilautomatisiertes Schrauben	
 Montageaufgabenblöcke	- Schrauben Längsseite - Schrauben Stirnseite	
 Automatisierungsgrad	<i>man; aut; man</i>	
 Bearbeitungszeit Taktzeit	07:15 07:15	
 Jährliche Fixkosten	8.950 €	
 Wandlungspotenzialwert	0,7	
 Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung 5.20: Steckbrief des Montagestationskonzeptes "Teilautomatisierte Schraubstation" (siehe auch Abbildung A.14)

Basierend auf dem beschriebenen Lösungsansatz wurde eine grobe Funktionskizze des Montagestationskonzepts erstellt. Für die benötigten Komponenten wurde eine Stückliste abgeleitet. Die Stückliste wurde basierend auf Erfahrungswerten beim Projektpartner und einer Recherche bei Anbietern von Automatisierungstechnik mit Kosten hinterlegt. Die aggregierten Ergebnisse des Montagestationskonzeptes sind in Abbildung 5.20 abgebildet. Für die Berechnung der jährlichen Fixkosten wurden die Abschreibungen auf die Station bei einer Abschreibung über 8 Jahre zugrunde gelegt. Bearbeitungszeit und Taktzeit wurden durch die Bestimmung der Dauern der einzelnen Handhabungsoperationen angenähert. Zu diesem Zweck wurden Verfahrenwege angenommen und Verfahrensgeschwindigkeiten aus Datenblättern eines Roboterherstellers, eine MTM-Tabelle sowie Erfahrungswerte aus der bestehenden Montagelinie genutzt.

5.2.1.4 Bildung von Systemabschnittskonzepten

Mit einem manuellen Arbeitsanteil von 15 Sekunden, also ca. 3 % der Bearbeitungszeit des Montagestationskonzeptes "Teilautomatisierte Schraubstation", ist es beinahe vollautomatisiert. Falls der Werker die verbleibenden 7 Minuten des Taktes nicht nutzen kann, wird dieses Potenzial jedoch nicht ausgeschöpft. Daher wird mit der benachbarten Station „manuelle Fügestation Montage“ ein Systemabschnitt gebildet. Im neuen

Name		<i>Teilautomatisierte Montage</i>	
	▪ Montageaufgaben	<ul style="list-style-type: none"> - Schraubaufgaben in der Montage auf der Längsseite (3) - Fügeaufgaben in der Montage auf der Längsseite (4) - Schraubaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (5) - Fügeaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (6) 	
	▪ Automatisierungsgrad	20 %	
	▪ Bearbeitungszeit	15:40	
	▪ Taktzeit	8:25	
	▪ Wartezeit	3 Monate	
	▪ Aufbaukosten	32.900 €	
	▪ Abbaukosten	1.500 €	
	▪ Jährliche Fixkosten	89.780 €	
	▪ Restriktionen	keine	

Abbildung 5.21: Steckbrief des Systemabschnitts „Teilautomatisierte Montage“ (siehe auch Abbildung A.33)

Tabelle 5.1: Montageaufgaben des Systemabschnitts „Teilautomatisierte Montage“
(siehe auch Tabelle A.11)

Werker			Roboter		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)	Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
6	Dichtungsring für das thermische Sicherheitsventil in den Ventilkörper einpressen	01:21	5	Einschrauben des thermischen Sicherheitsventils	00:33
6	Einfetten des thermischen Sicherheitsventils	00:34	5	Einschrauben des Belüftungsventils	00:33
6	Einlegen der Feder in die Öffnung des thermischen Sicherheitsventils	00:42	5	Einschrauben des Druckregulators	01:01
6	Einfetten des Belüftungsventils	00:34	5	Einschrauben des Tankventils	00:50
6	Einfetten des Druckregulators	00:34	3	Einschrauben des manuellen Ventils	00:33
6	Einfetten des Tankventils	00:34	3	Einschrauben des Stöpsels	00:33
4	Anbringen des Barcodes für internes Tracking	00:08	3	Einschrauben des Einlassstutzens	00:33
4	Einfetten des manuellen Ventils	00:24	3	Einschrauben des Magnetventils	01:19
4	Einfetten des Stöpsels	00:24	3	Einschrauben des Temperatursensors	01:05
4	Einfetten des Einlassstutzens	00:24		Summe	07:00
4	Dichtungsring für Montage des Magnetventils einlegen	00:12			
4	Einfetten des Magnetventils	00:24			
4	Einstecken des Kabels vom Temperatursensor	01:07			
4	Unterlegscheiben für die Befestigung des Temperatursensors auf das Kabel fädeln	00:48			
3, 5	Einsetzen der Module	00:15			
	Summe	08:25			

Systemabschnitt erledigt derselbe Werker die manuellen Aufgaben beider Stationen und ist somit voll ausgelastet. Die Bearbeitungszeit des Montagestationskonzeptes „Manuelle Fügestation Montage“ beträgt 8:10 Minuten. Die Station ist rein manuell. Daher steht die Station still, während die manuellen Tätigkeiten an der benachbarten Station durchgeführt werden. Es resultieren die in Abbildung 5.21 dargestellten 8:25 Minuten Taktzeit und 15:40 Minuten Bearbeitungszeit. Die Aufteilung der Montageaufgaben

zwischen Werker und Roboter im Systemabschnitt ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Der Systemabschnitt besteht aus vier manuellen und einem automatisierten Modul. Es ergibt sich ein Automatisierungsgrad von 20 %. Aus der Lieferzeit für den Roboter resultiert die Wartezeit des Systemabschnitts mit 3 Monaten. Die Aufbaukosten des Systemabschnitts ergeben sich aus den erwarteten Technikerkosten für den Aufbau und die Inbetriebnahme der physischen Anlage zuzüglich der Engineeringkosten. Die Engineeringkosten wurden anhand des in Abbildung 4.29 dargestellten Berechnungsschemas geschätzt. Die jährlichen Fixkosten resultieren aus der Abschreibung auf die Betriebsmittel des Systemabschnitts bei einer Abschreibungsdauer von 8 Jahren. Es wird angenommen, dass die Werkstückaufnahmen entsprechend konstruiert werden können, dass sowohl die Ventilgehäuse mit der aktuellen Fließrate, als auch Ventilgehäuse mit der für die Nutzung in Hafenkränen erhöhten Fließrate eingespannt werden können. Aus dem Systemabschnitt resultieren folglich keine Restriktionen. Analog zu diesem Vorgehen, werden weitere Montagestationskonzepte in denen der Werker nicht den gesamten Takt in der Station gebunden ist, zu Systemabschnittskonzepten zusammengefasst. Die Zuordnung von Montagestationskonzepten zu den Systemabschnittskonzepten ist in Abschnitt A4 dargestellt. In dieser Visualisierung ist für jedes Konzept die Zeit angegeben, die der Werker während des Taktes an der Station gebunden ist, im Verhältnis zur Prozesszeit der Montagestation, bzw. des Systemabschnitts. Es entstehen 16 Systemabschnitte, deren Steckbriefe in Abschnitt A5 abgebildet sind.

Nachdem die Systemabschnitte definiert wurden, werden im nächsten Schritt die Wandlungsmatrizen erstellt. In einer Wandlungsmatrix werden für die zulässigen Wandlungen zwischen Systemabschnitten die Wandlungskosten und Wandlungsdauern definiert. Innerhalb einer Wandlungsmatrix existieren folglich nur Systemabschnitte mit denselben Montageaufgaben. Im Anwendungsfall müssen somit insgesamt 3 Wandlungsmatrizen befüllt werden. Die Wandlungsmatrix für die Montageaufgaben 3 bis 6 inklusive des in Abbildung 5.21 abgebildeten Systemabschnitts ist in Abbildung 5.22 dargestellt. Die weiteren Wandlungsmatrizen sind in Abschnitt A6 abgebildet. Die Wandlungskosten zwischen den Systemabschnitten unterscheiden sich erheblich voneinander. Insbesondere unterscheiden sie sich auch von der Summe aus Abbaukosten des alten Systemabschnitts und Aufbaukosten des neuen Systemabschnitts. Für die Wandlung von der integrierten Montagestation auf die geteilten manuellen Montagestationen entstehen lediglich 500 € Aufbaukosten der zweiten Station, da die ursprüngliche Station weiter genutzt werden kann. Bei der Wandlung von den in Schraubaufgaben

und Fügeaufgaben geteilten manuellen Stationen hin zur Teilautomatisierung der Schraubstation entstehen 4 Kostenblöcke. Dies sind das Engineering der automatisierten Schraubstation, der Aufbau der neuen Station, der Abbau der alten Station sowie die Abschreibung auf die entfernte Station.

Wandlungskosten [€]		👤 manuell							
Wandlungsdauer [Monate]		⚙️ automatisiert	⊘ nicht vorhanden						
Zuführung						1	2	3	4
Prozess									
Transport									
1	• Schraubaufgaben Längsseite	👤👤👤		500	500	32.400			
	• Fügeaufgaben Längsseite			0	0	3			
	• Schraubaufgaben Stirnseite								
	• Fügeaufgaben Stirnseite								
2	• Schraubaufgaben Längsseite	👤👤👤	1.409		2.000	35.309			
	• Fügeaufgaben Längsseite		0		0	3			
	• Schraubaufgaben Stirnseite	👤👤👤							
	• Fügeaufgaben Stirnseite	👤👤👤							
3	• Schraubaufgaben Längsseite	👤👤⊘	1.409	2.000		34.718			
	• Schraubaufgaben Stirnseite		0	0		3			
	• Fügeaufgaben Längsseite	👤👤👤							
	• Fügeaufgaben Stirnseite	👤👤👤							
4	• Schraubaufgaben Längsseite	👤⚙️⊘	12.240	13.240	12.740				
	• Schraubaufgaben Stirnseite		0	0	1				
	• Fügeaufgaben Längsseite	👤👤👤							
	• Fügeaufgaben Stirnseite	👤👤👤							

Abbildung 5.22: Wandlungsmatrix für die Montageaufgaben 3 – 6 (siehe auch Abbildung A.41)

5.2.2 Montagesystemkonfigurationen

Mit der Erstellung der Steckbriefe der Systemabschnitte sind die manuellen Planungsaufgaben im Schritt 2 der Gesamtmethodik abgeschlossen. Die Erstellung von Montagesystemkonfigurationen wird automatisiert in SkaliA berechnet, gemäß dem in Unterkapitel 4.2.2 vorgestellten Algorithmus. Nach Anwendung aller Skalierungsmechanismen, stehen für die Vormontage der „Automotive Ventile“ und der „sonstigen Ventile“ jeweils 96 Montagesystemkonfigurationen zur Auswahl. Aufgrund der höheren Anzahl Systemabschnittskonzepte in der gemeinsamen Montage und Dichtheitsprüfung ent-

steht in diesem Subsystem eine höhere Komplexität. Nach Anwendung aller Skalierungsmechanismen stehen in diesem Bereich 243 Montagesystemkonfigurationen zur Auswahl.

5.3 Schritt 3: Skalierungsstrategie

Für die Berechnung der Skalierungsstrategie sind keine manuellen Planungsaufgaben erforderlich. Nach Abschluss der ersten zwei Planungsschritte liegen alle notwendigen Daten für die Berechnung in SkaliA vor. Für jedes der drei Subsysteme wurde die optimale Skalierungsstrategie berechnet, welche für jeden Zustand im Markovschen Entscheidungsproblem (MDP) die kostenminimale Wandlungsentscheidung vorgibt. In SkaliA kann jeder Zustand des MDP in die in Abbildung 5.23 abgebildete Oberfläche eingegeben werden. Gemäß der berechneten Skalierungsstrategie gibt SkaliA die Skalierungsentscheidung in der in Abbildung 5.24 abgebildeten Darstellung aus.

Auswahl deterministischer Zustand und Planungsperiode

The screenshot displays the SkaliA user interface for configuring a state and planning period. It is divided into two main sections:

- Top Section:** Features a 'Period' slider set to the value 3. Below the slider are two green buttons: 'Set current System Config' and 'Set target System Config'. To the right of these buttons, the current and target system configurations are displayed as SysConf[[[1, 2]]|2|4|2|4|2|4|2].
- Bottom Section:** Contains three input fields with dropdown arrows: 'Waiting Time' (set to 0), 'workerCostPerHour' (set to 40), and 'yearlyProductionVolume' (set to 1000). A green button labeled 'Get Strategy Decision' is located at the bottom left of this section.

A blue line points from the text 'Auswahl stochastischer Zustand' to the input fields in the bottom section.

Abbildung 5.23: Auswahl eines Zustands der Skalierungsstrategie in SkaliA

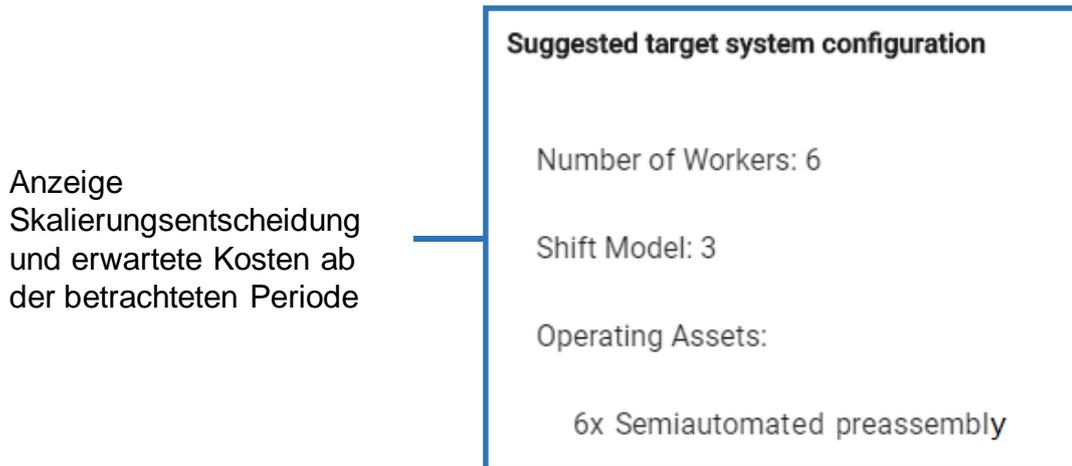


Abbildung 5.24: Anzeige der Skalierungsentscheidung für einen gewählten Zustand der Skalierungsstrategie in SkaliA

Gemäß der aggregierten Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen sind verschiedene Verläufe möglich. Die Skalierungsstrategie enthält kostenminimale Aktionen für alle Zustände dieser Verläufe. Aus einer Realisierung aus Verläufen der Rezeptor-Kennzahlen und den dazugehörigen Aktionen entsteht ein Skalierungspfad. Welcher Skalierungspfad in der Realität tatsächlich eintreten wird, ist zum Zeitpunkt der Planung unbekannt. Allein im Subsystem III wurden für die 243 Montagesystemkonfigurationen, 32 Planungsperioden und 266 möglichen Kombinationen der Klassen der Rezeptor-Kennzahlen 2.003.778 Aktionen in der Skalierungsstrategie berechnet. Daraus ergeben sich $2,4 \cdot 10^{76}$ theoretisch mögliche Skalierungspfade. Im Folgenden wird die Skalierungsstrategie daher anhand eines beispielhaften Skalierungspfads erläutert.

5.3.1 Beschreibung eines exemplarischen Skalierungspfads

In Abbildung 5.25 und Abbildung 5.26 wird der zugrundeliegende Verlauf der Rezeptor-Kennzahlen für den Skalierungspfad in Rot dargestellt. Betrachtet werden in diesem Beispiel nur die ersten 8 Planungsperioden. Abbildung 5.27, Abbildung 5.28 und Abbildung 5.29 zeigen den Skalierungspfad basierend auf den Verläufen der Rezeptor-Kennzahlen aus Abbildung 5.25 und Abbildung 5.26. Die Abbildungen umfassen die ersten 8 Planungsperioden, also die ersten 2 Jahre des Planungshorizonts. Die Nummer der Planungsperiode ist in der ersten Zeile angegeben. Die Zeilen 2 und 3 geben die jeweilige Klasse der Rezeptor-Kennzahlen „Stückzahl“ und „Fließrate“ in der entsprechenden Planungsperiode an. Hierbei handelt es sich lediglich um eine mögliche Entwicklung der Rezeptor-Kennzahlen, die gemäß der aggregierten Szenarien potenziell eintreten könnte. Die weiteren Zeilen geben die Anzahl der Systemabschnitte an,

welche als Teil einer Montagesystemkonfiguration während der angegebenen Planungsperiode genutzt werden. Die letzten 3 Zeilen geben die Schichtzahl, die Anzahl Werker und die Taktzeit der Montagesystemkonfiguration an.

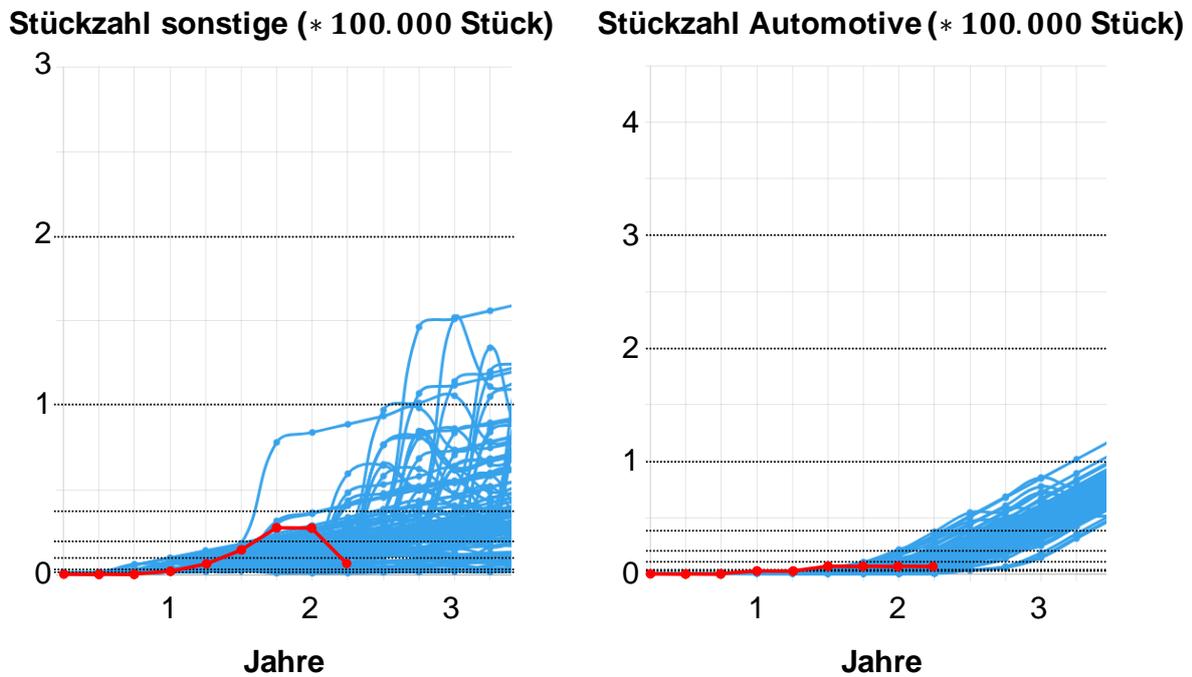


Abbildung 5.25: Beispielhafter Verlauf der Rezeptor-Kennzahlen in Subsystem I und II

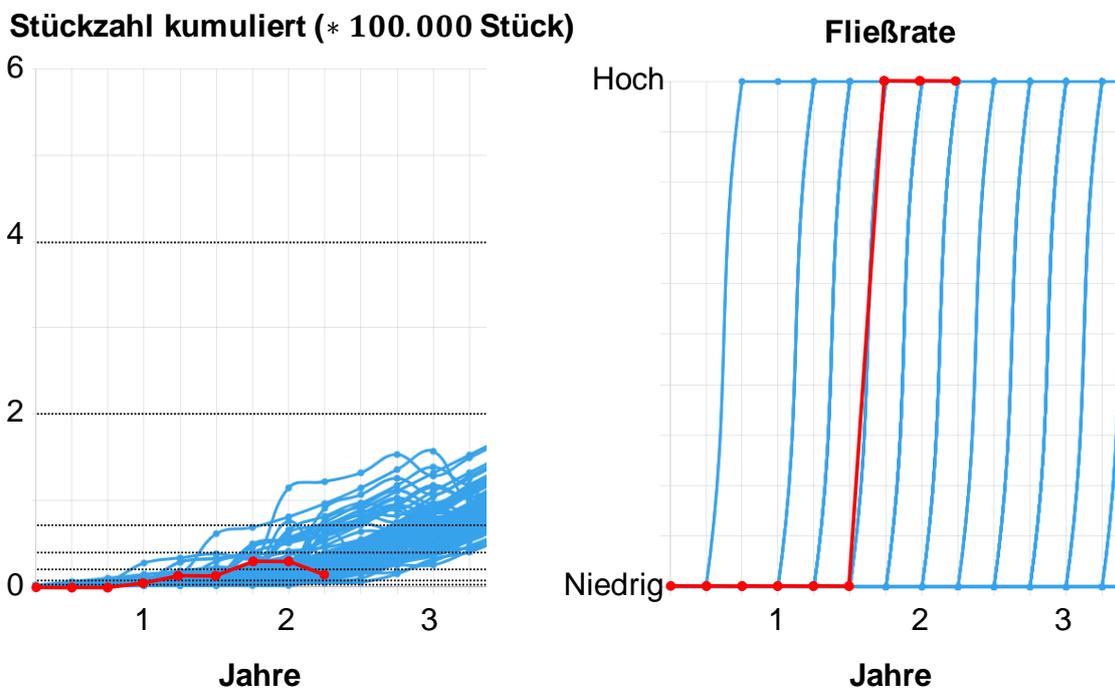


Abbildung 5.26: Beispielhafter Verlauf der Rezeptor-Kennzahlen in Subsystem III

Planungsperiode		1-2	3	4	5	6	7	8
Stückzahl		500	2.500	5.000	15.000	25.000	25.000	5.000
System- abschnitte	Manuelle Vormontage	1	1	1	4	0	0	0
	Man. Presse Vormont.	0	0	0	0	0	0	0
	Man. Fügen Vormontage	0	0	0	0	0	0	0
	Teilautomat. Vormontage	0	0	0	0	4	5	5
Schichtmodell		1	2	2	2	2	2	2
Anzahl Werker		1	1	1	4	4	5	5
Taktzeit (mm:ss)		08:00	08:00	08:00	02:00	01:35	01:16	01:16

Abbildung 5.27: Beispielhafter Skalierungspfad im Subsystem I (Sonstige), gemäß des beispielhaften Verlaufs der Rezeptor-Kennzahlen in Abbildung 5.25

Planungsperiode		1-2	3	4	5-6	7	8
Stückzahl		500	2.500	2.500	5.000	5.000	5.000
System- abschnitte	Manuelle Vormontage	1	1	4	4	0	0
	Man. Presse Vormont.	0	0	0	0	0	0
	Man. Fügen Vormontage	0	0	0	0	0	0
	Teilautomat. Vormontage	0	0	0	0	2	4
Schichtmodell		1	1	1	1	2	2
Anzahl Werker		1	1	4	4	2	4
Taktzeit (mm:ss)		08:00	08:00	02:00	02:00	03:09	01:35

Abbildung 5.28: Beispielhafter Skalierungspfad im Subsystem II (Automotive), gemäß des beispielhaften Verlaufs der Rezeptor-Kennzahlen in Abbildung 5.25

Planungsperiode		1	2	3	6	7	8
Stückzahl		1.000	1.000	5.000	30.000	30.000	10.000
Fließrate		niedrig	niedrig	niedrig	hoch	hoch	hoch
Systemabschnitte	Manuelle Modulmontage	1	1	0	0	0	0
	Man. Modulmon. Längs.	0	0	0	0	0	0
	Man. Modulmon. Stirns.	0	0	0	0	0	0
	Man. Fügestat. Montage	0	0	0	0	0	0
	Man. Schraubst. Mont.	0	0	0	0	0	0
	Teilautomat. Montage	0	0	1	4	5	6
	Manu. Dichtheitsprüfung	1	2	3	3	3	3
	Aut. Dicht. m. aut. Werk.	0	0	0	3	3	4
	Manuelle Endmontage	1	0	1	1	1	1
	Manuelle Verpackung	1	0	1	4	4	4
	Erw. man. Endmontage	0	1	0	0	0	0
	Teil. EOL & erw. Endm.	0	0	0	0	0	0
Schichtmodell		1	2	2	2	2	2
Anzahl Werker		3	4	5	11	13	14
Taktzeit (mm:ss)		30:00	15:00	10:17	04:40	04:00	03:40

Abbildung 5.29: Beispielhafter Skalierungspfad im Subsystem III, gemäß des beispielhaften Verlaufs der Rezeptor-Kennzahlen in Abbildung 5.26

5.3.1.1 Planungsperiode 1

In der ersten Planungsperiode wird der Status Quo abgebildet. Es wird eine Jahresstückzahl in Höhe von insgesamt 1000 Ventilen nachgefragt. Die geforderte Fließrate ist für alle nachgefragten Ventile niedrig. Der Projektpartner führt die Vormontage (Montageaufgaben 1-2) für die Automotive und die sonstigen Ventile und die Montage der Funktionsmodule (Montageaufgaben 3 - 6) auf einem Handarbeitsplatz durch. Die Dichtheitsprüfung (Montageaufgabe 7) wird auf einem manuellen Prüfstand durchgeführt. Endmontage und Verpackung (Montageaufgaben 8 – 10) werden auf zwei weiteren Handarbeitsplätzen durchgeführt. Insgesamt kommen 4 Werker im 1-Schicht Betrieb in der Linie zum Einsatz. Aufgrund der aggregierten Szenarien der Rezeptor-Kennzahlen antizipiert die Skalierungsstrategie einen Anstieg der Stückzahl und empfiehlt eine Wandlung des Montagesystems für die zweite Planungsperiode.

5.3.1.2 Planungsperiode 2

Gemäß der in der Skalierungsstrategie empfohlenen Aktion wird in Planungsperiode 2 in einer neuen Montagesystemkonfiguration montiert. Mit der Erwartung einer steigenden Stückzahl wird der manuelle EOL-Test dupliziert. Verpackung und Endmontage werden zur erweiterten Endmontage zusammengefasst. Mit dem Hinzufügen des zusätzlichen EOL-Tests wird auch ein weiterer Werker hinzugefügt. Es resultiert ein halbierter Takt der Linie von nun 15 Minuten. Das Schichtmodell in Subsystem 3 wird auf ein 2-Schichtsystem erhöht. Der erwartete Stückzahlanstieg bleibt jedoch aus. Alle Rezeptor-Kennzahlen bleiben in der zweiten Planungsperiode unverändert. Basierend auf der Montagesystemkonfiguration und den eingetretenen Werten der Rezeptor-Kennzahlen wird ein Anstieg der Stückzahl nun noch wahrscheinlicher. Die in der Skalierungsstrategie empfohlene Aktion beinhaltet eine weitere Wandlung.

5.3.1.3 Planungsperiode 3

Die Kapazität des Montagesystems wird in Planungsperiode 3 weiter erhöht. Ein weiterer Werker wird in die neue Montagesystemkonfiguration aufgenommen. Ebenso wird ein weiterer manueller EOL-Test hinzugefügt. Damit wird die manuelle Montage der Funktionsmodule zum Engpass. Es wird auf den Systemabschnitt „teilautomatisierte Montage“ gewandelt, welcher einen Handarbeitsplatz sowie die automatisierte Schraubstation beinhaltet. Durch diesen Schritt wird die erweiterte Endmontage zum neuen Engpass. Die Station wird auf zwei eigenständige Handarbeitsplätze aufgeteilt. Auch in der Vormontage für die sonstigen Ventile wird der 2-Schicht-Betrieb eingeführt. Gemäß der Erwartungen steigt die Stückzahl beider Produktgruppen für Planungsperiode 3 jeweils auf 2.500, insgesamt also auf 5.000 Ventile. Die Anforderungen an die Fließrate bleiben unverändert. Es wird ein weiterer Anstieg der Stückzahl antizipiert, daher enthält die empfohlene Aktion für Subsystem 3 eine Wandlung, welche eine Wartezeit von 3 Perioden beinhaltet. Die eigentliche Wandlung findet somit erst in Planungsperiode 6 statt.

5.3.1.4 Planungsperiode 4

Im Bereich der Vormontage für die Automotive-Ventile werden aufgrund der Erwartung des Einstiegs der großen OEMs in die Serienproduktion 3 zusätzliche manuelle Montagestationen beschafft und drei weitere Werker in die Linie aufgenommen. Gestiegen

ist in dieser Planungsperiode allerdings lediglich die Stückzahl der sonstigen Ventile auf 5.000 Ventile pro Jahr.

5.3.1.5 Planungsperiode 5

Auch die geforderte Stückzahl für Automotive Ventile steigt auf 5.000 Einheiten pro Jahr, die sonstigen Ventile auf 15.000 Einheiten im Jahr. Im Bereich der Vormontage sonstige Ventile werden 3 zusätzliche Stationen für die manuelle Vormontage beschafft und drei zusätzliche Werker hinzugefügt.

5.3.1.6 Planungsperiode 6

Nachdem in den Planungsperioden 4 und 5 auf die Fertigstellung der neuen Montagesystemkonfiguration gewartet wurde, enthält der Aktionsraum in Planungsperiode 6 wieder Aktionen die eine neue Wandlung bedeuten. Im Vergleich zu Periode 3 enthält die Montagesystemkonfiguration in Periode 6 einige neue Systemabschnitte. Dies sind 3 zusätzliche Systemabschnitte „teilautomatisierte Montage“, 3 zusätzliche vollautomatisierte End-Of-Line-Tests und 3 zusätzlich Handarbeitsplätze für die Verpackung. Im Bereich der Vormontage im Subsystem I werden die vier manuellen Arbeitsplätze jeweils gegen einen Systemabschnitt „Teilautomatisierte Montage“ getauscht. In Summe enthält die neue Montagesystemkonfiguration 6 zusätzliche Werker. Die Kapazität des Montagesystems wurde drastisch erhöht. Die geforderte Jahresstückzahl ist wie erwartet ebenso gestiegen. Zusätzlich werden nun auch Ventile mit erhöhter Fließrate nachgefragt. Das Eintreten dieser Entwicklung ist in der Skalierungsstrategie bereits berücksichtigt. Daher sind die existierenden manuellen EOL-Tests erhalten geblieben, während zusätzliche vollautomatisierte EOL-Tests eingesetzt werden, die lediglich die Ventile mit niedriger Fließrate prüfen können. Für die folgende Planungsperiode 7 beinhaltet die empfohlene Aktion erneut eine Wandlung, da ein weiterer Anstieg der Stückzahl erwartet wird.

5.3.1.7 Planungsperiode 7

Mit der Erwartung steigender Stückzahlen wird die Kapazität für die siebte Planungsperiode weiter ausgebaut. Im dargestellten Skalierungspfad bleibt die geforderte Jahresstückzahl allerdings konstant. Es wird ein weiterer Systemabschnitt „Teilautomatisierte Montage“ und zwei Werker hinzugefügt. In der Vormontage Automotive wird nun auch der 2-Schicht-Betrieb eingeführt. Die vier manuellen Montagestationen werden gegen 2 Systemabschnitte „Teilautomatisierte Vormontage“ getauscht. Im Bereich der

Vormontage für sonstige Ventile wird ein neuer Werker und ein weiterer Systemabschnitt „Teilautomatisierte Vormontage“ hinzugefügt. In Erwartung einer erneuten Steigerung der Jahresstückzahl beinhaltet die Aktion für den Zustand in Planungsperiode 7 eine erneute Wandlung des Montagesystems.

5.3.1.8 Planungsperiode 8

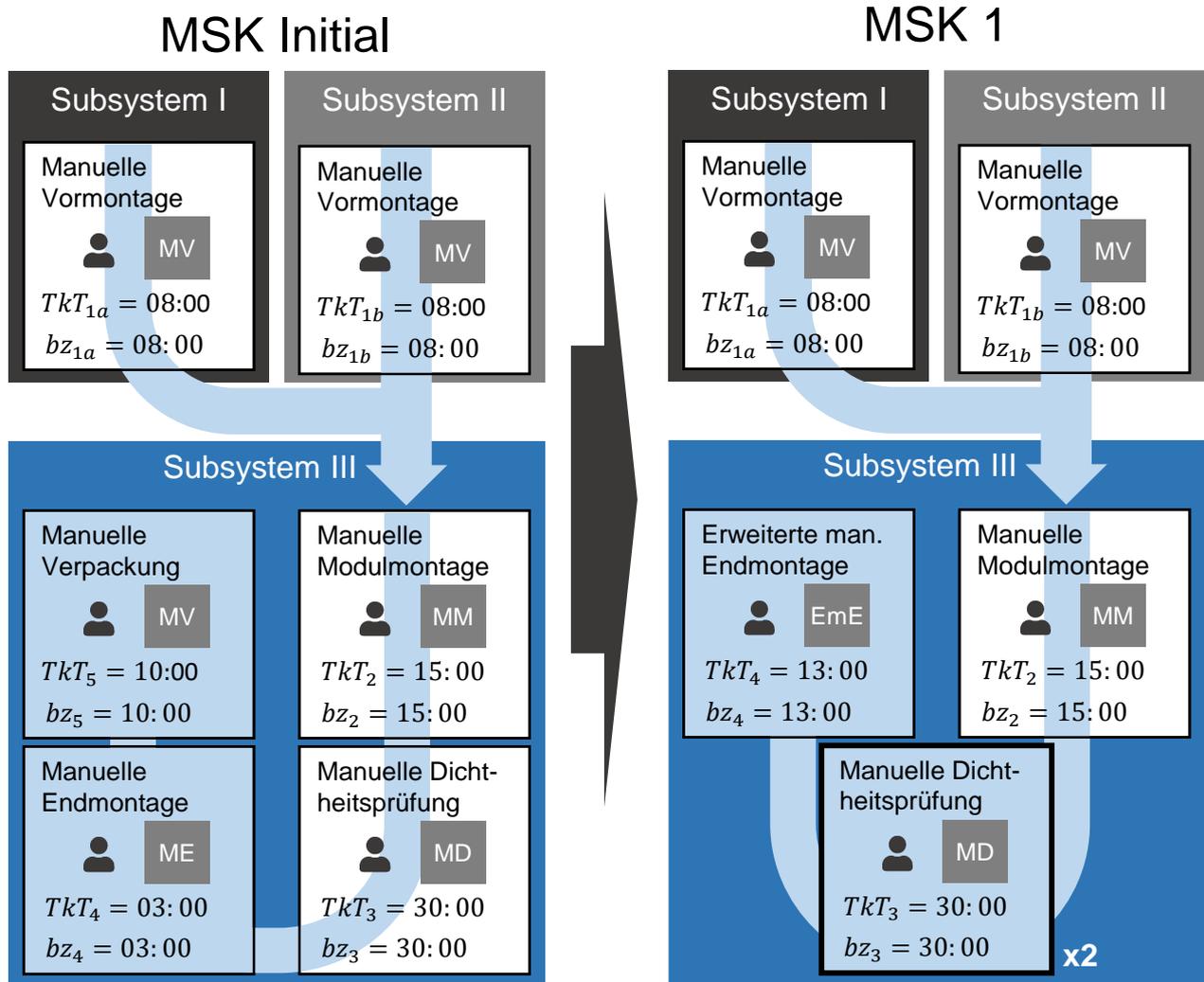
In Planungsperiode 8 werden 2 weitere Systemabschnitte „Teilautomatisierte Vormontage“ zum Subsystem II, ein weiterer Systemabschnitt „Teilautomatisierte Montage“ und ein Werker hinzugefügt um zur neuen Montagesystemkonfiguration zu wandeln. Die geforderte Jahresstückzahl geht in dieser Periode jedoch entgegen der Erwartungen zurück, was zu einer vorübergehenden Überkapazität führt.

5.3.2 Diskussion des Simulationsergebnisses

Am Beispiel des im vorigen Abschnitt beschriebenen Skalierungspfades werden drei Punkte deutlich.

1. Die in den aggregierten Szenarien formulierten Erwartungen des Unternehmens an die Entwicklung und Auswirkungen von Wandlungstreibern haben einen entscheidenden Einfluss auf die in der Skalierungsstrategie empfohlenen Aktionen. Wenn die reale Entwicklung stark von diesen Erwartungen abweicht, kommt es zu Fehlentscheidungen. Dies wird bei dem Ausbau der Produktionskapazität und zeitgleichem Rückgang der Nachfrage von Periode 7 auf Periode 8 im exemplarischen Skalierungspfad deutlich.
2. Die Skalierungsstrategie empfiehlt Aktionen proaktiv basierend auf Erwartungen über die zukünftige Entwicklung der Rezeptor-Kennzahlen. Dies ist beim Übergang von Planungsperiode 3 auf 6 zu sehen. Bei der durchgeführten Wandlung wird der manuelle End-Of-Line-Test beibehalten, weil das Risiko eingerechnet wird, dass eine höhere Fließrate gefordert werden könnte.
3. Ein Umfeld mit einer hohen Unsicherheit kann zu vielen Wandlungen führen. Im Anwendungsfall geht der Bereich der möglichen Stückzahlen sehr stark auseinander. Entsprechend muss gegebenenfalls oft gewandelt werden, falls Zustände mit einer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit auftreten.

 Manueller Arbeitsplatz
  Vollautomatisierte Montagestation
 An der Wandlung beteiligte Bereiche



$TkT^{initial} = 30:00$ $gbz^{initial} = 1:06:00$

$FK^{initial} = 18.463 \text{ €}$ $py_{initial}^{max} = 3.500$

Restriktionen: keine

 x 5 1-Schicht-Modell

$TkT^1 = 15:00$ $gbz_1 = 1:06:00$

$FK^1 = 26.588 \text{ €}$ $py_1^{max} = 14.000$

Restriktionen: keine

 x 6 2-Schicht-Modell

Abbildung 5.30: Wandlungsempfehlung für den Initialzustand beim Anwendungspartner

Zum Zeitpunkt der Planung im Anwendungsfall befand sich der Anwendungspartner im in der ersten Spalte des Anwendungsfalls dargestellten Zustand, im 1-Schicht-Betrieb mit 5 Werkern und ausschließlich manuellen Systemabschnitten. Die relevante Emp-

fehlung ist die Aktion, welche in der zweiten Spalte dargestellt wird. Diese Wandlungsempfehlung ist das erste Resultat der Gesamtmethodik. Abbildung 5.30 zeigt diese empfohlene Wandlung im Detail. Es sollte ein weiterer End-Of-Line-Test beschafft, Endmontage und Verpackung auf einem gemeinsamen Handarbeitsplatz zusammengefasst, ein zusätzlicher Werker in der Linie eingesetzt und ein 2-Schicht-Betrieb gefahren werden. In diese Empfehlung fließen implizit alle Skalierungspfade über die restlichen Planungsperioden mit ein. Die erwarteten Aktionen in späteren Planungsperioden haben somit bereits in der ersten Planungsperiode einen Einfluss auf die Entscheidung des Anwendungspartners. Die Skalierungsentscheidungen in folgenden Planungsperioden dienen lediglich der Veranschaulichung. Zum Entscheidungszeitpunkt wird die Skalierungsstrategie ausgehend von der dann ersten Planungsperiode neu berechnet und schließlich wieder nur die erste Skalierungsentscheidung umgesetzt.

5.4 Schritt 4: Konstruktionsrichtlinien

Die Wandlungshäufigkeiten aller drei Subsysteme wurden in SkaliA nach dem in Unterkapitel 4.4.1 beschriebenen Algorithmus berechnet. In Abbildung 5.31 sind die 10

Nr.	Entfernter Systemabschnitt r	Hinzugefügter Systemabschnitt s	$wha_{r \rightarrow s}$
A	Manuelle Vormontage	Teilautomatisierte Vormontage	12,85
B	Teilautomatisierte Vormontage	Manuelle Vormontage	10,15
C		Teilautomatisierte Vormontage	10,08
D	Teilautomatisierte Vormontage		8,31
E		Manuelle Verpackung	7,63
F	Manuelle Vormontage		6,38
G	Erweiterte manuelle Endmontage		6,25
H		Automatisierter EOL mit automatischer Werkstückzuführung	5,38
I	Manuelle Modulmontage	Teilautomatisierte Modulmontage	3,88
J	Teilautomatisierter EOL und erweiterte Endmontage	Automatisierter EOL mit automatischer Werkstückzuführung, Erweiterte manuelle Endmontage	2,69

Abbildung 5.31: Wandlungen mit der höchsten Wandlungshäufigkeit im Anwendungsfall

Wandlungen auf Ebene der Systemabschnitte mit den höchsten erwarteten Wandlungshäufigkeiten dargestellt. Die Wandlungen, an denen zwei Systemabschnitte beteiligt sind, entstehen durch die Anwendung eines intrastationären Skalierungsmechanismus. Dieser Umstand resultiert daraus, dass bei der Anwendung eines intrastationären Skalierungsmechanismus lediglich ein Teil der Module des Systemabschnitts betroffen ist. Es existiert also sowohl vor als auch nach der Wandlung ein Systemabschnitt. Wandlungen an denen nur ein Systemabschnitt beteiligt ist, entstehen durch die Anwendung des Skalierungsmechanismus „Stationsduplikation“. Bei diesem Skalierungsmechanismus wird ein ganzer Systemabschnitt zur Montagesystemkonfiguration hinzugefügt, bzw. entfernt. Es existiert folglich kein Pendant zu diesem Systemabschnitt in der alten, bzw. neuen Montagesystemkonfiguration.

Die dargestellten Wandlungen werden manuell in den morphologischen Kasten eingeordnet, welcher in Unterkapitel 4.4.2.1 beschrieben wird. Als Beispiel für eine Wandlung basierend auf einem intrastationären Skalierungsmechanismus wird im Folgenden die Wandlung vom Systemabschnitt „Manuelle Vormontage“ auf den Systemabschnitt „Teilautomatisierte Vormontage“ (A) beschrieben (siehe Unterkapitel 5.4.1). Als Beispiel für eine Wandlung basierend auf dem Skalierungsmechanismus „Stationsduplikation“ wird im Folgenden das Entfernen des Systemabschnitts „Erweiterte manuelle Endmontage“ (G) beschrieben (siehe Unterkapitel 5.4.2). Ebenso werden die Einordnung in den morphologischen Kasten und die abgeleiteten Konstruktionsrichtlinien beschrieben der beiden Wandlungen beschrieben.

5.4.1 Wandlung A: Von „man. Vormontage“ auf „Teilaut. Vormontage“

Bei der Wandlung vom Systemabschnitt „Manuelle Vormontage“ zum Systemabschnitt „Teilautomatisierte Vormontage“ wird der manuelle Handarbeitsplatz zur Vormontage der Anbauteile aus der Montagesystemkonfiguration gewandelt. Die Pressvorgänge werden auf die neu hinzugefügte teilautomatisierte Pressstation verschoben.

Abbildung 5.32 zeigt die Einordnung der Wandlung in den morphologischen Kasten. Im Kriterium „Wandlungsart“ wird die Wandlung als „Austausch“ eingeordnet, da 2 Systemabschnitte gegeneinander getauscht werden. Mit einem Wert von 12,85 wird die Wandlungshäufigkeit als hoch eingestuft. Da bei der Wandlung keine Betriebsmittel entfernt werden, beträgt das normierte Investitionsvolumen der entfernten Systemabschnitte 0 € und wird somit als „niedrig“ eingestuft. Es existiert das Gegenereignis zu

dieser Wandlung. Das heißt, es ist wahrscheinlich, dass die Wandlung auch in die entgegengesetzte Richtung durchgeführt werden wird. Durch den intrastationären Skalierungsmechanismus „Skalierbare Automatisierung“ ist das Prozessmodul der Pressstation betroffen. Gewandelt wird in diesem Modul von manuell auf automatisiert. Basierend auf dieser Einordnung werden im Katalog der Wandlungsbefähiger (siehe Abschnitt A7) insgesamt 14 Wandlungsbefähiger als Konstruktionsrichtlinien vorgeschlagen. Die Titel der Konstruktionsrichtlinien für die Wandlung von „manuelle Vormontage“ auf „Teilautomatisierte Vormontage“ (A) sind in Abbildung 5.33 dargestellt und nach dem zugehörigen Wandlungsbefähiger gegliedert. Die fettgedruckten Konstruktionsrichtlinien werden im Folgenden exemplarisch erläutert.

Einordnung der Wandlung von „manuelle Vormontage“ auf „Teilautomatisierte Vormontage“ in den morphologischen Kasten				nicht gewähltes Feld
Kriterium	Ausprägung			
Wandlungsart	Rein	Raus	Austausch	
Wandlungshäufigkeit	Niedrig	Mittel	Hoch	
Investitionsvolumen	Niedrig	Mittel	Hoch	
Gegenereignis	ja	nein		
Betroffenes Modul	Transport	Prozess	Zuführung	
Automatisierungsgrad	Manuell → Manuell	Manuell → Automatisiert	Automatisiert → Manuell	Automatisiert → Automatisiert

Abbildung 5.32: Einordnung der Wandlung A in den morphologischen Kasten

5.4.1.1 Kann mit Standard-Transportmitteln bewegt werden

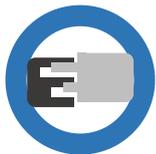
Diese Konstruktionsrichtlinie gibt vor, dass alle bei der Wandlung bewegten Betriebsmittel mit den in der Produktion des Anwenders vorhandenen Standard-Transportmitteln bewegt werden können müssen. Im Fall des Anwendungspartners gelten spezielle Anforderungen, da der betrachtete Montagebereich in einem Reinraum untergebracht ist. Der Zugang zu diesem Reinraum ist für die standardmäßig vorhandenen Flurförderzeuge (Stapler und Hubwagen) nicht möglich. Für alle Umbaumaßnahmen, bei denen

die Betriebsmittel nicht manuell durch die vorhandene Schleuse in den Reinraum transportiert werden können, muss der Reinraum durch einen Sonderzugang geöffnet und nach der Umbaumaßnahme gereinigt werden. Die neuen Betriebsmittel sollten folglich im besten Fall durch die Schleuse transportiert oder alternativ auf einem Flurförderzeug angeliefert werden können. Insbesondere steht kein Hallenkran zur Montage der Module bereit.



Mobilität

- Kleine Abmessungen der Anlage
- Geringes Gewicht der Anlage
- Leicht lösbare Bodenverbindungen
- Nicht fundamentierte Anlage
- **Kann mit Standard-Transportmitteln bewegt werden**
- Geringer Montageaufwand der Stationsmodule



Kompatibilität

- Hohe Positioniergenauigkeit der mechanischen Schnittstellen
- **Stationsmodule angepasst an(Layout-)Rastergrößen**
- Nutzung von Schnellverschlüssen zwischen Stationsmodulen



Universalität

- **Plug & Produce-fähige Stationsmodule**
- Standardisierte Transporthilfsmittel
- Werkstückträger durch Universalaufnahmen anpassbar



Modularität

- **In Prozessmodul integrierte Steuerung und Peripherie**
- Minimaler Verblockungsgrad des Prozessmoduls mit Station

Abbildung 5.33: Konstruktionsrichtlinien für Wandlung von „manuelle Vormontage“ auf „Teilautomatisierte Vormontage“ (A)

5.4.1.2 Stationsmodule angepasst an (Layout-)Rastergrößen

Durch die Definition von Rastergrößen, die für die Grundfläche von Montagestationen standardisierte Abmessungen vorgeben, kann die Verschwendung von Raum und der

gezielte Vorhalt von Standflächen für weitere Stationen erreicht werden. Mit der teilautomatisierten Pressstation wird eine neue Station konstruiert. Diese sollte sich an die vorgegebene Rastergröße halten.

5.4.1.3 Plug & Produce-fähige Stationsmodule

Die Wandlungshäufigkeit der betrachteten Wandlung ist sehr hoch. Aufgrund der Wandlungshäufigkeit der Wandlung von „manuelle Vormontage“ auf „Teilautomatisierte Vormontage“ (siehe Abbildung 5.31) wird erwartet, dass innerhalb der 8 Jahre des Planungszeitraums etwa 12-mal ein Systemabschnitt „manuelle Vormontage“ auf einen Systemabschnitt „teilautomatisierte Vormontage“ gewandelt wird. Es ist daher besonders wichtig, die für den Umbau benötigte Zeit gering zu halten. Eine Maßnahme zu diesem Zweck ist die Berücksichtigung des Plug & Produce Prinzips. Das bedeutet in diesem konkreten Fall, dass die Inbetriebnahme der Steuerung der Presse und deren Einbindung in die Infrastruktur des Montagesystems keine Eingriffe innerhalb der Linie erfordern dürfen. Das Prozessmodul sollte soweit konfiguriert sein, dass es nach dem Anschließen von Netzwerk, Strom und Druckluft direkt funktionsbereit ist.

Einordnung des Entfernens von „Erweiterte manuelle Endmontage“ in den morphologischen Kasten				nicht gewähltes Feld
Kriterium	Ausprägung			
Wandlungsart	Rein	Raus	Austausch	
Wandlungshäufigkeit	Niedrig	Mittel	Hoch	
Investitionsvolumen	Niedrig	Mittel	Hoch	
Gegenereignis	ja	nein		
Betroffenes Modul	Transport	Prozess	Zuführung	
Automatisierungsgrad	Manuell → Manuell	Manuell → Automatisiert	Automatisiert → Manuell	Automatisiert → Automatisiert

Abbildung 5.34: Einordnung der Wandlung G in den morphologischen Kasten

5.4.1.4 In Prozessmodul integrierte Steuerung und Peripherie

Das Prozessmodul für die automatisierten Pressaufgaben in der Vormontage wird in das bestehende Grundkonzept der manuellen Vormontage-Station integriert, um eine hohe Modularität zu gewährleisten. Da erwartet wird, dass es im Planungshorizont zu einer Umkehr der Wandlung kommt, sollte das Prozessmodul leicht austauschbar sein. Zu diesem Zweck dient diese Konstruktionsrichtlinie als Vorgabe alle erforderliche Hardware innerhalb des Moduls zu belassen. Dies beinhaltet die Steuerung und Medienanschlüsse der Presse, welche innerhalb des Prozessmoduls angeordnet werden und eine minimale Anzahl Schnittstellen zur restlichen Station aufweisen sollten.

Die Zuordnung der Wandlungen kann dem in Abschnitt A7 dargestellten Katalog der Konstruktionsrichtlinien entnommen werden. Im Folgenden wird mit dem Entfernen von „Erweiterte manuelle Endmontage“ (G) eine weitere exemplarische Wandlung erläutert.

5.4.2 Wandlung G: Entfernen von „Erweiterte manuelle Endmontage“

Diese Wandlung beinhaltet das Entfernen des Systemabschnitts „Erweiterte manuelle Endmontage“ aus dem Montagesystem. Abbildung 5.34 zeigt die Einordnung der Wandlung in den morphologischen Kasten. In der Kategorie Wandlungsart wird sie als „Raus“ eingeordnet. Die Wandlungshäufigkeit ist mit einem Wert von 6,25 hoch. Das Investitionsvolumen für die initiale Montagesystemkonfiguration bestehend aus „Manuelle Vormontage“, „Manuelle Modulmontage“, „Manueller EOL“, „Manuelle Endmontage“ und „Manuelle Verpackung“ beträgt 129.540 €. Bei 5 Stationen und einem Investitionsvolumen des Systemabschnitts „Erweiterte manuelle Endmontage“ von 18.180 € beträgt das normierte Investitionsvolumen 0,7 und wird somit als „Mittel“ eingestuft. Es



Mobilität

- **Bewegliche Ausstattung der Arbeitsplätze**
- Leicht lösbare Bodenverbindungen
- **Geringes Gewicht und Größe**
- Nicht fundamentierte Anlage



Universalität

- **Ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze**

Abbildung 5.35: Konstruktionsrichtlinien für Wandlung G

existiert das Gegenereignis bei dem ein zusätzlicher Systemabschnitt „Erweiterte manuelle Endmontage“ zum Montagesystem hinzugefügt wird. Durch die Wandlung betroffen, sind alle Module der Station und es gibt keine Referenz, um die Änderung des Automatisierungsgrads einzuordnen. Gemäß dieser Einordnung werden die in Abbildung 5.35 aufgeführten Konstruktionsrichtlinien abgeleitet. Die fettgedruckten Konstruktionsrichtlinien werden im Folgenden erläutert.

5.4.2.1 Bewegliche Ausstattung der Arbeitsplätze

Es wird erwartet, dass der Systemabschnitt mehrmalig als Ganzes hinzugefügt und aus der Linie entfernt wird. Es ist daher besonders wichtig, dass diese Wandlung schnell und mit geringem Aufwand durchführbar ist. Daher sollte die Montagestation des Systemabschnitts beweglich ausgestattet werden. Ein Beispiel für eine solche Lösung ist das Anbringen von Rollen an der Montagestation.

5.4.2.2 Geringes Gewicht und Größe

Aufgrund der häufig durchzuführenden Wandlung sollten Gewicht und Größe der Montagestation möglichst gering sein. Dies erleichtert die technische Durchführung der Wandlung. Um dieses Ziel zu erreichen, stehen den Konstrukteuren diverse Möglichkeiten zur Auswahl. Hierzu zählen die Nutzung leichter Werkstoffe, der Verzicht auf überausgelegte Komponenten und eine bauraumsparende Auslegung der Station.

5.4.2.3 Ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze

Um einer wechselnden Gruppe Werker eine effiziente und ergonomische Arbeit am Systemabschnitt zu ermöglichen, sollte die Station anpassbar auf verschiedene Anforderungen wie Körpergröße oder Linkshänder/ Rechtshänder sein. Mögliche Maßnahmen sind höhenverstellbare Arbeitstische und verschiebbare Zuführmodule.

5.4.3 Weitergabe der Ergebnisse

Mit der vollständigen Einordnung der Wandlungen in den morphologischen Kasten und der Zuordnung der Konstruktionsrichtlinien zu den an der Wandlung beteiligten Systemabschnitten ist die Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl wandlungsfähiger Montagesysteme abgeschlossen. Es ist ermittelt worden, an welchen Stellen im Montagesystem welche Wandlungsbefähiger genutzt werden sollten um die Wandlungsfähigkeit des Montagesystems ideal auf die Skalierungsstrategie abzustimmen. Die Richtlinien werden abschließend an die Konstrukteure im Anlagenbau übergeben.

6 Kritische Diskussion und Ausblick

Im Folgenden wird der Erfüllungsgrad der in Unterkapitel 3.4 gestellten Anforderungen an die zu entwickelnde Methode bewertet. Zudem wird ein Ausblick auf weitere Forschungsaktivitäten im Themenfeld gegeben. Hierzu werden zum einen die durch den Anwendungsfall gewonnenen Erkenntnisse berücksichtigt und zum anderen die Erfahrungen aus weiteren, vom wbk Institut für Produktionstechnik durchgeführten Projekte bei produzierenden Unternehmen herangezogen.

6.1 Kritische Diskussion

Die vorliegende Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme ermöglicht dem Planer die Ableitung technischer Maßnahmen für die Erreichung der optimalen Wandlungsfähigkeit eines Montagesystems. Die in Unterkapitel 1.2 definierte, übergeordnete Zielsetzung wird mit dem Ansatz erreicht. Der Ansatz verknüpft die aus der Literatur bekannten Elemente Wandlungstreiber, Rezeptoren und Wandlungsbefähiger. Ergänzt wird der Lösungsansatz durch die Definition konkreter Rezeptor-Kennzahlen. Somit wird der Stand der Technik um ein Werkzeug erweitert, welches Unternehmen befähigt, das unstrukturiert vorhandene Wissen und die Erwartungen von Experten in quantitative Anforderungen an ein Montagesystem zu überführen. Mit der Entwicklung der Analyse der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse wird der Stand der Technik um eine Methode erweitert, welche es Planern ermöglicht, in einem frühen Planungsstadium die potenziellen Bereiche zur Automatisierung eines wandlungsfähigen Montagesystems zu identifizieren. Bisher bleiben die Ansätze im Stand der Technik eine konkrete Aussage über die anzuwendenden Wandlungsbefähiger für spezifische Problemstellungen schuldig. Die Verknüpfung des morphologischen Kastens der Wandlung auf Ebene von Systemabschnitten mit einem Katalog spezifischer Wandlungsbefähiger in der vorliegenden Methodik schließt diese Lücke. Eine Herausforderung für die Nutzung der Vorteile skalierbar automatisierbarer Montagesysteme ist die Kostenrechnung. Üblicherweise wird die Entscheidung für eine Investition basierend auf deren Amortisationsdauer getroffen. Dies setzt voraus, dass der Fall ohne Investition und mit Investition zuverlässig bewertet werden können. Für den Fall unsicherer Einflussfaktoren und einer Vielzahl alternativer Investitionsoptionen stößt dieses Vorgehen an seine Grenzen. Die vorgestellte Methodik bietet einen Ansatz um in der beschriebenen Situation optimale Investitionsentscheidungen treffen zu können. Ein weiterer Beitrag ist die Erweiterung einstufiger Konfigurationsentscheidungen unter

Unsicherheit zu einer Skalierungsstrategie, die über den gesamten Lebenszyklus eines Montagesystems Aktionen vordenkt.

Eine Einschränkung des vorliegenden Ansatzes ist die starke Vereinfachung in der Berechnung der Produktionskennzahlen einer einzelnen Montagesystemkonfiguration. Taktzeitspreizungen zwischen Produktvarianten werden nicht berücksichtigt. Unterschiedliche Prozesse je Variante werden nicht berücksichtigt. Lediglich verschiedene Prozessreihenfolgen bei gleichbleibendem Prozessinhalt sowie rekursive und gekreuzte Materialflüsse können mit der Methodik abgebildet werden. Einflüsse aus Losgrößen werden nicht berücksichtigt. Pufferdimensionierungen werden nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass sich kein Materialstau bildet. Eine weitere Quelle der Unsicherheit liegt in der Berechnung der aggregierten Szenarien. Die Verläufe der Rezeptor-Kennzahlen basieren auf Schätzwerten der Experten und werden im Fall stetiger Rezeptor-Kennzahlen zusätzlich durch die Einteilung in Klassen verzerrt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Methodik sollte folglich stets die vorhandene Unschärfe der Modellierung berücksichtigt werden. Der Anwender der Methodik muss sich bewusst sein, dass die Qualität der Ergebnisse zusätzlich zu einem großen Teil von der Qualität der verwendeten Eingangsdaten abhängt. Umfassende und präzise Planungsdaten sind eine wesentliche Voraussetzung für verwendbare Ergebnisse.

6.2 Ausblick

In folgenden Arbeiten können die in der Modellierung der Berechnung der Kennzahlen von Montagesystemkonfigurationen vorgenommenen Vereinfachungen der Realität Schritt für Schritt abgebaut werden, um eine präzisere Abbildung realer Produktionsszenarien zu erreichen. Eine große Herausforderung ist an dieser Stelle die Berechnungsgeschwindigkeit. Es liegt bereits eine hohe Komplexität in der Berechnung des MDP vor, da aus der Kombination mehrerer Rezeptor-Kennzahlen und einer hohen Zahl Montagesystemkonfigurationen eine hohe Anzahl Zustände resultiert. Für jede Kombination aus Montagesystemkonfiguration und stochastischem Zustand müssen die Betriebskosten berechnet werden. Diese Berechnung ließe sich von der Lösung des MDP entkoppeln und in einer separaten Simulation unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen berechnen. Eine weitere Herausforderung ist die Parametrierung der Einzelsimulationen bei der Berechnung der Betriebskosten. Eine manuelle Parametrierung jeder einzelnen Simulation durch den Planer ist zeitlich nicht abbildbar. Es muss daher ein Ansatz gefunden werden, die Einzelsimulationen automatisiert zu

parametrieren. Für die vorgenommenen Restriktionen können Schritte unternommen werden um sowohl die automatisierte Konfiguration als auch die Berechnung von Taktzeit, Durchlaufzeit und Produktionskosten zu ermöglichen.

- *Unterschiedliche Prozesse je Variante:* Die Berücksichtigung unterschiedlicher Prozesse je Variante setzt die Abbildung unterschiedlicher Produktvarianten auf denselben Betriebsmitteln voraus. Es müssten sowohl die Produktvarianten, als auch Arbeitspläne, die einzelnen Produktvarianten auszuführende Montageaufgaben zuweisen, abgebildet werden. Unter Berücksichtigung eines Variantenmix, könnte ein Mittelwert für die genannten Produktionskennzahlen berechnet werden.
- *Taktzeitspreizungen:* Diese Restriktion kann ebenso durch obigen Ansatz gelöst werden. Die gleichen Montageaufgaben müssten für die unterschiedlichen Varianten unterschiedlich hinterlegt werden, sodass sie auf den Systemabschnitten zu unterschiedlichen Bearbeitungszeiten führen.
- *Komplexe Materialflüsse:* Auch die Abbildung komplexer Materialflüsse wäre anhand der Nutzung von Arbeitsplänen möglich. Aus den unterschiedlichen Materialflüssen, welche die Produktvarianten durch die Montage nehmen, könnten ebenfalls Mittelwerte für die benötigten Produktionskennzahlen berechnet werden.
- *Losgröße:* um den Einfluss von Losgrößen abzubilden, müssten Rüstzeiten für die Systemabschnittskonzepte definiert werden. Die Losgröße würde eine weitere Stellgröße in der Erstellung von Montagesystemkonfigurationen darstellen und den Lösungsraum weiter vergrößern.
- *Pufferdimensionierung:* Liege-/ und Transportzeiten zwischen Montagestationen werden in der Methodik nicht berücksichtigt. Durch die Abbildung von Puffern zwischen Station wird die Komplexität der Berechnungen erhöht. Da die Aufstellung des MDP es erfordert, eindeutige Werte für die Produktionskennzahlen anzugeben, müsste mit den Werten gerechnet werden, die sich in einem eingeschwungenen System ergeben.

Ein weiterer Anknüpfungspunkt an die vorliegende Arbeit ist die Weiterentwicklung der skalierbaren Automatisierung in Richtung einer fluiden Automatisierung. Durch die bi-

näre Einteilung der Stationsmodule in manuell oder automatisiert wird der Lösungsraum eingegrenzt. Ziel der fluiden Automatisierung ist die Ermöglichung einer kleinschrittigeren Abstufung der einzelnen Automatisierungsgrade. Wichtige Voraussetzung ist eine Minimierung von Wandlungskosten und -dauern, da die fluide Automatisierung ihre Potenziale erst bei häufigen Wandlungen entfalten kann.

7 Zusammenfassung

Individuelle Kundenwünsche führen zum Phänomen der „Mass Customization“. Moderne Produktionssysteme müssen in der Lage sein, auf die unsicheren und volatilen Anforderungen zu reagieren, die sich aus kurzen Produktlebenszyklen und personalisierten Kundenwünschen ergeben. Notwendig sind wandlungsfähige Systeme, die sich an diese sich ändernden Anforderungen anpassen und eine ähnliche Kosteneffizienz erreichen wie traditionelle Lean-Produktionssysteme. Für die Implementierung von wandlungsfähigen Montagesystemen gibt es technische und organisatorische Möglichkeiten. Es müssen die richtigen Montagestationen und die optimalen Wandlungsbefähiger zur Minimierung der Lebenszykluskosten eines Montagesystems gefunden werden.

Ziel dieser Dissertation ist es, technische Maßnahmen abzuleiten, um die optimale Wandlungsfähigkeit eines Montagesystems zu erreichen. Zu diesem Zweck wird die optimale Wandlungsfähigkeit auf Basis der erwarteten Lebenszykluskosten des Montagesystems gemessen. Die betrachtete Wandlungsfähigkeit fokussiert sich auf eine skalierbare Automatisierung. Ein Montagesystem mit einem skalierbaren Automatisierungsgrad kann seinen Automatisierungsgrad sowohl erhöhen als auch reduzieren.

Die Methodik der Ableitung technischer Maßnahmen zur Erreichung der optimalen Wandlungsfähigkeit besteht aus vier Schritten. Der erste Schritt ist die Quantifizierung von Volatilität und Unsicherheit auf der Grundlage von Wandlungstreibern, die spezifische Rezeptor-Kennzahlen beeinflussen. Im zweiten Schritt wird der technische Lösungsraum möglicher physikalischer Konfigurationen des Systems entwickelt. Um eine Skalierungsstrategie zu berechnen, wird im dritten Schritt ein Markovsches Entscheidungsproblem formuliert und gelöst. Der vierte Schritt besteht aus der Analyse der Skalierungsstrategie und der Ableitung von Konstruktionsrichtlinien für spezifische Wandlungstreiber, um technische Maßnahmen zur Erreichung der optimalen Wandlungsfähigkeit zu finden. Die Methodik wird am Beispiel der Lernfabrik Globale Produktion des wbk Institut für Produktionstechnik erläutert.

Erprobt wird der Ansatz anhand eines Herstellers von Hochdruckventilen für den Einsatz in mobilen Brennstoffzellen. Um die notwendigen Berechnungen durchführen zu können, wurde die Anwendung SkaliA entwickelt. Die Erprobung in diesem realen Anwendungsfall konnte erfolgreich durchgeführt werden.

Publikationsliste

(Hofmann & Staehr et al. 2019)

Hofmann, C.; Staehr, T.; Cohen, S.; Stricker, N.; Haefner, B. & Lanza, G. (2019), „Augmented Go & See: An approach for improved bottleneck identification in production lines“. *9th Conference on Learning Factories 2019*. Braunschweig, Deutschland, Hrsg. C. Herrmann & S. Thiede, *Procedia Manufacturing*, Open access, S. 148–154.

(Lanza & Stähr et al. 2016)

Lanza, G.; Stähr, T. & Sapin, S. (2016), „Planung einer Montagelinie mit skalierbarem Automatisierungsgrad“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(10), S. 614–617.

(Lanza & Schulze et al. 2016)

Lanza, G.; Schulze, V.; Bejnoud, F.; Stähr, T.; Wruck, A. & Ren, L.-H. (2016), „Total Cost of Ownership-Betrachtungen von Werkzeugmaschinen“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(12), S. 798–801.

(Stähr & Ungermann et al. 2017)

Stähr, T.; Ungermann, F. & Lanza, G. (2017), „Scalable assembly for fuel cell production“ in *7. WGP-Jahreskongress Aachen*, 5.-6. Oktober 2017, Hrsg. R. Schmitt & G. Schuh, *Apprimus Wissenschaftsverlag*, Aachen.

(Stähr & Lanza 2017)

Stähr, T. & Lanza, G. (2017), „Ausfallanalyse von Werkzeugmaschinen“, *wt-online*(7/8), S. 507–510.

(Stähr & Englisch et al. 2018)

Stähr, T.; Englisch, L. & Lanza, G. (2018), „Creation of configurations for an assembly system with a scalable level of automation“. *7th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS 2018)*. Tianjin, China, Hrsg. S. Wang & J. Hu, *Procedia CIRP*, Open access, S. 7–12.

Literaturverzeichnis

Literaturquellen nach dem Schema A_Name (Jahr) beziehen sich auf studentische Arbeiten am wbk Institut für Produktionstechnik, die durch den Autor der Dissertation angeleitet wurden.

(A_Blumenschein 2018)

Blumenschein, B. (2018), *Planung skalierbarer Automatisierungslösungen in der Elektronikmontage*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Bouchhima 2019)

Bouchhima, B. (2019), *Planung eines Montagesystems für Hochdruckventile mit skalierbarem Automatisierungsgrad*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Derichs 2018)

Derichs, D. (2018), *Statistische Analyse von Marktsituationen und Skalierungsmöglichkeiten einer Produktionslinie für Brennstoffzellen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Englisch 2017)

Englisch, L. (2017), *Konzeption eines skalierbaren Montagesystems für Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Haack 2017)

Haack, G. (2017), *Planung einer skalierbaren Montage für ein modulares Elektroniksystem*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Klapper 2017)

Klapper, R. (2017), *Methode zur Bewertung und Auswahl optimaler Automatisierungsgrade für Montagestationskonfigurationen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Liem 2018)

Liem, E. (2018), *Aufbau einer modularen Automatisierungslösung in Kooperation mit Industriepartner und der Lernfabrik*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Mußtow 2019)

Mußtow, P. (2019), *Erprobung einer Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme unter Unsicherheit am Beispiel der Lernfabrik Globale Produktion*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Ungermann 2017)

Ungermann, F. (2017), *Skalierbare Automatisierung: Methodik zur Bewertung und Auswahl optimaler Montagesystemkonfigurationen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Autor 2015)

Autor, D. H. (2015), „Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation“, *Journal of Economic Perspectives*, 29(3), S. 3–30.

(Benkamoun 2016)

Benkamoun, N. (2016), *Systemic design methodology for changeable manufacturing systems*. Dissertation, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, Institut Pascal - Labex IMobs3.

(Bullinger 1986)

Bullinger, H.-J. (1986), *Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis*, Hanser, München, Wien. ISBN: 3-446-14606-7.

(Burggräf & Wagner et al. 2019)

Burggräf, P.; Wagner, J.; Dannapfel, M.; Fluchs, S.; Müller, K. & Koke, B. (2019), „Automation decisions in flow-line assembly systems based on a cost-benefit analysis“. *Proceedings of 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*. Ljubljana, Slowenien, Hrsg. P. Butala, E. Govekar & R. Vrabič, S. 529–534.

(Bürgin & Echsler Minguillon et al. 2017)

Bürgin, J.; Echsler Minguillon, F.; Wehrle, F.; Häfner, B. & Lanza, G. (2017), „Demonstration of a Concept for Scalable Automation of Assembly Systems in a Learning Factory“, *Procedia Manufacturing*, 9, S. 33–40.

(Choi & Ip 1999)

Choi, C. K. & Ip, W. H. (1999), „A comparison of MTM and RTM“, *Work Study*, 48(2), S. 57–61.

(Cisek 2005)

Cisek, R. (2005), *Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen*. Dissertation, Technische Universität München, München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb).

(Cisek & Habicht et al. 2002)

Cisek, R.; Habicht, C. & Neise, P. (2002), „Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF*, 97(9), S. 441–445.

(Daščenko 2006)

Daščenko, A. I. (2006), *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*, Springer, Berlin, Heidelberg. <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0663/2005937900-d.html>. ISBN: 9783540293972 [26.09.2019].

(Davis 1989)

Davis, S. M. (1989), „From “future perfect”: Mass customizing“, *Planning Review*, 17(2), S. 16–21.

(Eilers 2015)

Eilers, J. (2015), *Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme*. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, Werkzeugmaschinenlabor WZL.

(EU Inline 2017)

EU Inline (2017), *INLINE. An innovative design of a flexible, scalable, high quality production line for PEMFC manufacturing*. <http://inline-project.eu/> [21.10.2019].

(Eversheim 1989)

Eversheim, W. (1989), *Fertigung und Montage*, VDI-Verlag, Düsseldorf. ISBN: 978-3-642-64800-7.

(Fisel 2019)

Fisel, J. K. B. (2019), *Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme. Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Fisel & Arslan et al. 2017)

Fisel, J.; Arslan, A. & Lanza, G. (2017), „Changeability Focused Planning Method for Multi Model Assembly Systems in Automotive Industry“. *Manufacturing Systems*

4.0. *Proceedings of the 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems*. Taichung City, Taiwan, Hrsg. M. M. Tseng, H.-Y. Tsai & Y. Wang, Elsevier, S. 515–520.

(Fuchs & Hager et al. 1990)

Fuchs, H.; Hager, M.; Höller, J.; Lauermann, W.; Lichtenberger, W.; Noisser, A.; Rieder, W.; Schalken, P.; Schendl, A.; Schwarz, F.; Steiner, K.; Wally, K.; Willimek, W.; Zeichen, G.; Krainz, G. & Mooss, H. (1990), *Flexible Automation*, Wirtschaftsförderungsinstitut der Bundeskammer der gewerblich Wirtschaft, Wien.

(Gygli & Haelg et al. 2019)

Gygli, S.; Haelg, F.; Potrafke, N. & Sturm, J.-E. (2019), „The KOF Globalisation Index – revisited“, *The Review of International Organizations*, 14(3), S. 543–574. <https://doi.org/10.1007/s11558-019-09344-2> [26.09.2019].

(Hahn 1972)

Hahn, G. J. (1972), „Sample Sizes for Monte Carlo Simulation“, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-2(5), S. 678–680.

(Heger 2007)

Heger, C. L. (2007), *Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA).

(Hernández Morales 2002)

Hernández Morales, R. (2002), *Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA).

(Hirsch-Kreinsen 2015)

Hirsch-Kreinsen, H. (2015), „Entwicklungsperspektiven von Produktionsarbeit“ in *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*, Hrsg. A. Botthof & E. Hartmann, Springer Vieweg, Berlin, S. 89–98.

(Howard & Matheson 1972)

Howard, R. A. & Matheson, J. E. (1972), „Risk-Sensitive Markov Decision Processes“, *Management Science*, 18(7), S. 356–369.

(International Labour Office 2018)

International Labour Office (2018), *Global Wage Report 2018/19. What lies behind gender pay gaps*, International Labour Office, Genf. ISBN: 9789220313466.

(Islamoglu & Ryu et al. 2014)

Islamoglu, N. E.; Ryu, K. & Moon, I. (2014), „Labour productivity in modular assembly: a study of automotive module suppliers“, *International Journal of Production Research*, 52(23), S. 6954–6970.

(Keddis & Kainz et al. 2015)

Keddis, N.; Kainz, G.; Zoitl, A. & Knoll, A. (2015), „Modeling production workflows in a mass customization era“. *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. Sevilla, Hrsg. IEEE, Piscataway, New Jersey, USA, S. 1901–1906.

(Kinkel 2012)

Kinkel, S. (2012), „Trends in production relocation and backshoring activities“, *International Journal of Operations & Production Management*, 32(6), S. 696–720.

(Klemke 2014)

Klemke, T. (2014), *Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA).

(Kluge 2011)

Kluge, S. (2011), *Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA.

(Kolberg & Zühlke 2015)

Kolberg, D. & Zühlke, D. (2015), „Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies“, *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), S. 1870–1875.

(Konold & Reger 2003)

Konold, P. & Reger, H. (2003), *Praxis der Montagetechnik*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden. ISBN: 978-3-663-01610-6.

(Koren & Heisel et al. 1999)

Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G. & van Brussel, H. (1999), „Reconfigurable Manufacturing Systems“, *CIRP Annals*, 48(2), S. 527–540.

(Landherr 2014)

Landherr, M. H. (2014), *Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung*. Dissertation, Stuttgart.

(Lanza & Moser 2012)

Lanza, G. & Moser, R. (2012), „Strategic Planning of Global Changeable Production Networks“. *Proceedings of the 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012*. Athen, Griechenland, Hrsg. G. Chryssolouris & D. Mourtzis, S. 257–262.

(Lanza & Moser et al. 2015)

Lanza, G.; Moser, E.; Stoll, J. & Haefner, B. (2015), „Learning Factory on Global Production“ in *5th Conference on Learning Factories. Bochum, Germany, 7 - 8 July 2015*, Hrsg. D. Kreimeier, Curran, Red Hook, NY, S. 120–125.

(Lanza & Nyhuis et al. 2018)

Lanza, G.; Nyhuis, P.; Fisel, J.; Jacob, A. & Nielsen, L. (Hrsg.) (2018), *Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0 (acatech Studie)*, Herbert Utz Verlage, München.

(Laux & Gillenkirch et al. 2018)

Laux, H.; Gillenkirch, R. M. & Schenk-Mathes, H. Y. (2018), *Entscheidungstheorie*, Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-57817-9.

(Littman & Dean et al. 1995)

Littman, M. L.; Dean, T. L. & Kaelbling, L. P. (1995), „On the Complexity of Solving Markov Decision Problems“. *Proceedings of the Eleventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Hrsg. P. Besnard & S. Hanks, Morgan Kaufmann Publishers Inc, San Francisco, CA, USA, S. 394–402. ISBN: 1-55860-385-9. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2074158.2074203> [26.09.2019].

(Loferer 2002)

Loferer, M. (2002), *Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen*. Dissertation, Technische Universität München, München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb).

(Lotter 1992)

Lotter, B. (1992), *Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik*, VDI-Verlag, Düsseldorf. ISBN: 3-18-401168-2.

(Lotter & Wiendahl 2006)

Lotter, B. & Wiendahl, H.-P. (2006), *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis*, Springer, Berlin, Heidelberg.

(Lübkeermann 2016)

Lübkeermann, J. (2016), *Ermittlung des Restrukturierungsbedarfs von Fabriken*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA).

(Maynard & Stegemerten et al. 1948)

Maynard, H. B.; Stegemerten, G. J. & Schwab, J. L. (1948), *Methods-time measurement*, McGraw-Hill, New York.

(Mietzner 2009)

Mietzner, D. (2009), *Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen*. Dissertation, Universität Potsdam, Potsdam, Institut für Gründung und Innovation (BIEM-CEIP).

(Möller 2008)

Möller, N. (2008), *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*. Dissertation, Technische Universität München, München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb).

(Moser 2014)

Moser, R. (2014), *Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke. Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunktmittels multikriterieller Optimierung*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Naumann & Fechter 2015)

Naumann, M. & Fechter, M. (2015), „Robots as enablers for changeability in assembly applications“. 15. *Internationales Stuttgarter Symposium. Automobil- und Motorentchnik*, Hrsg. M. Bargende, H.-C. Reuss & J. Wiedemann, Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 357–373.

(Neumann 2015)

Neumann, M. (2015), *Methode für eine situationsbasierte Adaption und Absicherung der Produktionsfähigkeit in der Serienmontage*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, Fraunhofer IPA.

(OECD 2019)

OECD (2019), *Average annual wages*. https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AV_AN_WAGE [26.09.2019].

(Pachow-Frauenhofer 2012)

Pachow-Frauenhofer, J. (2012), *Planung veränderungsfähiger Montagesysteme*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA).

(Peters 2013)

Peters, S. (2013), *Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Porter 1979)

Porter, M. E. (1979), „How competitive forces shape strategy“, *Harvard Business Review*, 57(2), S. 137–145.

(Pröpster 2015)

Pröpster, M. H. (2015), *Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus*. Dissertation, Technische Universität München, München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb).

(Puterman 2009)

Puterman, M. L. (2009), *Markov Decision Processes. Discrete Stochastic Dynamic Programming*, John Wiley & Sons Inc, Hoboken. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=294454>. ISBN: 0-471-72782-2 [26.09.2019].

(Reibnitz 1992)

Reibnitz, U. von (1992), *Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung*, Gabler, Wiesbaden.

(Reinhart & Kerbs et al. 2008)

Reinhart, G.; Kerbs, P.; Schellmann, H.; Hoffmann, H.; Reinhart, R. & Zäh, M. F. (2008), „Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. das richtige Maß finden“. *Münchener Kolloquium - Innovationen für die Produktion. Produktionskongress, 9. Oktober*

2008, Hrsg. M. Zäh, H. Hoffmann & G. Reinhart, Utz Herbert, München, S. 45–55. ISBN: 9783831608447.

(Salmi & David et al. 2016)

Salmi, A.; David, P.; Blanco, E. & Summers, J. D. (2016), „A review of cost estimation models for determining assembly automation level“, *Computers & Industrial Engineering*, 98, S. 246–259. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835216302029> [26.09.2019].

(Sauer 2016)

Sauer, A. (2016), *Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Scholl 1995)

Scholl, A. (1995), *Balancing and sequencing of assembly lines*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Institut für Operations Research.

(Statista 2019)

Statista (2019), *Average yearly wages in China from 2008 to 2017 (in yuan)*. <https://www.statista.com/statistics/743522/china-average-yearly-wages/> [01.05.2019].

(Toni & Tonchia 1998)

Toni, A. de & Tonchia, S. (1998), „Manufacturing flexibility: A literature review“, *International Journal of Production Research*, 36(6), S. 1587–1617.

(VDI 1990)

VDI (1990), *VDI 2860, Blatt 1: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen: Begriffe, Definitionen, Symbole.*, VDI-Verlag, Düsseldorf.

(Wang & Ma et al. 2017)

Wang, Y.; Ma, H.-S.; Yang, J.-H. & Wang, K.-S. (2017), „Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production“, *Advances in Manufacturing*, 5(4), S. 311–320.

(Warnecke 1991)

Warnecke, H.-J. (Hrsg.) (1991), *Produktionssicherung. Sichere Prozesse, zuverlässige Informationen, Qualifizierung, Zeit ; Tagungsband*, gfmt-Verl., München. ISBN: 9783894150266.

(wbk 2019)

wbk (2019), *Lernfabrik Globale Produktion*. <http://lernfabrik.global> [26.09.2019].

(Weyand 2010)

Weyand, L. (2010), *Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie*. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Lehrstuhl für Fertigungstechnik.

(Wiendahl & ElMaraghy et al. 2007)

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N. & Brieke, M. (2007), „Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation“, *CIRP Annals*, 56(2), S. 783–809.

(Wiendahl & Reichardt et al. 2014)

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J. & Nyhuis, P. (2014), *Handbuch Fabrikplanung*, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München. ISBN: 978-3-446-43892-7.

(Wiesbeck 2014)

Wiesbeck, M. (2014), *Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung*. Dissertation, Technische Universität München, München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb).

(Witte & Vielhaber 2003)

Witte, K.-W. & Vielhaber, W. (2003), *Flexible und wirtschaftliche Serienmontage. Wege zu zukunftsstabilen Montagesystemen*, Shaker Verlag, Aachen. ISBN: 3-8322-1957-9.

(Zangemeister 1970)

Zangemeister, C. (1970), *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit	4
Abbildung 2.1: Abgrenzung Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (Wiendahl & Reichardt et al. 2014)	6
Abbildung 2.2: Überblick der Elemente eines wandlungsfähigen Produktionssystems	7
Abbildung 2.3: Wandlungsbefähiger nach (Wiendahl & Reichardt et al. 2014)	9
Abbildung 2.4: Blöcke der Wandlungskosten	12
Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Werte-Iteration durch Rückwärtsinduktion	18
Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Politik-Iteration	19
Abbildung 4.1: Überblick der Planungsmethode	33
Abbildung 4.2: Prozess der Erstellung des Szenariomodells	35
Abbildung 4.3: Überblick der 6 Rezeptoren (in Anlehnung an (Cisek 2005))	35
Abbildung 4.4: Ausschnitt des Szenariomodells der Lernfabrik	38
Abbildung 4.5: Dreiecksfunktion	40
Abbildung 4.6: Prozess der Berechnung aggregierter Szenarien	41
Abbildung 4.7: Beispielhafter Steckbrief eines Wandlungstreibers der Lernfabrik	42
Abbildung 4.8: Aggregiertes Szenario der Rezeptor-Kennzahl <i>Geschmierte Zahnräder</i>	46
Abbildung 4.9: Aggregiertes Szenario der Rezeptor-Kennzahl Stückzahl	47
Abbildung 4.10: Betrachtungsebenen des modularen Montagesystems	48
Abbildung 4.11: Transport-, Prozess und Zuführmodul am Beispiel einer Pressstation	50
Abbildung 4.12: Betrachtungsebenen des modularen Montagesystems am Beispiel der Lernfabrik	51

Abbildung 4.13: Skalierungsmechanismen in Anlehnung an (Eilers 2015)	53
Abbildung 4.14: Prozess der Erstellung von Systemabschnittskonzepten	54
Abbildung 4.15: Ausschnitt aus der Stationslandkarte der Lernfabrik	57
Abbildung 4.16: Automatisierungsnutzen und -hemmnisse	58
Abbildung 4.17: Skala des Automatisierungsnutzens „Reduktion Zykluszeit“	59
Abbildung 4.18: Skala des Automatisierungsnutzens „Einsparung Mitarbeiter“	59
Abbildung 4.19: Skala des Automatisierungsnutzens „Erhöhung Qualität“	60
Abbildung 4.20: Skala des Automatisierungsnutzens „Ergonomie“	61
Abbildung 4.21: Skala des Automatisierungshemmnisses „Varianz“	62
Abbildung 4.22: Skala des Automatisierungshemmnisses „Handhabung der Einzelteile“	62
Abbildung 4.23: Skala des Automatisierungshemmnisses „Anpass- und Justiertätigkeiten“	63
Abbildung 4.24: Skala des Automatisierungshemmnisses „Fertigungsungenauigkeit“	63
Abbildung 4.25: Ausschnitt aus der vollständig ausgefüllten Stationslandkarte der Lernfabrik	64
Abbildung 4.26: Skizze des Stationskonzeptes für das Fügen des Getriebedeckels mit automatisierter Zuführung und manuellem Transport	66
Abbildung 4.27: Stationssteckbrief für Teilautomatisiertes Fügen des Getriebedeckels	67
Abbildung 4.28: Steckbrief für „Teilautomatisiertes Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel“	69
Abbildung 4.29: Schätzung der Engineeringkosten in Abhängigkeit der Komplexität der Automatisierungslösung	70
Abbildung 4.30: Aggregierte Darstellung von Auszügen der Wandlungskosten- und der Wandlungsdauermatrix der Lernfabrik	72

Abbildung 4.31: Umsetzung der Skalierungsmechanismen durch die Konfigurationsparameter der Montagesystemkonfigurationen	73
Abbildung 4.32: Beispielhafte Montagesystemkonfiguration der Lernfabrik	75
Abbildung 4.33: Prozess der Bildung von Montagesystemkonfigurationen	77
Abbildung 4.34: Algorithmus zur Erzeugung von Montagesystemkonfigurationen durch Anwendung der interstationären und organisatorischen Skalierungsmechanismen	79
Abbildung 4.35: Prozess der Modellierung als MDP	81
Abbildung 4.36: Stochastischer Zustandsraum der Lernfabrik	83
Abbildung 4.37: Algorithmus zur Berechnung der Skalierungsstrategie	89
Abbildung 4.38: Beispielhafte Empfehlung aus der Skalierungsstrategie der Lernfabrik	91
Abbildung 4.39: Prozess der Analyse der Skalierungsstrategie	92
Abbildung 4.40: Algorithmus für die Berechnung der erwarteten Wandlungen zwischen Montagesystemkonfigurationen	93
Abbildung 4.41: Wandlung von MSK 319 auf MSK 712	95
Abbildung 4.42: Auszug aus den Wandlungen auf Systemabschnittsebene der Lernfabrik	96
Abbildung 4.43: Prozess der Ableitung von Richtlinien	97
Abbildung 4.44: Morphologischer Kasten mit einer beispielhaften Ausprägung für die Lernfabrik	97
Abbildung 4.45: Abgeleitete Gestaltungsrichtlinien für den Systemabschnitt <i>Manuelles Fügen von Zahnrädern und Getriebedeckel</i>	101
Abbildung 5.1: Produktionsprozess der Hochdruckventile beim Anwendungspartner	103
Abbildung 5.2: Übersicht der definierten Wandlungstreiber	104
Abbildung 5.3: Verknüpfung Wandlungstreiber und Rezeptoren	106
Abbildung 5.4: Verknüpfung Wandlungstreiber und Rezeptor-Kennzahlen	108

Abbildung 5.5: Quantitative Auswirkungen der Wandlungstreiber auf die stetigen Rezeptor-Kennzahlen	109
Abbildung 5.6: Quantitative Auswirkungen der Wandlungstreiber auf die diskreten Rezeptor-Kennzahlen	109
Abbildung 5.7: Eintrittszeitpunkte und -wahrscheinlichkeiten der Wandlungstreiber	111
Abbildung 5.8: Aufteilung des Montagesystems in drei Subsysteme	111
Abbildung 5.9: Ergebnis der Monte Carlo Simulation für die kumulierte Stückzahl aus allen Ventil-Varianten nach 100 Iterationen	112
Abbildung 5.10: Auszug aus dem aggregierten Szenario der kumulierten Stückzahl	113
Abbildung 5.11: Ergebnis der Monte Carlo Simulation für die Fließrate nach 100 Iterationen	114
Abbildung 5.12: Aggregiertes Szenario der Fließrate, basierend auf 1.664.100 Iterationen der MC-Simulation	115
Abbildung 5.13: Montageaufgabenblöcke im Anwendungsfall	117
Abbildung 5.14: Initiale Stationslandkarte 1 von 2	118
Abbildung 5.15: Initiale Stationslandkarte 2 von 2	119
Abbildung 5.16: Prozesszeiten der initialen Montagestationen	119
Abbildung 5.17: Ergebnisse der Analyse der Automatisierungsnutzen und -hemmnisse	121
Abbildung 5.18: Explosionszeichnung des Ventils	123
Abbildung 5.19: Verteilung der Handhabungsoperationen	124
Abbildung 5.20: Steckbrief des Montagestationskonzeptes "Teilautomatisierte Schraubstation" (siehe auch Abbildung A.14)	124
Abbildung 5.21: Steckbrief des Systemabschnitts „Teilautomatisierte Montage“ (siehe auch Abbildung A.33)	125
Abbildung 5.22: Wandlungsmatrix für die Montageaufgaben 3 – 6 (siehe auch Abbildung A.41)	128

Abbildung 5.23: Auswahl eines Zustands der Skalierungsstrategie in SkaliA	129
Abbildung 5.24: Anzeige der Skalierungsentscheidung für einen gewählten Zustand der Skalierungsstrategie in SkaliA	130
Abbildung 5.25: Beispielhafter Verlauf der Rezeptor-Kennzahlen in Subsystem I und II	131
Abbildung 5.26: Beispielhafter Verlauf der Rezeptor-Kennzahlen in Subsystem III	131
Abbildung 5.27: Beispielhafter Skalierungspfad im Subsystem I (Sonstige), gemäß des beispielhaften Verlaufs der Rezeptor-Kennzahlen in Abbildung 5.25	132
Abbildung 5.28: Beispielhafter Skalierungspfad im Subsystem II (Automotive), gemäß des beispielhaften Verlaufs der Rezeptor-Kennzahlen in Abbildung 5.25	132
Abbildung 5.29: Beispielhafter Skalierungspfad im Subsystem III, gemäß des beispielhaften Verlaufs der Rezeptor-Kennzahlen in Abbildung 5.26	133
Abbildung 5.30: Wandlungsempfehlung für den Initialzustand beim Anwendungspartner	137
Abbildung 5.31: Wandlungen mit der höchsten Wandlungshäufigkeit im Anwendungsfall	138
Abbildung 5.32: Einordnung der Wandlung A in den morphologischen Kasten	140
Abbildung 5.33: Konstruktionsrichtlinien für Wandlung von „manuelle Vormontage“ auf „Teilautomatisierte Vormontage“ (A)	141
Abbildung 5.34: Einordnung der Wandlung G in den morphologischen Kasten	142
Abbildung 5.35: Konstruktionsrichtlinien für Wandlung G	143

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Stand der Technik	32
Tabelle 5.1: Montageaufgaben des Systemabschnitts „Teilautomatisierte Montage“ (siehe auch Tabelle A.11)	126

Anhang

A1. Ergebnisse der MC-Simulation der Rezeptor-Kennzahlen

Stückzahl sonstige (* 100.000 Stück)

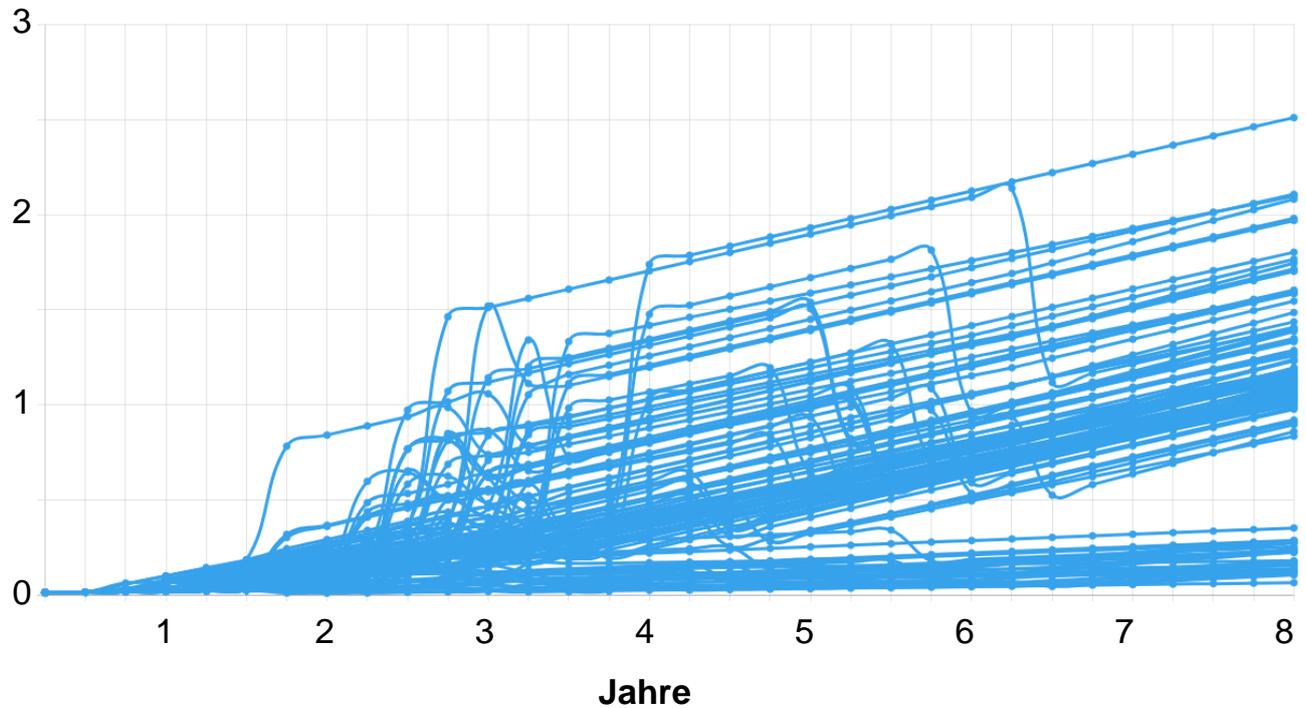


Abbildung A.1: Ergebnis der Monte Carlo Simulation für die Stückzahl sonstige nach 100 Iterationen

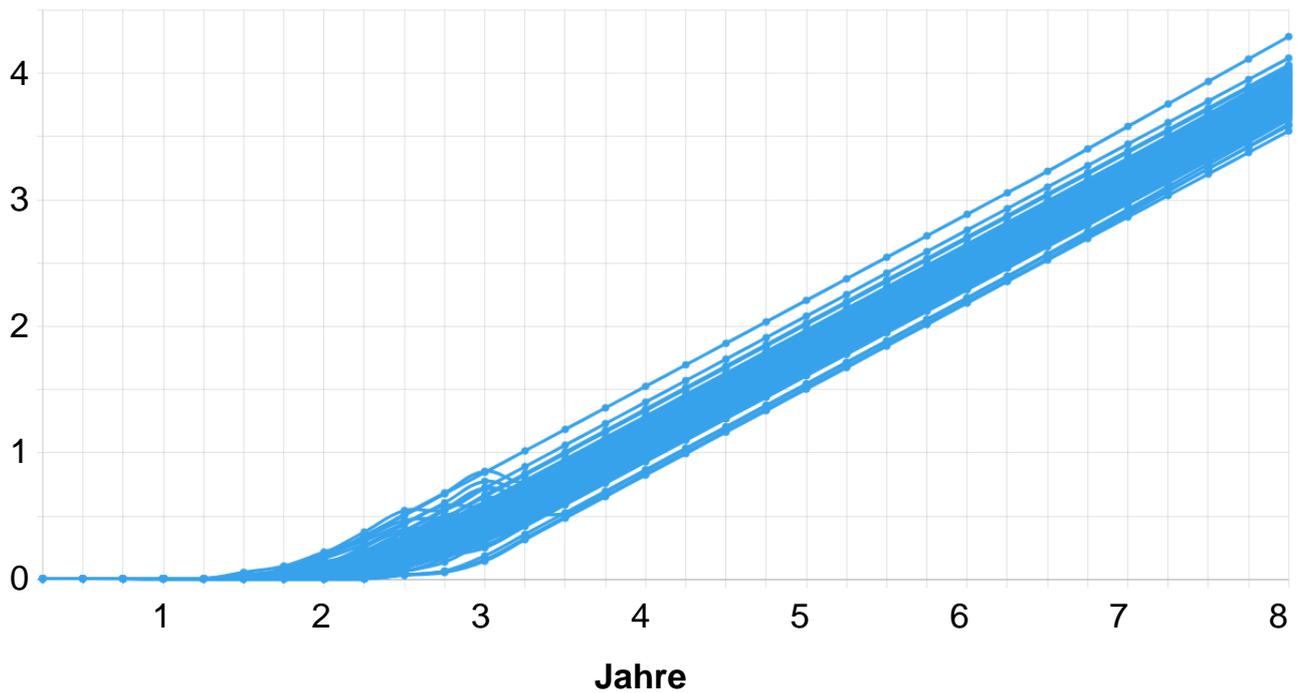
Stückzahl Automotive (* 100.000 Stück)

Abbildung A.2: Ergebnis der Monte Carlo Simulation für die Stückzahl Automotive nach 100 Iterationen

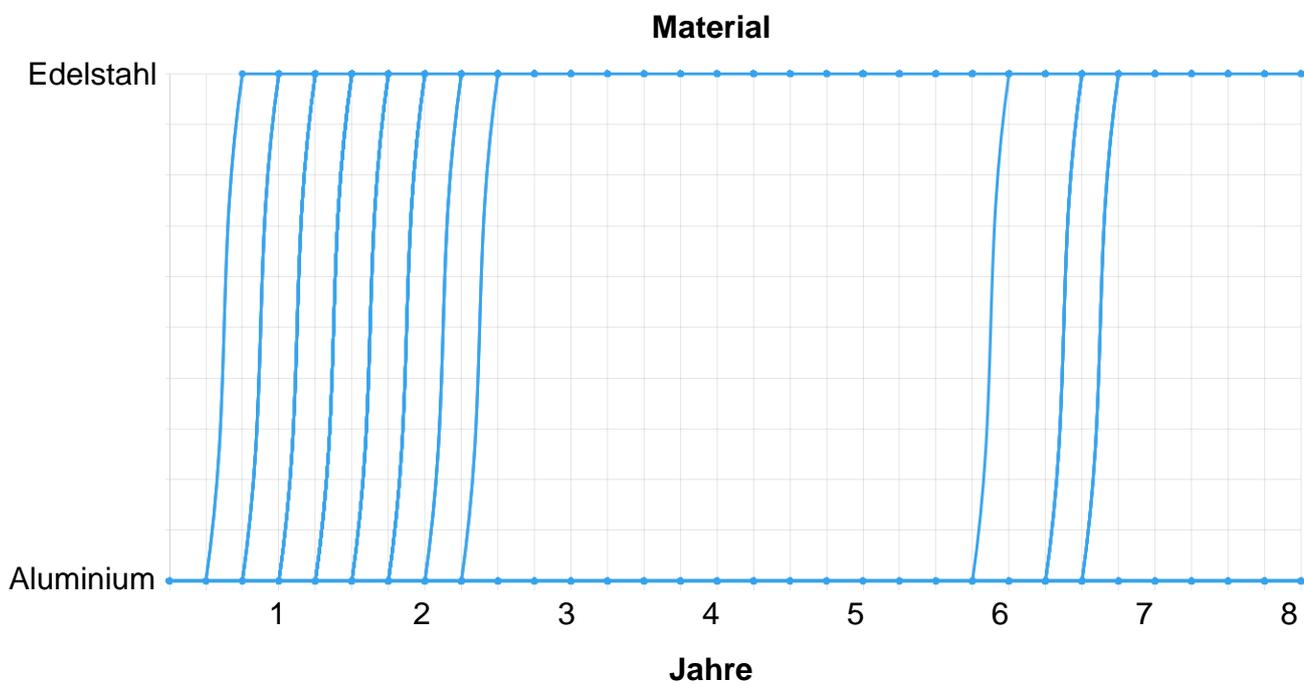


Abbildung A.3: Ergebnis der Monte Carlo Simulation für das Material nach 100 Iterationen

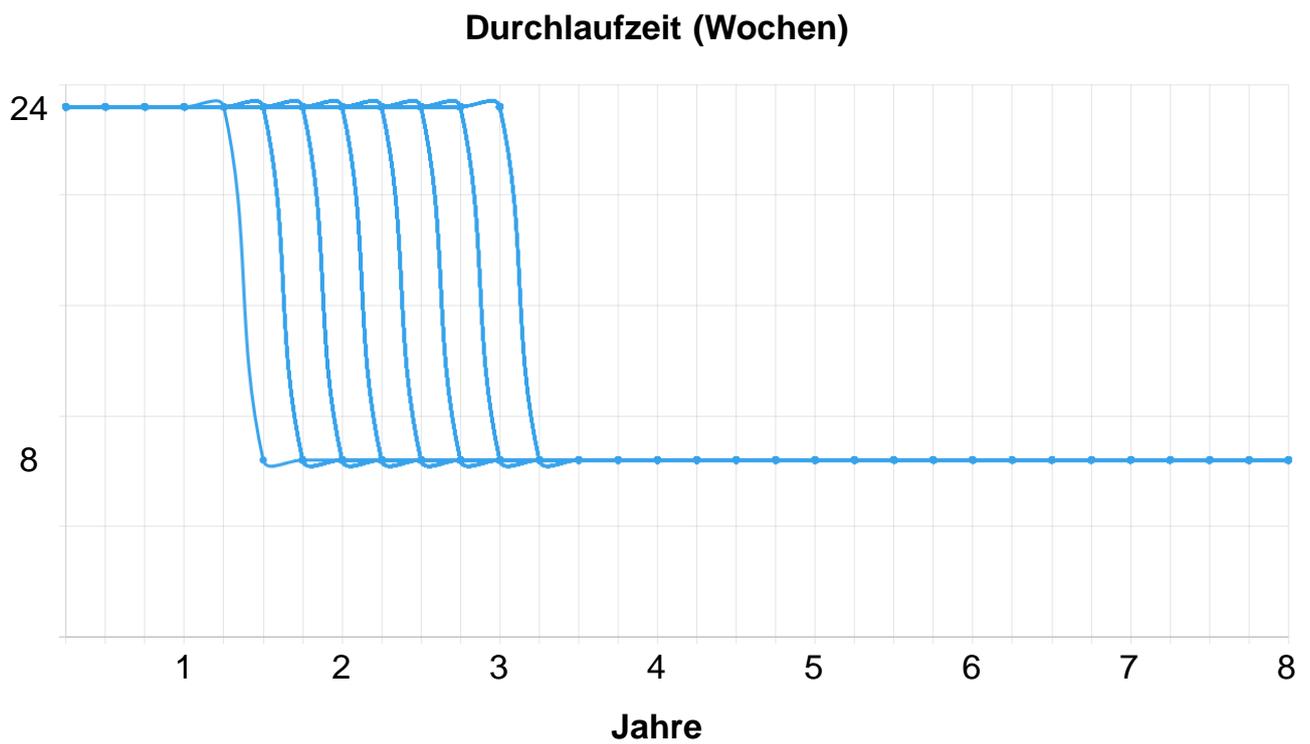


Abbildung A.4: Ergebnis der Monte Carlo Simulation für die Gesamtbearbeitungszeit nach 100 Iterationen

A2. Übersicht der Montageaufgaben

Tabelle A.1: Montageaufgaben im Anwendungsfall

ID	Montageaufgabe
01	Einlassstutzen: Einpressen erster Dichtungsring
02	Einlassstutzen: Einpressen zweiter und dritter Dichtungsring
03	Einlassstutzen: Einpressen des Innenrings
04	Einlassstutzen: Einlegen Haltering, Kolben und Feder
05	Einlassstutzen: Einschrauben des Deckels
06	Manuelles Auslassventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring auf mobilen Teil
07	Manuelles Auslassventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring auf fixierten Teil
08	Manuelles Auslassventil: Kolben in fixierten Teil einlegen und mit mobilem Teil verschrauben
09	Manuelles Auslassventil: Einpressen des Deckels
10	Magnetventil: Pin und Feder in den mobilen Kern einlegen
11	Magnetventil: Hülse in den mobilen Teil einpressen
12	Magnetventil: Deckel in mobilen Teil einlegen
13	Magnetventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring in fixierten Teil
14	Magnetventil: Gewinde in fixierten Teil einschrauben
15	Betankungsventil: Ober- und Unterseite mit Filter verschrauben
16	Betankungsventil: Kolben und Feder einsetzen
17	Betankungsventil: Deckel einschrauben
18	Druckregulator: Einpressen erster Dichtungsring
19	Druckregulator: Einpressen zweiter und dritter Dichtungsring
20	Temperatursensor: Ersten und zweiten Dichtungsring montieren
21	Thermisches Sicherheitsventil: Dichtungsring in Gehäuse einlegen
22	Thermisches Sicherheitsventil: Kolben in Gehäuse schrauben
23	Anbringen des Barcodes für internes Tracking
24	Einfetten des manuellen Ventils
25	Einschrauben des manuellen Ventils
26	Einfetten des Stöpsels
27	Einschrauben des Stöpsels
28	Einfetten des Einlassstutzens
29	Einschrauben des Einlassstutzens
30	Dichtungsring für das thermische Sicherheitsventil in den Ventilkörper einpressen
31	Einfetten des thermischen Sicherheitsventils

ID	Montageaufgabe
32	Einlegen der Feder in die Öffnung des thermischen Sicherheitsventils
33	Einschrauben des thermischen Sicherheitsventils
34	Dichtungsring für Montage des Magnetventils einlegen
35	Einfetten des Magnetventils
36	Einschrauben des Magnetventils
37	Einstecken des Kabels vom Temperatursensor
38	Einschrauben des Temperatursensors
39	Unterlegscheiben für die Befestigung des Temperatursensors auf das Kabel fädeln
40	Einfetten des Belüftungsventils
41	Einschrauben des Belüftungsventils
42	Einfetten des Druckregulators
43	Einschrauben des Druckregulators
44	Einfetten des Tankventils
45	Einschrauben des Tankventils
46	Dichtheitsprüfung
47	Fixierung des Temperatursensorkabels
48	Einlegen des Dichtungsringes über das Magnetventil
49	Einlegen der Umhausung des Magnetventils
50	Einlegen des Dichtungsringes in die Umhausung des Magnetventils
51	Verschrauben der Umhausung des Magnetventils
52	Dichtungsring auf Tankverbinder montieren
53	Thermisches Sicherheitsventil zu kleben
54	Schutzkappen aufschrauben
55	finale Sichtkontrolle
56	Aufkleben des Kunden-Barcodes
57	In Schutzfolie einschweißen

A3. Steckbriefe der Montagestationskonzepte

Name		Manuelle Vormontage	
	Montageaufgabenblöcke	- Pressen Vormontage (1) - Sonstiges Vormontage (2)	
	Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	Bearbeitungszeit	<i>08:00</i>	
	Taktzeit	<i>08:00</i>	
	Jährliche Fixkosten	<i>2.272 €</i>	
	Wandlungspotenzialwert	<i>0,9</i>	
	Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.5: Stationssteckbrief „Manuelle Vormontage“

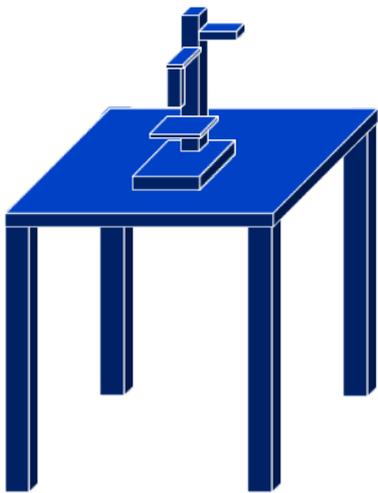
Name		Manuelle Pressstation in der Vormontage	
	Montageaufgabenblöcke	- Pressen Vormontage (1)	
	Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	Bearbeitungszeit	<i>02:30</i>	
	Taktzeit	<i>02:30</i>	
	Jährliche Fixkosten	<i>2.272 €</i>	
	Wandlungspotenzialwert	<i>0,9</i>	
	Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.6: Stationssteckbrief „Manuelle Pressstation in der Vormontage“

Name		Manuelle Fügestation Vormontage	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Fügen Vormontage (2)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit ▪ Taktzeit	05:10 05:10	
	▪ Jährliche Fixkosten	2.272 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,9	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.7: Stationssteckbrief „Manuelle Fügestation Vormontage“

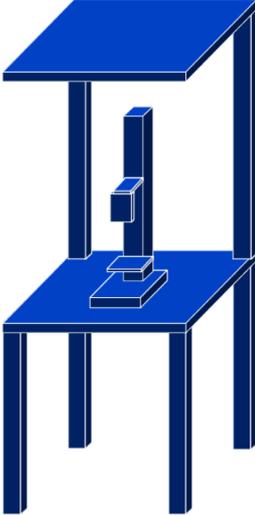
Name		Teilautomatisierte Pressstation in der Vormontage	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Pressen Vormontage (1)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; aut; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit ▪ Taktzeit	01:55 01:55	
	▪ Jährliche Fixkosten	4.487 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,28	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.8: Stationssteckbrief „Teilautomatisierte Pressstation in der Vormontage“

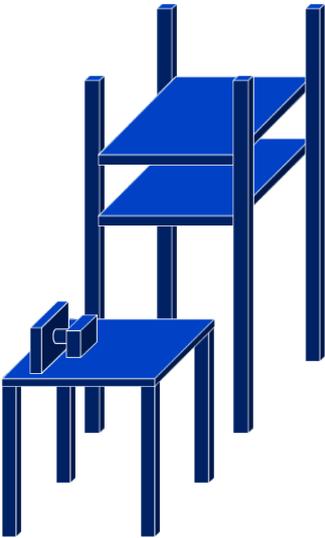
Name		Manuelle Modulmontage	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Schrauben Längsseite (3) - Fügen Längsseite (4) - Schrauben Stirnseite (5) - Fügen Stirnseite (6)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit ▪ Taktzeit	15:00 15:00	
	▪ Jährliche Fixkosten	2.272 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,9	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.9: Stationssteckbrief „Manuelle Modulmontage“

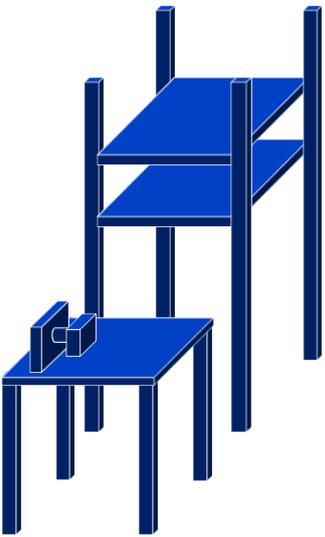
Name		Manuelle Modulmontage Längsseite	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Schrauben Längsseite (3) - Fügen Längsseite (4)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit ▪ Taktzeit	07:50 07:50	
	▪ Jährliche Fixkosten	2.272 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,9	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.10: Stationssteckbrief „Manuelle Modulmontage Längsseite“

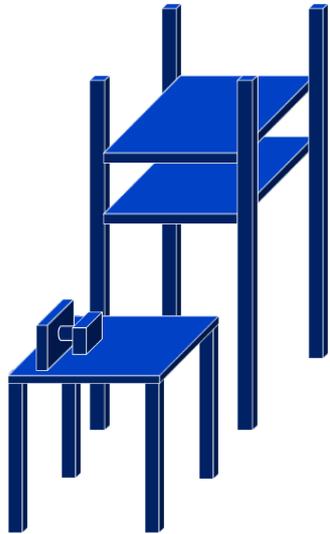
Name		Manuelle Modulmontage Stirnseite	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Schrauben Stirnseite (5) - Fügen Stirnseite (6)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit ▪ Taktzeit	07:10 07:10	
	▪ Jährliche Fixkosten	2.272 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,9	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.11: Stationssteckbrief „Manuelle Modulmontage Stirnseite“

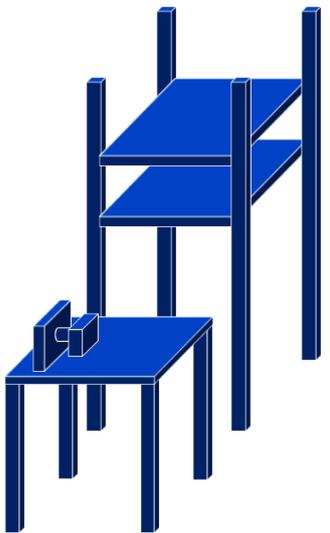
Name		Manuelle Fügestation Montage	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Fügen Längsseite (4) - Fügen Stirnseite (6)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit ▪ Taktzeit	08:10 08:10	
	▪ Jährliche Fixkosten	2.272 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,9	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.12: Stationssteckbrief „Manuelle Fügestation Montage“

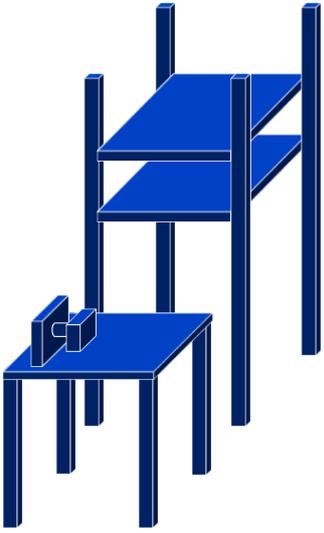
Name		Manuelle Schraubstation Montage	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Schrauben Längsseite (3) - Schrauben Stirnseite (5)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit ▪ Taktzeit	<i>06:50</i> <i>06:50</i>	
	▪ Jährliche Fixkosten	<i>2.272 €</i>	
	▪ Wandlungspotenzialwert	<i>0,9</i>	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.13: Stationssteckbrief „Manuelle Schraubstation Montage“

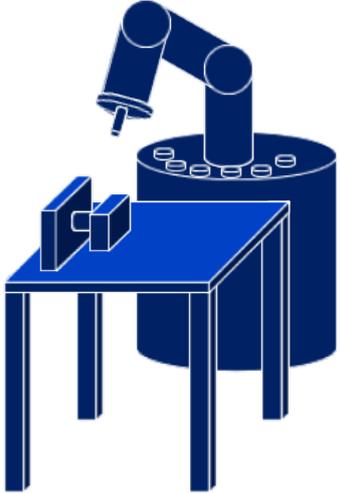
Name		Teilautomatisiertes Schrauben	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Schrauben Längsseite (3) - Schrauben Stirnseite (5)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; aut; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit ▪ Taktzeit	<i>07:15</i> <i>07:15</i>	
	▪ Jährliche Fixkosten	<i>8.950 €</i>	
	▪ Wandlungspotenzialwert	<i>0,7</i>	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.14: Stationssteckbrief „Teilautomatisiertes Schrauben“

Name		Manuelle Dichtheitsprüfung	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Dichtheitsprüfung/ EOL (7)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit	30:00	
	▪ Taktzeit	30:00	
	▪ Jährliche Fixkosten	8.750 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,3	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	



Abbildung A.15: Stationssteckbrief Manuelle Dichtheitsprüfung

Name		Automatisierte Dichtheitsprüfung	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Dichtheitsprüfung/ EOL (7)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; aut; aut</i>	
	▪ Bearbeitungszeit	20:00	
	▪ Taktzeit	20:00	
	▪ Jährliche Fixkosten	41.125 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0	
	▪ Restriktion	<i>Niedrige Fließrate</i>	

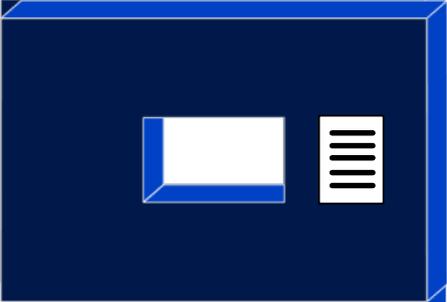


Abbildung A.16: Stationssteckbrief Automatisierte Dichtheitsprüfung

Name		Autom. Dichtheitsprüfung mit autom. Werkstückzuführung	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Dichtheitsprüfung/ EOL (7)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>aut; aut; aut</i>	
	▪ Bearbeitungszeit	20:00	
	▪ Taktzeit	20:00	
	▪ Jährliche Fixkosten	49.750 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,1	
	▪ Restriktion	<i>Niedrige Fließrate</i>	

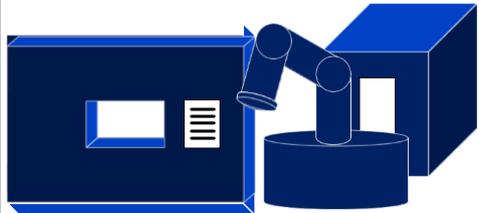


Abbildung A.17: Stationssteckbrief Automatisierte Dichtheitsprüfung mit automatisierter Werkstückzuführung

Name		Manuelle Endmontage	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Montage Magnetventilabdeckung (8) - Endmontage (9)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit	3:00	
	▪ Taktzeit	3:00	
	▪ Jährliche Fixkosten	2.272 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,9	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	



Abbildung A.18: Stationssteckbrief Manuelle Endmontage

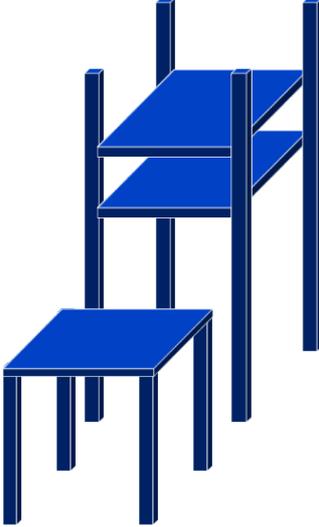
Name		Manuelle Verpackung	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Verpackung (10)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit	10:00	
	▪ Taktzeit	10:00	
	▪ Jährliche Fixkosten	625 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,9	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.19: Stationssteckbrief Manuelle Verpackung

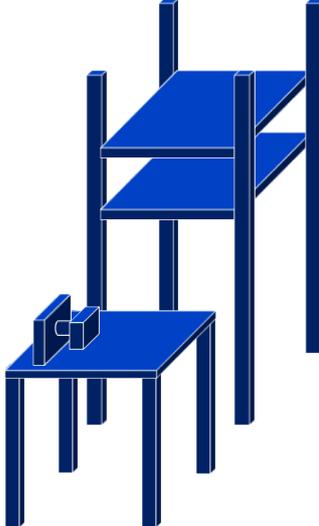
Name		Erweiterte manuelle Endmontage	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Abdeck. Magnetventil (8) - Endmontage (9) - Verpackung (10)	
	▪ Automatisierungsgrad	<i>man; man; man</i>	
	▪ Bearbeitungszeit	13:00	
	▪ Taktzeit	13:00	
	▪ Jährliche Fixkosten	2.272 €	
	▪ Wandlungspotenzialwert	0,9	
	▪ Restriktion	<i>keine</i>	

Abbildung A.20: Stationssteckbrief Erweiterte manuelle Endmontage

A4. Zusammenfassung Montagestationskonzepte

Montagestationskonzepte	Systemabschnittskonzepte
Manuelle Vormontage <ul style="list-style-type: none"> • Pressen Vormontage (1) • Sonstiges Vormontage (2) 08:00 min  (08:00 min Σ)	Manuelle Vormontage <ul style="list-style-type: none"> • Pressen Vormontage (1) • Sonstiges Vormontage (2) 08:00 min  (08:00 min Σ)
Manuelle Presse Vormontage <ul style="list-style-type: none"> • Pressen Vormontage (1) 02:30 min  (02:30 min Σ)	Manuelle Presse Vormontage <ul style="list-style-type: none"> • Pressen Vormontage (1) 02:30 min  (02:30 min Σ)
Manuelle Fügestation Vormontage <ul style="list-style-type: none"> • Sonstiges Vormontage (2) 05:10 min  (05:10 min Σ)	Manuelle Fügestation Vormontage <ul style="list-style-type: none"> • Sonstiges Vormontage (2) 05:10 min  (05:10 min Σ)
Teilautomat. Presse Vormontage <ul style="list-style-type: none"> • Pressen Vormontage (1) 01:08 min  (01:55 min Σ)	Teilautomatisierte Vormontage <ul style="list-style-type: none"> • Pressen Vormontage (1) • Sonstiges Vormontage (2) 06:18 min  (06:18 min Σ)
Manuelle Fügestation Vormontage <ul style="list-style-type: none"> • Sonstiges Vormontage (2) 05:10 min  (05:10 min Σ)	
Manuelle Modulmontage <ul style="list-style-type: none"> • Schrauben Längsseite (3) • Fügen Längsseite (4) • Schrauben Stirnseite (5) • Fügen Stirnseite (6) 15:00 min  (15:00 min Σ)	Manuelle Modulmontage <ul style="list-style-type: none"> • Schrauben Längsseite (3) • Fügen Längsseite (4) • Schrauben Stirnseite (5) • Fügen Stirnseite (6) 15:00 min  (15:00 min Σ)
Manuelle Modulmontage Längsseite <ul style="list-style-type: none"> • Schrauben Längsseite (3) • Fügen Längsseite (4) 07:50 min  (07:50 min Σ)	Manuelle Modulmontage Längsseite <ul style="list-style-type: none"> • Schrauben Längsseite (3) • Fügen Längsseite (4) 07:50 min  (07:50 min Σ)

Abbildung A.21: Zusammenfassung der Montagestationskonzepte zu Systemabschnittskonzepten (1 von 3)

Montagestationskonzepte	Systemabschnittskonzepte
Manuelle Modulmontage Stirnseite <ul style="list-style-type: none"> Schrauben Längsseite (3) Fügen Längsseite (4) 07:10 min  (07:10 min Σ)	Manuelle Modulmontage Stirnseite <ul style="list-style-type: none"> Schrauben Längsseite (3) Fügen Längsseite (4) 07:10 min  (07:10 min Σ)
Manuelle Fügestation Montage <ul style="list-style-type: none"> Fügen Längsseite (4) Fügen Stirnseite (6) 08:10 min  (08:10 min Σ)	Manuelle Fügestation Montage <ul style="list-style-type: none"> Fügen Längsseite (4) Fügen Stirnseite (6) 08:10 min  (08:10 min Σ)
Manuelle Schraubstation Montage <ul style="list-style-type: none"> Schrauben Längsseite (3) Schrauben Stirnseite (5) 06:50 min  (06:50 min Σ)	Manuelle Schraubstation Montage <ul style="list-style-type: none"> Schrauben Längsseite (3) Schrauben Stirnseite (5) 06:50 min  (06:50 min Σ)
Teilautomatisiertes Schrauben <ul style="list-style-type: none"> Schrauben Längsseite (3) Schrauben Stirnseite (5) 00:15 min  (07:15 min Σ)	Manuelle Schraubstation Montage <ul style="list-style-type: none"> Schrauben Längsseite (3) Fügen Längsseite (4) Schrauben Stirnseite (5) Fügen Stirnseite (6) 08:25 min  (08:25 min Σ)
Manuelle Fügestation Montage <ul style="list-style-type: none"> Fügen Längsseite (4) Fügen Stirnseite (6) 08:10 min  (08:10 min Σ)	Manuelle Dichtheitsprüfung <ul style="list-style-type: none"> Dichtheitsprüfung/ EOL (7) 30:00 min  (30:00 min Σ)
Manuelle Dichtheitsprüfung <ul style="list-style-type: none"> Dichtheitsprüfung/ EOL (7) 30:00 min  (30:00 min Σ)	Manuelle Dichtheitsprüfung <ul style="list-style-type: none"> Dichtheitsprüfung/ EOL (7) 30:00 min  (30:00 min Σ)
Aut. EOL mit aut. Zuführung <ul style="list-style-type: none"> Dichtheitsprüfung/ EOL (7) 00:00 min  (20:00 min Σ)	Aut. EOL mit aut. Zuführung <ul style="list-style-type: none"> Dichtheitsprüfung/ EOL (7) 00:00 min  (20:00 min Σ)

Abbildung A.22: Zusammenfassung der Montagestationskonzepte zu Systemabschnittskonzepten (2 von 3)

Montagestationskonzepte	Systemabschnittskonzepte
Manuelle Endmontage <ul style="list-style-type: none"> Abdeckung des Magnetventils (8) Endmontage (9) 03:00 min  (03:00 min Σ)	Manuelle Endmontage <ul style="list-style-type: none"> Schrauben Längsseite (3) Fügen Längsseite (4) 03:00 min  (03:00 min Σ)
Manuelle Verpackung <ul style="list-style-type: none"> Verpackung (10) 10:00 min  (10:00 min Σ)	Manuelle Verpackung <ul style="list-style-type: none"> Verpackung (10) 10:00 min  (10:00 min Σ)
Erweiterte Endmontage <ul style="list-style-type: none"> Abdeckung des Magnetventils (8) Endmontage (9) Verpackung (10) 13:00 min  (13:00 min Σ)	Erweiterte Endmontage <ul style="list-style-type: none"> Abdeckung des Magnetventils (8) Endmontage (9) Verpackung (10) 13:00 min  (13:00 min Σ)
Teilautomatisierter EOL <ul style="list-style-type: none"> Dichtheitsprüfung/ EOL (7) 03:00 min  (20:00 min Σ)	Teilautom. EOL und Endmontage <ul style="list-style-type: none"> Dichtheitsprüfung/ EOL (7) Abdeckung des Magnetventils (8) Endmontage (9) Verpackung (10) 16:00 min  (20:00 min Σ)
Erweiterte Endmontage <ul style="list-style-type: none"> Abdeckung des Magnetventils (8) Endmontage (9) Verpackung (10) 13:00 min  (13:00 min Σ)	

Abbildung A.23: Zusammenfassung der Montagestationskonzepte zu Systemabschnittskonzepten (3 von 3)

A5. Steckbriefe der Systemabschnitte

Name		<i>Manuelle Vormontage</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 	<ul style="list-style-type: none"> - Pressaufgaben in der Vormontage (1) - Sonstige Fügeaufgaben in der Vormontage (2) 	
	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 	0 %	
	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit Taktzeit Wartezeit 	08:00 08:00 keine	
	<ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten Abbaukosten Jährliche Fixkosten 	500 € 500 € 2.272 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 	keine	

Abbildung A.24: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Vormontage“

Tabelle A.2: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Vormontage“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
1	Einlassstutzen: Einlegen erster Dichtungsring	00:08
1	Einlassstutzen: Einpressen erster Dichtungsring	00:04
1	Einlassstutzen: Einlegen zweiter und dritter Dichtungsring	00:12
1	Einlassstutzen: Einpressen zweiter und dritter Dichtungsring	00:06
1	Einlassstutzen: Einlegen des Innenrings	00:08
1	Einlassstutzen: Einpressen des Innenrings	00:04
2	Einlassstutzen: Einlegen Haltering, Kolben und Feder	00:36
2	Einlassstutzen: Einschrauben des Deckels	00:16
1	Manuelles Auslassventil: Einlegen erster und zweiter Dichtungsring auf mobilen Teil	00:12
1	Manuelles Auslassventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring auf mobilen Teil	00:06
1	Manuelles Auslassventil: Einlegen erster und zweiter Dichtungsring auf fixierten Teil	00:12
1	Manuelles Auslassventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring auf fixierten Teil	00:06
2	Manuelles Auslassventil: Kolben in fixierten Teil einlegen und mit mobilem Teil verschrauben	00:44
1	Manuelles Auslassventil: Einlegen des Deckels	00:08
1	Manuelles Auslassventil: Einpressen des Deckels	00:04
2	Magnetventil: Pin und Feder in den mobilen Kern einlegen	00:34
1	Magnetventil: Hülse in den mobilen Teil einlegen	00:08
1	Magnetventil: Hülse in den mobilen Teil einpressen	00:04
2	Magnetventil: Deckel in mobilen Teil einlegen	00:15
1	Magnetventil: Einlegen erster und zweiter Dichtungsring in fixierten Teil	00:12
1	Magnetventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring in fixierten Teil	00:06
2	Magnetventil: Gewinde in fixierten Teil einschrauben	00:25
2	Betankungsventil: Ober- und Unterseite mit Filter verschrauben	00:24
2	Betankungsventil: Kolben und Feder einsetzen	00:34
2	Betankungsventil: Deckel einschrauben	00:26
1	Druckregulator: Einlegen erster Dichtungsring	00:08
1	Druckregulator: Einpressen erster Dichtungsring	00:04
1	Druckregulator: Einlegen zweiter und dritter Dichtungsring	00:12
1	Druckregulator: Einpressen zweiter und dritter Dichtungsring	00:06
2	Temperatursensor: Ersten und zweiten Dichtungsring montieren	00:36
2	Thermisches Sicherheitsventil: Dichtungsring in Gehäuse einlegen	00:15
2	Thermisches Sicherheitsventil: Kolben in Gehäuse schrauben	00:25
	Summe	08:00

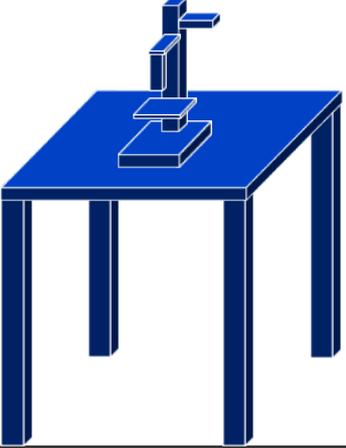
Name		Manuelle Pressstation in der Vormontage	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Pressaufgaben in der Vormontage (1)	
	▪ Automatisierungsgrad	0 %	
	▪ Bearbeitungszeit	02:30	
	▪ Taktzeit	02:30	
	▪ Wartezeit	keine	
	▪ Aufbaukosten	500 €	
	▪ Abbaukosten	500 €	
	▪ Jährliche Fixkosten	2.272 €	
	▪ Restriktionen	keine	

Abbildung A.25: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Pressstation in der Vormontage“

Tabelle A.3: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Pressstation in der Vormontage“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
1	Einlassstutzen: Einlegen erster Dichtungsring	00:08
1	Einlassstutzen: Einpressen erster Dichtungsring	00:04
1	Einlassstutzen: Einlegen zweiter und dritter Dichtungsring	00:12
1	Einlassstutzen: Einpressen zweiter und dritter Dichtungsring	00:06
1	Einlassstutzen: Einlegen des Innenrings	00:08
1	Einlassstutzen: Einpressen des Innenrings	00:04
1	Manuelles Auslassventil: Einlegen erster und zweiter Dichtungsring auf mobilen Teil	00:12
1	Manuelles Auslassventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring auf mobilen Teil	00:06
1	Manuelles Auslassventil: Einlegen erster und zweiter Dichtungsring auf fixierten Teil	00:12
1	Manuelles Auslassventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring auf fixierten Teil	00:06
1	Manuelles Auslassventil: Einlegen des Deckels	00:08
1	Manuelles Auslassventil: Einpressen des Deckels	00:04
1	Magnetventil: Hülse in den mobilen Teil einlegen	00:08
1	Magnetventil: Hülse in den mobilen Teil einpressen	00:04
1	Magnetventil: Einlegen erster und zweiter Dichtungsring in fixierten Teil	00:12
1	Magnetventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring in fixierten Teil	00:06
1	Druckregulator: Einlegen erster Dichtungsring	00:08
1	Druckregulator: Einpressen erster Dichtungsring	00:04
1	Druckregulator: Einlegen zweiter und dritter Dichtungsring	00:12
1	Druckregulator: Einpressen zweiter und dritter Dichtungsring	00:06
	Summe	02:30

Name		Manuelle Fügestation Vormontage	
	<ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 	- Sonstige Fügeaufgaben in der Vormontage (2)	
	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 	0 %	
	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit 	06:00	
	<ul style="list-style-type: none"> Taktzeit 	06:00	
	<ul style="list-style-type: none"> Wartezeit 	keine	
	<ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten 	500 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Abbaukosten 	500 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Jährliche Fixkosten 	2.272 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 	keine	

Abbildung A.26: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Fügestation Vormontage“

Tabelle A.4: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Fügestation Vormontage“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
2	Einlassstutzen: Einlegen Haltering, Kolben und Feder	00:40
2	Einlassstutzen: Einschrauben des Deckels	00:16
2	Manuelles Auslassventil: Kolben in fixierten Teil einlegen und mit mobilem Teil verschrauben	00:44
2	Magnetventil: Pin und Feder in den mobilen Kern einlegen	00:34
2	Magnetventil: Deckel in mobilen Teil einlegen	00:20
2	Magnetventil: Gewinde in fixierten Teil einschrauben	00:25
2	Betankungsventil: Ober- und Unterseite mit Filter verschrauben	00:24
2	Betankungsventil: Kolben und Feder einsetzen	00:40
2	Betankungsventil: Deckel einschrauben	00:26
2	Temperatursensor: Ersten und zweiten Dichtungsring montieren	00:36
2	Thermisches Sicherheitsventil: Dichtungsring in Gehäuse einlegen	00:25
2	Thermisches Sicherheitsventil: Kolben in Gehäuse schrauben	00:30
Summe		06:00

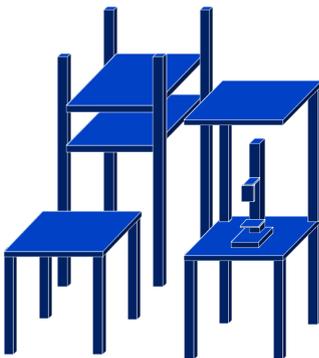
Name		<i>Teilautomatisierte Vormontage</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 	<ul style="list-style-type: none"> - Pressaufgaben in der Vormontage (1) - Sonstige Fügeaufgaben in der Vormontage (2) 	
	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 	20 %	
	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit 	6:18	
	<ul style="list-style-type: none"> Taktzeit 	6:18	
	<ul style="list-style-type: none"> Wartezeit 	3 Monate	
	<ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten 	3.500 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Abbaukosten 	1.000 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Jährliche Fixkosten 	6.760 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 	keine	

Abbildung A.27: Steckbrief Systemabschnitt „Teilautomatisierte Vormontage“

Tabelle A.5: Montageaufgaben Systemabschnitt „Teilautomatisierte Vormontage“

Werker			Presse		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)	Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
1	Einlassstutzen: Einlegen erster Dichtungsring	00:04		Warten	00:04
1	Einlassstutzen: Einlegen zweiter und dritter Dichtungsring	00:12	1	Einlassstutzen: Einpressen erster Dichtungsring	00:04
				Warten	00:08
1	Einlassstutzen: Einlegen des Innenrings	00:04	1	Einlassstutzen: Einpressen zweiter und dritter Dichtungsring	00:03
				Warten	00:01
2	Einlassstutzen: Einlegen Haltering, Kolben und Feder	00:36	1	Einlassstutzen: Einpressen des Innenrings	00:04
2	Einlassstutzen: Einschrauben des Deckels	00:16		Warten	00:56
1	Manuelles Auslassventil: Einlegen erster und zweiter Dichtungsring auf fixierten Teil	00:08			
1	Manuelles Auslassventil: Einlegen erster und zweiter Dichtungsring auf mobilen Teil	00:08	1	Manuelles Auslassventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring auf fixierten Teil	00:06
				Warten	00:02
2	Manuelles Auslassventil: Kolben in fixierten Teil einlegen und mit mobilem Teil verschrauben	00:44	1	Manuelles Auslassventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring auf mobilen Teil	00:06
1	Manuelles Auslassventil: Einlegen des Deckels	00:04		Warten	00:42
2	Magnetventil: Pin und Feder in den mobilen Kern einlegen	00:24	1	Manuelles Auslassventil: Einpressen des Deckels	00:04
1	Magnetventil: Hülse in den mobilen Teil einlegen	00:06		Warten	00:36
1	Magnetventil: Einlegen erster und zweiter Dichtungsring in fixierten Teil	00:08	1	Magnetventil: Hülse in den mobilen Teil einpressen	00:04
				Warten	00:04
2	Magnetventil: Deckel in mobilen Teil einlegen	00:15	1	Magnetventil: Einpressen erster und zweiter Dichtungsring in fixierten Teil	00:06
2	Magnetventil: Gewinde in fixierten Teil einschrauben	00:25		Warten	02:04
2	Betankungsventil: Ober- und Unterseite mit Filter verschrauben	00:24			
2	Betankungsventil: Kolben und Feder einsetzen	00:34			
2	Betankungsventil: Deckel einschrauben	00:26			
1	Druckregulator: Einlegen erster Dichtungsring	00:06			
1	Druckregulator: Einlegen zweiter und dritter Dichtungsring	00:08	1	Druckregulator: Einpressen erster Dichtungsring	00:04
				Warten	00:04
2	Temperatursensor: Ersten und zweiten Dichtungsring montieren	00:26	1	Druckregulator: Einpressen zweiter und dritter Dichtungsring	00:06
2	Thermisches Sicherheitsventil: Dichtungsring in Gehäuse einlegen	00:15			
2	Thermisches Sicherheitsventil: Kolben in Gehäuse schrauben	00:25			
	Summe	06:18		Summe	05:28

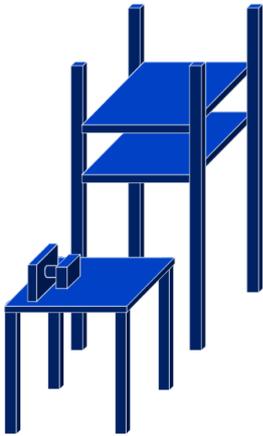
Name		Manuelle Modulmontage	
	<ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 	<ul style="list-style-type: none"> - Schraubaufgaben in der Montage auf der Längsseite (3) - Fügeaufgaben in der Montage auf der Längsseite (4) - Schraubaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (5) - Fügeaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (6) 	
	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 	0 %	
	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit Taktzeit Wartezeit 	15:00 15:00 keine	
	<ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten Abbaukosten Jährliche Fixkosten 	500 € 500 € 2.272 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 	keine	

Abbildung A.28: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Modulmontage“

Tabelle A.6: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Modulmontage“

Werker		
Montage- aufgaben- block	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
4	Anbringen des Barcodes für internes Tracking	00:08
4	Einfetten des manuellen Ventils	00:24
3	Einschrauben des manuellen Ventils	00:30
4	Einfetten des Stöpsels	00:24
3	Einschrauben des Stöpsels	00:30
4	Einfetten des Einlassstutzens	00:24
3	Einschrauben des Einlassstutzens	00:30
6	Dichtungsring für das thermische Sicherheitsventil in den Ventilkörper einpressen	01:21
6	Einfetten des thermischen Sicherheitsventils	00:34
6	Einlegen der Feder in die Öffnung des thermischen Sicherheitsventils	00:42
5	Einschrauben des thermischen Sicherheitsventils	00:30
4	Dichtungsring für Montage des Magnetventils einlegen	00:12
4	Einfetten des Magnetventils	00:24
3	Einschrauben des Magnetventils	01:21
4	Einstecken des Kabels vom Temperatursensor	01:07
3	Einschrauben des Temperatursensors	01:08
4	Unterlegscheiben für die Befestigung des Temperatursensors auf das Kabel fädeln	00:48
6	Einfetten des Belüftungsventils	00:34
5	Einschrauben des Belüftungsventils	00:30
6	Einfetten des Druckregulators	00:34
5	Einschrauben des Druckregulators	00:58
6	Einfetten des Tankventils	00:34
5	Einschrauben des Tankventils	00:53
	Summe	15:00

Name		Manuelle Modulmontage Längsseite	
	Montageaufgabenblöcke	<ul style="list-style-type: none"> - Schraubaufgaben in der Montage auf der Längsseite (3) - Fügeaufgaben in der Montage auf der Längsseite (4) 	
	Automatisierungsgrad	0 %	
	Bearbeitungszeit	07:50	
	Taktzeit	07:50	
	Wartezeit	keine	
	Aufbaukosten	500 €	
	Abbaukosten	500 €	
	Jährliche Fixkosten	2.272 €	
	Restriktionen	keine	

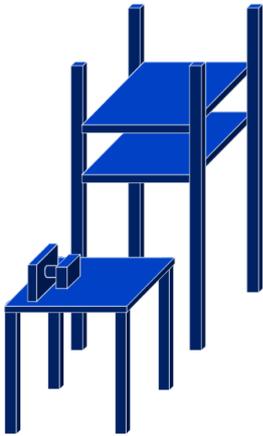


Abbildung A.29: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Modulmontage Längsseite“

Tabelle A.7: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Modulmontage Längsseite“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
4	Anbringen des Barcodes für internes Tracking	00:08
4	Einfetten des manuellen Ventils	00:24
4	Einfetten des Stöpsels	00:24
4	Einfetten des Einlassstutzens	00:24
4	Dichtungsring für Montage des Magnetventils einlegen	00:12
4	Einfetten des Magnetventils	00:24
4	Einstecken des Kabels vom Temperatursensor	01:07
4	Unterlegscheiben für die Befestigung des Temperatursensors auf das Kabel fädeln	00:48
3	Einschrauben des manuellen Ventils	00:30
3	Einschrauben des Stöpsels	00:30
3	Einschrauben des Einlassstutzens	00:30
3	Einschrauben des Magnetventils	01:21
3	Einschrauben des Temperatursensors	01:08
	Summe	07:50

Name		Manuelle Modulmontage Stirnseite	
	<ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 	<ul style="list-style-type: none"> Schraubaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (5) Fügebauaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (6) 	
	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 	0 %	
	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit 	07:10	
	<ul style="list-style-type: none"> Taktzeit 	07:10	
	<ul style="list-style-type: none"> Wartezeit 	keine	
	<ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten 	500 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Abbaukosten 	500 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Jährliche Fixkosten 	2.272 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 	keine	

Abbildung A.30: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Modulmontage Stirnseite“

Tabelle A.8: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Modulmontage Stirnseite“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
6	Dichtungsring für das thermische Sicherheitsventil in den Ventilkörper einpressen	01:21
6	Einfetten des thermischen Sicherheitsventils	00:34
6	Einlegen der Feder in die Öffnung des thermischen Sicherheitsventils	00:42
6	Einfetten des Belüftungsventils	00:34
6	Einfetten des Druckregulators	00:34
6	Einfetten des Tankventils	00:34
5	Einschrauben des thermischen Sicherheitsventils	00:30
5	Einschrauben des Belüftungsventils	00:30
5	Einschrauben des Druckregulators	00:58
5	Einschrauben des Tankventils	00:53
Summe		07:10

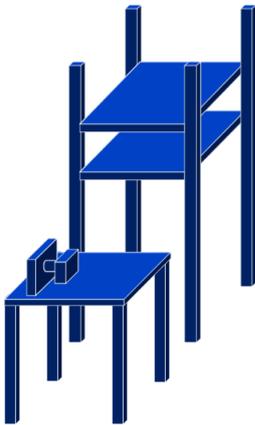
Name	Manuelle Fügestation Montage			
 Montageaufgabenblöcke	<ul style="list-style-type: none"> - Fügeaufgaben in der Montage auf der Längsseite (4) - Fügeaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (6) 			
 Automatisierungsgrad	0 %			
 Bearbeitungszeit	08:10			
	Taktzeit			08:10
	Wartezeit			keine
 Aufbaukosten	500 €			
	Abbaukosten		500 €	
	Jährliche Fixkosten		2.272 €	
 Restriktionen	keine			

Abbildung A.31: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Fügestation Montage“

Tabelle A.9: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Fügestation Montage“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
6	Dichtungsring für das thermische Sicherheitsventil in den Ventilkörper einpressen	01:21
6	Einfetten des thermischen Sicherheitsventils	00:34
6	Einlegen der Feder in die Öffnung des thermischen Sicherheitsventils	00:42
6	Einfetten des Belüftungsventils	00:34
6	Einfetten des Druckregulators	00:34
6	Einfetten des Tankventils	00:34
4	Anbringen des Barcodes für internes Tracking	00:08
4	Einfetten des manuellen Ventils	00:24
4	Einfetten des Stöpsels	00:24
4	Einfetten des Einlassstutzens	00:24
4	Dichtungsring für Montage des Magnetventils einlegen	00:12
4	Einfetten des Magnetventils	00:24
4	Einstecken des Kabels vom Temperatursensor	01:07
4	Unterlegscheiben für die Befestigung des Temperatursensors auf das Kabel fädeln	00:48
	Summe	08:10

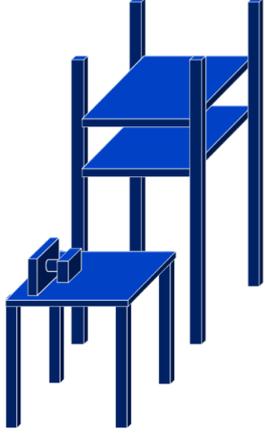
Name		Manuelle Schraubstation Montage	
	<ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 	<ul style="list-style-type: none"> Schraubaufgaben in der Montage auf der Längsseite (3) Schraubaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (5) 	
	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 	0 %	
	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit 	06:50	
	<ul style="list-style-type: none"> Taktzeit 	06:50	
	<ul style="list-style-type: none"> Wartezeit 	keine	
	<ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten 	500 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Abbaukosten 	500 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Jährliche Fixkosten 	2.272 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 	keine	

Abbildung A.32: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Schraubstation Montage“

Tabelle A.10: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Schraubstation Montage“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
5	Einschrauben des thermischen Sicherheitsventils	00:30
5	Einschrauben des Belüftungsventils	00:30
5	Einschrauben des Druckregulators	00:58
5	Einschrauben des Tankventils	00:53
3	Einschrauben des manuellen Ventils	00:30
3	Einschrauben des Stöpsels	00:30
3	Einschrauben des Einlassstutzens	00:30
3	Einschrauben des Magnetventils	01:21
3	Einschrauben des Temperatursensors	01:08
Summe		06:50

Name		<i>Teilautomatisierte Montage</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 	<ul style="list-style-type: none"> - Schraubaufgaben in der Montage auf der Längsseite (3) - Fügeaufgaben in der Montage auf der Längsseite (4) - Schraubaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (5) - Fügeaufgaben in der Montage auf der Stirnseite (6) 	
	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 	20 %	
	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit Taktzeit Wartezeit 	15:40 8:25 3 Monate	
	<ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten Abbaukosten Jährliche Fixkosten 	32.900 € 1.500 € 11.222 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 	keine	

Abbildung A.33: Steckbrief Systemabschnitt „Teilautomatisierte Montage“

Tabelle A.11: Montageaufgaben Systemabschnitt „Teilautomatisierte Montage“

Werker			Roboter		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)	Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
6	Dichtungsring für das thermische Sicherheitsventil in den Ventilkörper einpressen	01:21	5	Einschrauben des thermischen Sicherheitsventils	00:33
6	Einfetten des thermischen Sicherheitsventils	00:34	5	Einschrauben des Belüftungsventils	00:33
6	Einlegen der Feder in die Öffnung des thermischen Sicherheitsventils	00:42	5	Einschrauben des Druckregulators	01:01
6	Einfetten des Belüftungsventils	00:34	5	Einschrauben des Tankventils	00:50
6	Einfetten des Druckregulators	00:34	3	Einschrauben des manuellen Ventils	00:33
6	Einfetten des Tankventils	00:34	3	Einschrauben des Stöpsels	00:33
4	Anbringen des Barcodes für internes Tracking	00:08	3	Einschrauben des Einlassstutzens	00:33
4	Einfetten des manuellen Ventils	00:24	3	Einschrauben des Magnetventils	01:19
4	Einfetten des Stöpsels	00:24	3	Einschrauben des Temperatursensors	01:05
4	Einfetten des Einlassstutzens	00:24		Summe	07:00
4	Dichtungsring für Montage des Magnetventils einlegen	00:12			
4	Einfetten des Magnetventils	00:24			
4	Einstecken des Kabels vom Temperatursensor	01:07			
4	Unterlegscheiben für die Befestigung des Temperatursensors auf das Kabel fädeln	00:48			
3, 5	Einsetzen der Module	00:15			
	Summe	08:25			

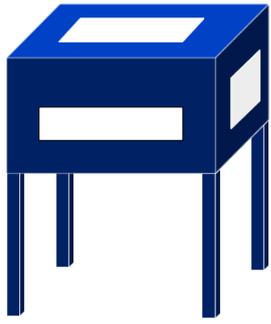
Name		Manuelle Dichtheitsprüfung	
	<ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 	- Dichtheitsprüfung (7)	
	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 	0 %	
	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit 	30:00	
	<ul style="list-style-type: none"> Taktzeit 	30:00	
	<ul style="list-style-type: none"> Wartezeit 	keine	
	<ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten 	5.000 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Abbaukosten 	2.000 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Jährliche Fixkosten 	8.750 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 	keine	

Abbildung A.34: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Dichtheitsprüfung“

Tabelle A.12: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Dichtheitsprüfung“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
7	Dichtheitsprüfung	30:00
	Summe	30:00

Name		Autom. Dichtheitsprüfung mit autom. Werstückzuführung	
	Montageaufgabenblöcke	- Dichtheitsprüfung (7)	
	Automatisierungsgrad	100 %	
	Bearbeitungszeit	20:00	
	Taktzeit	20:00	
	Wartezeit	9 Monate	
	Aufbaukosten	27.200 €	
	Abbaukosten	4.000 €	
	Jährliche Fixkosten	49.750 €	
	Restriktionen	Fließrate, max, niedrig	

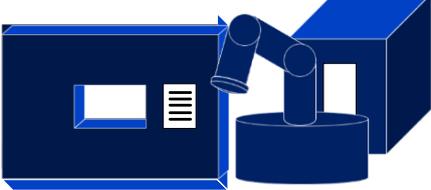


Abbildung A.35: Steckbrief Systemabschnitt „Autom. Dichtheitsprüfung mit autom. Werstückzuführung“

Tabelle A.13: Montageaufgaben Systemabschnitt „Autom. Dichtheitsprüfung mit autom. Werstückzuführung“

Montageaufgabenblock	Prüfautomat		Montageaufgabenblock	Roboter		Montageaufgabenblock	Palettenwechsler	
	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)		Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)		Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
7	Dichtheitsprüfung	20:00	7	Einlegen des Ventils	00:42	7	Wechseln der Ventil-Paletten	00:22
	Summe	20:00		Summe	00:42		Summe	00:22

Name		Manuelle Endmontage	
 <ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 		<ul style="list-style-type: none"> - Montage der Abdeckung des Magnetventils (8) - Endmontage (9) 	
 <ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 		0 %	
 <ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit Taktzeit Wartezeit 		03:00 03:00 keine	
 <ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten Abbaukosten Jährliche Fixkosten 		500 € 500 € 2.272 €	
 <ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 		keine	

Abbildung A.36: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Endmontage“

Tabelle A.14: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Endmontage“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
8	Fixierung des Temperatursensorkabels	00:50
8	Einlegen des Dichtungsringes über das Magnetventil	00:10
8	Einlegen der Umhausung des Magnetventils	00:08
8	Einlegen des Dichtungsringes in die Umhausung des Magnetventils	00:12
8	Verschrauben der Umhausung des Magnetventils	00:15
9	Dichtungsring auf Tankverbinder montieren	00:35
9	Thermisches Sicherheitsventil zu kleben	00:20
9	Schutzkappen aufschrauben	00:30
Summe		03:00

Name		Manuelle Verpackung	
	▪ Montageaufgabenblöcke	- Verpackung (10)	
	▪ Automatisierungsgrad	0 %	
	▪ Bearbeitungszeit	10:00	
	▪ Taktzeit	10:00	
	▪ Wartezeit	keine	
	▪ Aufbaukosten	500 €	
	▪ Abbaukosten	500 €	
	▪ Jährliche Fixkosten	625 €	
	▪ Restriktionen	keine	



Abbildung A.37: Steckbrief Systemabschnitt „Manuelle Verpackung“

Tabelle A.15: Montageaufgaben Systemabschnitt „Manuelle Verpackung“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
10	Finale Sichtkontrolle	08:30
10	Aufkleben des Kunden-Barcodes	00:30
10	In Schutzfolie einschweißen	01:00
	Summe	10:00

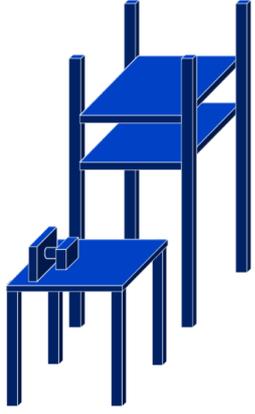
Name		Erweiterte manuelle Endmontage	
	<ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 	<ul style="list-style-type: none"> - Montage der Abdeckung des Magnetventils (8) - Endmontage (9) - Verpackung (10) 	
	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 	0 %	
	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit Taktzeit Wartezeit 	13:00 13:00 keine	
	<ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten Abbaukosten Jährliche Fixkosten 	500 € 500 € 2.272 €	
	<ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 	keine	

Abbildung A.38: Steckbrief Systemabschnitt „Erweiterte manuelle Endmontage“

Tabelle A.16: Montageaufgaben Systemabschnitt „Erweiterte manuelle Endmontage“

Werker		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
8	Fixierung des Temperatursensorkabels	00:50
8	Einlegen des Dichtungsringes über das Magnetventil	00:10
8	Einlegen der Umhausung des Magnetventils	00:08
8	Einlegen des Dichtungsringes in die Umhausung des Magnetventils	00:12
8	Verschrauben der Umhausung des Magnetventils	00:15
9	Dichtungsring auf Tankverbinder montieren	00:35
9	Thermisches Sicherheitsventil zu kleben	00:20
9	Schutzkappen aufschrauben	00:30
10	Finale Sichtkontrolle	08:30
10	Aufkleben des Kunden-Barcodes	00:30
10	In Schutzfolie einschweißen	01:00
	Summe	13:00

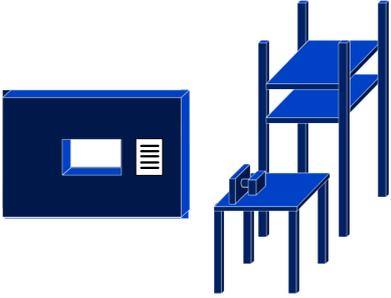
Name		<i>Teilautomatisierter EOL und erweiterte Endmontage</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> Montageaufgabenblöcke 	<ul style="list-style-type: none"> - Dichtheitsprüfung (7) - Montage der Abdeckung des Magnetventils (8) - Endmontage (9) - Verpackung (10) 		
	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierungsgrad 	33 %		
	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit Taktzeit Wartezeit 	36:00 20:00 9 Monate		
	<ul style="list-style-type: none"> Aufbaukosten Abbaukosten Jährliche Fixkosten 	10.500 € 3.500 € 43.397 €		
	<ul style="list-style-type: none"> Restriktionen 	<i>Fließrate, max, niedrig</i>		

Abbildung A.39: Steckbrief Systemabschnitt Teilautomatisierter EOL und erweiterte Endmontage

Tabelle A.17: Prozessaufgaben Systemabschnitt Teilautomatisierter EOL und erweiterte Endmontage

Werker			Prüfautomat		
Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)	Montageaufgabenblock	Montageaufgabe	Dauer (mm:ss)
7	Einlegen des Ventils	03:00	7	Dichtheitsprüfung	20:00
8	Fixierung des Temperatursensorkabels	00:50			
8	Einlegen des Dichtungsringes über das Magnetventil	00:10			
8	Einlegen der Umhausung des Magnetventils	00:08			
8	Einlegen des Dichtungsringes in die Umhausung des Magnetventils	00:12			
8	Verschrauben der Umhausung des Magnetventils	00:15			
9	Dichtungsring auf Tankverbinder montieren	00:35			
9	Thermisches Sicherheitsventil zu kleben	00:20			
9	Schutzkappen aufschrauben	00:30			
10	Finale Sichtkontrolle	08:30			
10	Aufkleben des Kunden-Barcodes	00:30			
10	In Schutzfolie einschweißen	01:00			
Summe		16:00			

A6. Wandlungsmatrizen

Wandlungskosten [€]		Wandlungsdauer [Monate]		manuell	automatisiert	nicht vorhanden
Zuführung	Prozess	Transport		1	2	3
1	• Pressen Vormontage	• Sonstiges Fügen Vormontage	manuell		500	3.000
					0	3
2	• Pressen Vormontage		manuell	1.409		4.409
	• Sonstiges Fügen Vormontage		manuell	0		3
3	• Pressen Vormontage		manuell	13.424	13.924	
	• Sonstiges Fügen Vormontage		manuell	0	0	

Abbildung A.40: Wandlungsmatrix 1

Wandlungskosten [€]		Wandlungsdauer [Monate]		manuell	automatisiert	nicht vorhanden	
Zuführung	Prozess	Transport		1	2	3	4
1	• Schraubaufgaben Längsseite	• Fügeaufgaben Längsseite	manuell		500	500	32.400
	• Schraubaufgaben Stirnseite	• Fügeaufgaben Stirnseite	manuell		0	0	3
2	• Schraubaufgaben Längsseite	• Fügeaufgaben Längsseite	manuell	1.409		2.000	35.309
	• Schraubaufgaben Stirnseite	• Fügeaufgaben Stirnseite	manuell	0		0	3
3	• Schraubaufgaben Längsseite	• Schraubaufgaben Stirnseite	manuell	1.409	2.000		34.718
	• Fügeaufgaben Längsseite	• Fügeaufgaben Stirnseite	manuell	0	0		3
4	• Schraubaufgaben Längsseite	• Schraubaufgaben Stirnseite	manuell	12.240	13.240	12.740	
	• Fügeaufgaben Längsseite	• Fügeaufgaben Stirnseite	manuell	0	0	1	

Abbildung A.41: Wandlungsmatrix 2

Wandlungskosten [€]		Wandlungsdauer [Monate]		manuell	automatisiert	nicht vorhanden						
Zuführung		Prozess		Transport								
						1	2	3	4	5	6	
1	• Dichtheitsprüfung	manuell	manuell	nicht vorhanden								
	• Abdeckung Magnetventil	manuell	manuell	manuell			500	36.500	37.000	38.500	39.000	
	• Endmontage	manuell	manuell	manuell			0	9	9	9	9	
	• Verpackung	manuell	manuell	manuell								
2	• Dichtheitsprüfung	manuell	manuell	nicht vorhanden								
	• Abdeckung Magnetventil	manuell	manuell	manuell		1.409		37.909	36.500	39.909	38.500	
	• Endmontage	manuell	manuell	manuell		0		9	9	9	9	
	• Verpackung	manuell	manuell	manuell								
3	• Dichtheitsprüfung	manuell	automatisiert	nicht vorhanden								
	• Abdeckung Magnetventil	manuell	manuell	manuell		172.500	173.000		500	179.500	180.000	
	• Endmontage	manuell	manuell	manuell		0	0		0	3	3	
	• Verpackung	manuell	manuell	manuell								
4	• Dichtheitsprüfung	manuell	automatisiert	nicht vorhanden								
	• Abdeckung Magnetventil	manuell	manuell	manuell		173.909	172.500	1.409		180.909	179.500	
	• Endmontage	manuell	manuell	manuell		0	0	0		3	3	
	• Verpackung	manuell	manuell	manuell								
5	• Dichtheitsprüfung	automatisiert	automatisiert	nicht vorhanden								
	• Abdeckung Magnetventil	manuell	manuell	manuell		203.000	203.500	213.000	213.500		500	
	• Endmontage	manuell	manuell	manuell		0	0	0	0		0	
	• Verpackung	manuell	manuell	manuell								
6	• Dichtheitsprüfung	automatisiert	automatisiert	nicht vorhanden								
	• Abdeckung Magnetventil	manuell	manuell	manuell		204.409	203.000	214.409	213.000	1.409		
	• Endmontage	manuell	manuell	manuell		0	0	0	0	0		
	• Verpackung	manuell	manuell	manuell								

Abbildung A.42: Wandlungsmatrix 3

A7. Konstruktionsrichtlinien

Tabelle A.18: Katalog der Konstruktionsrichtlinien 1 von 5 (in Anlegung an (Pachow-Frauenhofer 2012))

Wandlungsart	Wandlungshäufigkeit	Investitionsvolumen	Gegenereignis	Betroffenes Modul	Automatisierungsgrad	Konstruktionsrichtlinie	Wandlungsbefähiger
Austausch	gering	hoch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	Die vorhandenen Mittel sind so ausgelegt, dass vorgedachte Schnittstellen für neue Produkte, Bauteile, Produktionsmittel, Handarbeitsplätze o.ä. existieren	Kompatibilität
rein	gering	irrelevant	nein	irrelevant	manuell->manuell	Verwendung von höhenverstellbaren Standardarbeits-tischen und Arbeitsplatten mit auswechselbaren Vorrichtungsplatten, die noch nicht auf eine spezielle Montageaufgabe zugeschnitten sind und somit produktneutral sind	Kompatibilität
Austausch	gering	irrelevant	nein	irrelevant	manuell->manuell	Verwendung von höhenverstellbaren Standardarbeits-tischen und Arbeitsplatten mit auswechselbaren Vorrichtungsplatten, die noch nicht auf eine spezielle Montageaufgabe zugeschnitten sind und somit produktneutral sind	Kompatibilität
irrelevant	hoch	irrelevant	irrelevant	Prozess	manuell->manuell	Die Schnittstellengrundplatte auf der Montagetischoberfläche zur Aufnahme verschiedener Montageeinrichtungen ist standardisiert und kann zur individuellen Anpassung an den Mitarbeiter (Abstand und Drehwinkel) und an die günstigste Montageablaufanordnung angepasst werden	Kompatibilität
Austausch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	Prozess	manuell->manuell	Die Schnittstellenelemente sind für den Anschluss von Peripheriekomponenten am	Kompatibilität
rein	irrelevant	irrelevant	ja	Prozess	manuell->manuell	Die Schnittstellenelemente sind für den Anschluss von Peripheriekomponenten am in der Höhe fixierten Teil sowie am höhenverstellbaren Aufsatz des Arbeitstischgrundaufbaus angebracht, um somit einfacher Peripheriekomponenten anzuschließen	Kompatibilität
rein	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	Hohe Positioniergenauigkeit der mechanischen Schnittstellen	Kompatibilität
Austausch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	Hohe Positioniergenauigkeit der mechanischen Schnittstellen	Kompatibilität
raus	irrelevant	hoch	nein	irrelevant	irrelevant	Geringe Anforderungen der Schnittstellen der Anlagen an die zu verbindenden Elemente, d.h. sie weisen eine hohe Toleranz bzgl. Der Anschlussdaten auf, z.B. durch längenvariable Anschlussstücke, integrierte Transformatoren, "auf- und abwärtskompatible" Softwareprogramme und lageveränderliche Schnittstellen	Kompatibilität
Austausch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	An die gängigen (Layout-)Rastergrößen angepasste Betriebsmittel	Kompatibilität
rein	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	An die gängigen (Layout-)Rastergrößen angepasste Betriebsmittel	Kompatibilität
irrelevant	gering	irrelevant	irrelevant	ganzer Systemabschnitt	manuell->automatisiert	Die Auflagepunkte der Anlagen sind gedämpft und einstellbar, z.B. durch 3-Punkt-Maschinenaufgaben	Kompatibilität
irrelevant	gering	irrelevant	irrelevant	ganzer Systemabschnitt	automatisiert->automatisiert	Die Auflagepunkte der Anlagen sind gedämpft und einstellbar, z.B. durch 3-Punkt-Maschinenaufgaben	Kompatibilität
rein	gering	gering	nein	ganzer Systemabschnitt	irrelevant	Gedämpfte und einstellbare Auflagepunkte der Anlagen	Kompatibilität
raus	gering	gering	nein	ganzer Systemabschnitt	irrelevant	Gedämpfte und einstellbare Auflagepunkte der Anlagen	Kompatibilität
Austausch	mittel	hoch	irrelevant	Prozess	irrelevant	Einfache Integrationsmöglichkeiten für Prüfstationen/-module am Arbeitsplatz sind vorgesehen	Kompatibilität
Austausch	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Die Montagebetriebsmittel sind mit Bajonett- oder anderen Schnellverschlüssen ausgestattet, damit schnellere Wechsel realisiert werden können	Kompatibilität

Tabelle A.19: Katalog der Konstruktionsrichtlinien 2 von 5 (in Anlegung an (Pachow-Frauenhofer 2012))

Wandlungsart	Wandlungshäufigkeit	Investitionsvolumen	Gegenereignis	Betroffenes Modul	Automatisierungsgrad	Konstruktionsrichtlinie	Wandlungsbefähiger
Austausch	irrelevant	hoch	irrelevant	Prozess	automatisiert->automatisiert	Die Einsatzmöglichkeit von Spezialwerkzeugen ist auf den vorhandenen Anlagen gegeben	Kompatibilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Bewegliche Ausstattung der Arbeitsplätze, z.B. auf Rollen	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Bewegliche Ausstattung der Arbeitsplätze, z.B. auf Rollen	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Die Abmessungen der Anlage sind maximal so groß, dass sie mit regulären Flurförderfahrzeugen oder mit einem Standard-LKW transportiert werden kann	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Die Abmessungen der Anlage sind maximal so groß, dass sie mit regulären Flurförderfahrzeugen oder mit einem Standard-LKW transportiert werden kann	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Leicht lösbare Bodenverbindungen der Anlage	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Leicht lösbare Bodenverbindungen der Anlage	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Geringes Gewicht und geringe Größe der Anlagen	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Geringes Gewicht und geringe Größe der Anlagen	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Nicht fundamentierte Anlage	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Nicht fundamentierte Anlage	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Das Gewicht der Anlage, bzw. des schwersten Moduls (bei aufwandsarmer Zerlegung) kann mit Standard-Transportmitteln bewegt werden	Mobilität
irrelevant	hoch	irrelevant	ja	irrelevant	irrelevant	Das Gewicht der Anlage, bzw. des schwersten Moduls (bei aufwandsarmer Zerlegung) kann mit Standard-Transportmitteln bewegt werden	Mobilität
Austausch	irrelevant	hoch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	Standardisierte und möglichst aus Bestandteilen eines Baukastensystems zusammengestellte technische Anlagen	Mobilität
Austausch	hoch	gering	ja	Zuführung	irrelevant	Bewegliche Puffer, z.B. auf Rollen	Mobilität
Austausch	hoch	irrelevant	irrelevant	Zuführung	irrelevant	Schnell und einfach montierbar, bzw. demontierbare Speichereinrichtungen (z.B. Regal)	Mobilität
Austausch	hoch	gering	ja	Transport	irrelevant	Aufwandsarme montier- und demontierbare Fördereinrichtungen	Mobilität
raus	mittel	gering	irrelevant	ganzer Systemabschnitt	manuell->manuell	Flexible Kräne	Mobilität
Austausch	irrelevant	hoch	irrelevant	Transport	irrelevant	Ausreichende Nenntragfähigkeit der Transportmittel	Mobilität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	Standardisierte aus Bestandteilen eines Baukastensystems zusammengestellte technische Anlagen	Mobilität
Austausch	irrelevant	hoch	irrelevant	Prozess	irrelevant	Die Montagefische können mit unterschiedlichen Funktionen ausgestattet werden	Modularität
Austausch	gering	hoch	irrelevant	Prozess	irrelevant	Festlegung von Montagemodulen (als Bausteine) und Zuordnung von Aufgaben	Modularität
Austausch	gering	hoch	irrelevant	Prozess	irrelevant	Einsatz physisch und funktional abgegrenzter Module	Modularität
Austausch	gering	hoch	irrelevant	Transport	irrelevant	Einsatz physisch und funktional abgegrenzter Module	Modularität
Austausch	gering	hoch	irrelevant	Zuführung	irrelevant	Einsatz physisch und funktional abgegrenzter Module	Modularität
Austausch	gering	hoch	irrelevant	Prozess	irrelevant	Aufbau der technischen Anlagen auf Basis standardisierter, aufgabenneutraler Komponenten mit voller Nutzungsdauer	Modularität
Austausch	gering	hoch	irrelevant	Transport	irrelevant	Aufbau der technischen Anlagen auf Basis standardisierter, aufgabenneutraler Komponenten mit voller Nutzungsdauer	Modularität

Tabelle A.20: Katalog der Konstruktionsrichtlinien 3 von 5 (in Anlegung an (Pachow-Frauenhofer 2012))

Wandlungsart	Wandlungshäufigkeit	Investitionsvolumen	Gegenereignis	Betroffenes Modul	Automatisierungsgrad	Konstruktionsrichtlinie	Wandlungsbefähiger
Austausch	gering	hoch	irrelevant	Zuführung	irrelevant	Aufbau der technischen Anlagen auf Basis standardisierter, aufgabenneutraler Komponenten mit voller Nutzungsdauer	Modularität
Austausch	gering	hoch	irrelevant	Prozess	irrelevant	Erweiterungsmöglichkeit der Grundaufbauten der technischen Anlagen mit leicht austauschbaren Spezialeinrichtungen	Modularität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Zuführung	irrelevant	Standardisierte Lagereinrichtungen und Lagermittel	Modularität
Austausch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	Zuführung	irrelevant	Die Speichereinrichtungen sind in physisch unabhängigen und standardisierten Modulen realisiert	Modularität
irrelevant	irrelevant	hoch	irrelevant	Transport	manuell->automatisiert	Es sind "Halbfertigprodukt-fähige Standardladungsträger vorhanden	Modularität
irrelevant	irrelevant	hoch	irrelevant	Transport	automatisiert->automatisiert	Es sind "Halbfertigprodukt-fähige Standardladungsträger vorhanden	Modularität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	automatisiert->automatisiert	Individuell konfigurierbare Linearachsen nach dem Baukastenprinzip, bsp. Für Pick-&-Place-Operationen	Modularität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	irrelevant	Dezentral aufstellbare Prüfeinrichtungen	Modularität
Austausch	mittel	mittel	irrelevant	irrelevant	irrelevant	Festlegung von und Zuordnung zu Aufgaben	Modularität
Austausch	hoch	gering	ja	Zuführung	irrelevant	Festgelegte Schnittstellen der Bereitstellungseinrichtungen zum Grundarbeitsplatz und dadurch beliebige Positionierung (z.B. durch Einhängenvorrichtungen für Greifbehälter am höhenverstellbaren Teil des Arbeitstisches	Modularität
Austausch	hoch	irrelevant	irrelevant	Zuführung	irrelevant	Standardisierte und miteinander kombinierbare Behältersysteme	Modularität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	automatisiert->automatisiert	Mess- und Prüfeinrichtungen sind mit modularen Messmitteln aufgebaut, diese können aufgabenspezifisch umgerüstet werden (Vielstellen-Messvorrichtung)	Modularität
raus	irrelevant	irrelevant	ja	Prozess	manuell-	Standardmontagetische	Universalität
raus	irrelevant	irrelevant	ja	Prozess	manuell->automatisiert	Standardmontagetische	Universalität
Austausch	irrelevant	irrelevant	ja	Prozess	manuell-	Standardmontagetische	Universalität
Austausch	irrelevant	irrelevant	ja	Prozess	manuell->automatisiert	Standardmontagetische	Universalität
raus	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	manuell->manuell	Ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze (z.B. höhenverstellbare Arbeitstische)	Universalität
Austausch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	automatisiert->manuell	Ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze (z.B. höhenverstellbare Arbeitstische)	Universalität
Austausch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	manuell->manuell	Ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze (z.B. höhenverstellbare Arbeitstische)	Universalität
raus	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	automatisiert->manuell	Ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze (z.B. höhenverstellbare Arbeitstische)	Universalität
rein	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	Vorhandensein der notwendigen Software an jedem Arbeitsplatz	Universalität
Austausch	hoch	irrelevant	irrelevant	Prozess	irrelevant	Standardisierte und austauschbare Speichereinrichtungen	Universalität
Austausch	irrelevant	hoch	irrelevant	Prozess	irrelevant	Anpassbare Speichereinrichtungen, so dass sie aktuelle und zukünftige Lagerobjekte ohne großen Umrüstaufwand aufnehmen können	Universalität
Austausch	hoch	mittel	irrelevant	Zuführung	manuell->automatisiert	Auf verschiedene Bauteilgeometrien einstellbare Speichereinrichtungen (z.B. durch Stellelemente zur Anpassung produktspezifischer Schikanen oder Auswurfklappen)	Universalität

Tabelle A.21: Katalog der Konstruktionsrichtlinien 4 von 5 (in Anlegung an (Pachow-Frauenhofer 2012))

Wandlungsart	Wandlungshäufigkeit	Investitionsvolumen	Gegenereignis	Betroffenes Modul	Automatisierungsgrad	Konstruktionsrichtlinie	Wandlungsbefähiger
Austausch	hoch	mittel	irrelevant	Zuführung	automatisiert->automatisiert	Auf verschiedene Bauteilgeometrien einstellbare Speichereinrichtungen (z.B. durch Stellelemente zur Anpassung produktspezifischer Schikanen oder Auswurfklappen)	Universalität
Austausch	hoch	mittel	irrelevant	Zuführung	irrelevant	An veränderte Behälterhöhen apassbare Regalhöhen	Universalität
Austausch	irrelevant	hoch	irrelevant	Transport	irrelevant	Robuste Dimensionierung der Transportmittel, Hilfsmittel und Einrichtungen bzgl. Gewicht, Kapazität, Dimensionen/Volumen	Universalität
irrelevant	hoch	hoch	irrelevant	Transport	irrelevant	Die Transportmittel können aktuelle und zukünftige Transportobjekte ohne großen Umrüstaufwand aufnehmen	Universalität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	manuell->automatisiert	Anpassbare Multifunktionsgreifer zur Aufnahme und Verarbeitung unterschiedlicher Bauteile	Universalität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	automatisiert->automatisiert	Anpassbare Multifunktionsgreifer zur Aufnahme und Verarbeitung unterschiedlicher Bauteile	Universalität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	automatisiert->automatisiert	Greifer mit passiver Werkstückanpassung (z.B. durch einen festen Anschlag auf der einen Seite und federgespannten Nadeln in einem Nadelkissen auf der anderen Seite lässt sich eine individuelle Greiferbackenform einstellen)	Universalität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	manuell->automatisiert	Greifer mit passiver Werkstückanpassung (z.B. durch einen festen Anschlag auf der einen Seite und federgespannten Nadeln in einem Nadelkissen auf der anderen Seite lässt sich eine individuelle Greiferbackenform einstellen)	Universalität
Austausch	mittel	mittel	irrelevant	Prozess	irrelevant	Austauschbare Messmittel	Universalität
rein	irrelevant	irrelevant	nein	ganzer Systemabschnitt	manuell->automatisiert	Unempfindlichkeit der Anlage gegenüber Störungen, wie Vibrationen, Temperatur, Lärm oder Verschmutzung	Universalität
rein	irrelevant	irrelevant	nein	ganzer Systemabschnitt	automatisiert->automatisiert	Unempfindlichkeit der Anlage gegenüber Störungen, wie Vibrationen, Temperatur, Lärm oder Verschmutzung	Universalität
Austausch	hoch	mittel	irrelevant	Prozess	automatisiert->automatisiert	Die Fügeeinrichtungen nehmen die produktspezifischen Werkzeuge über standardisierte Mehrfachspannsysteme, Magnetspannsysteme oder Nullpunktspannsysteme auf	Universalität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	automatisiert->automatisiert	Die Fügeeinrichtungen nehmen die produktspezifischen Werkzeuge über standardisierte Mehrfachspannsysteme, Magnetspannsysteme oder Nullpunktspannsysteme auf	Universalität
rein	hoch	hoch	irrelevant	ganzer Systemabschnitt	irrelevant	Es werden die gleichen standardisierten Grundgestelle für unterschiedliche Fügeaufgaben verwendet	Universalität
raus	hoch	hoch	irrelevant	ganzer Systemabschnitt	irrelevant	Es werden die gleichen standardisierten Grundgestelle für unterschiedliche Fügeaufgaben verwendet	Universalität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	automatisiert->automatisiert	Die Montageobjekte werden durch objektneutrale Bürstvorrichtungen gesäubert	Universalität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	automatisiert->automatisiert	Die Klebeeinrichtungen sind für verschiedene Varianten ausgelegt, so dass verschiedene Fette/Klebstoffe auf unterschiedliche Werkstückgeometrien aufgebracht werden können.	Universalität
Austausch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	irrelevant	automatisiert->automatisiert	Es werden standardisierte Werkstückträger und offene Steuerungsstandards genutzt	Universalität
Austausch	hoch	irrelevant	irrelevant	Zuführung	irrelevant	Das Material wird in universellen Standard-Behältern bereitgestellt	Universalität

Tabelle A.22: Katalog der Konstruktionsrichtlinien 5 von 5 (in Anlegung an (Pachow-Frauenhofer 2012))

Wandlungsart	Wandlungshäufigkeit	Investitionsvolumen	Gegenereignis	Betroffenes Modul	Automatisierungsgrad	Konstruktionsrichtlinie	Wandlungsbefähiger
Austausch	hoch	irrelevant	irrelevant	Zuführung	irrelevant	Die Werkstückträger sind variantenneutral	Universalität
Austausch	mittel	irrelevant	irrelevant	Zuführung	irrelevant	Der Werkstückträgergrundaufbau kann mit individuell montierbaren Einzelwerkstückaufnahmen angepasst werden.	Universalität
Austausch	hoch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	manuell->automatisiert	Der Aufbau der Anlage entspricht dem PLUG + PRODUCE-Prinzip	Universalität
Austausch	hoch	irrelevant	irrelevant	irrelevant	automatisiert->automatisiert	Der Aufbau der Anlage entspricht dem PLUG + PRODUCE-Prinzip	Universalität
Austausch	hoch	irrelevant	irrelevant	Transport	irrelevant	Die Transporthilfsmittel (z.B. Werkstückträger) sind standardisiert und untereinander austauschbar	Universalität
Austausch	hoch	irrelevant	irrelevant	Transport	manuell->automatisiert	Die Werkstückträger sind durch Universaltaufnahmen anpassbar	Universalität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Transport	automatisiert->automatisiert	Es werden standardisierte Werkstückträger und offene Steuerungsstandards genutzt	Universalität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Transport	automatisiert->automatisiert	Der Werkstückträger wird über Standardschnittstellen mit Energie und Signalen geführt und versorgt	Universalität
irrelevant	hoch	hoch	ja	irrelevant	automatisiert->automatisiert	Alle Maschinen verfügen über gleiche Ausstattungsmerkmale	Universalität
Austausch	hoch	hoch	irrelevant	Prozess	automatisiert->automatisiert	Es sind ausreichend viele Werkzeug- und Werkstückspeicherplätze vorhanden	Universalität