

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln

Florian Karl

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. E. Abele,
Technische Universität Darmstadt

Die Dissertation wurde am 18.06.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 25.11.2014 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
Verzeichnis der Formelzeichen.....	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Untersuchungsbereich	5
1.3.1 Definitionen und Begriffe.....	5
1.3.2 Eingrenzung des Betrachtungsbereichs.....	10
1.4 Aufbau der Arbeit.....	10
2 Stand der Erkenntnisse	13
2.1 Betriebsmittelrelevante Arbeiten im Bereich Veränderungsfähigkeit	13
2.2 Ansätze zur Lebenszykluskostenrechnung.....	19
2.3 Weitere betriebsmittelrelevante Ansätze.....	21
2.4 Ableitung des Handlungsbedarfs.....	22
3 Grundlagen	25
3.1 Studie über Einflussfaktoren auf Betriebsmittel	25
3.2 Begründung der Methodenauswahl.....	27
3.3 Ausgewählte Werkzeuge zur Darstellung von Strukturen	31

3.3.1	Design-Struktur-Matrizen	31
3.3.2	Graphen	33
3.4	Ausgewählte Verfahren zur Unterstützung von Investitionsentscheidungen	34
3.4.1	Kapitalwertmethode	34
3.4.2	Multikriterielle Bewertungsverfahren	35
3.5	Ausgewählte Prognosemethoden	37
3.5.1	Qualitative Verfahren	37
3.5.2	Quantitative Verfahren	39
3.6	Entscheidungsfindung unter Unsicherheit	43
3.6.1	Risikoanalyse	43
3.6.2	Sensitivitätsanalyse	47
4	Anforderungen an die Methodik	49
4.1	Allgemeine Anforderungen	49
4.2	Spezielle Anforderungen	50
5	Entwickelte Modelle und Bewertungsvorgehen	53
5.1	Betriebsmittelanforderungs- und Betriebsmitteleigenschaftsmodell	53
5.2	Betriebsmittelstrukturmodell	62
5.3	Modell zur Darstellung von Rekonfigurationen	66
5.4	Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit	68
5.5	Bewertung von alternativen Rekonfigurationen	71
5.5.1	Strukturelle Betrachtung	71
5.5.2	Betriebswirtschaftliche Betrachtung	72

6	Methodik zur Ermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen	77
6.1	Übersicht über die Methodik	77
6.2	Datenbasis.....	79
6.2.1	Betriebsmitteleigenschaftsmodell.....	79
6.2.2	Betriebsmittelstrukturmodell	80
6.2.3	Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit	80
6.3	Schritt 1: Darstellung der Anforderungen	80
6.3.1	Betriebsmittelanforderungsmodell	81
6.3.2	Prognose der Anforderungen.....	81
6.4	Schritt 2: Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen.....	83
6.5	Schritt 3: Generierung von alternativen Rekonfigurationen	83
6.5.1	Identifikation direkt zu adaptierender Bauteile	84
6.5.2	Ermittlung alternativer Rekonfigurationen.....	85
6.6	Schritt 4: Bewertung der Alternativen.....	93
6.7	Anwendungsbereiche der Methodik.....	98
7	Umsetzung der Methodik	101
8	Anwendungsbeispiele.....	105
8.1	Industrielles Anwendungsbeispiel.....	105
8.2	Exemplarische Anwendung.....	106
8.2.1	Ausgangssituation und Beschreibung des Betriebsmittels..	106
8.2.2	Bedarfsermittlung und Planung der Rekonfiguration	108
9	Kritische Beurteilung der entwickelten Methodik.....	115

9.1	Abschätzung des Erfüllungsgrads der Anforderungen	115
9.2	Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Methodik.....	117
9.3	Fazit.....	119
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	121
11	Literaturverzeichnis	123
Anhang	149
A1	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	149
A2	Anforderungen an Betriebsmittel sowie Eigenschaften und Fähigkeiten	150
A3	Kennzahlen zur strukturellen Bewertung von Alternativen.....	169
A4	Kostengruppen zur betriebswirtschaftlichen Bewertung	171
A5	Kennzahl zur betriebswirtschaftlichen Alternativenbewertung	174
A6	Kennzahlen zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit.....	175
A7	Kennzahlen zur Bauteilbewertung (anhand Betriebsmittelstrukturmodell)	177
A8	Kennzahlen zur Bauteilbewertung (anhand Rekonfigurationsgraph)	178
A9	Kennzahlen zur Bauteilbewertung (betriebswirtschaftlich).....	179
A10	Daten zur exemplarischen Anwendung aus Abschnitt 8.1	180

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Abnehmende Längen von Produktlebenszyklen am Beispiel des Kraftfahrzeugs „Golf“ der Volkswagen AG (in Anlehnung an FIEBIG 2010, SCHMIDT 2012, Bilder: Volkswagen AG).....	2
Abbildung 2:	Einflussfaktoren (in Anlehnung an WESTKÄMPER 2002).....	6
Abbildung 3:	Betriebsmittelrelevante Einflussfaktoren nach Anteil der Nennungen in [%] (vgl. Studie in Abschnitt 3.1)	7
Abbildung 4:	Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (in Anlehnung an ZAEH ET AL. 2005).....	9
Abbildung 5:	Aufbau der vorliegenden Arbeit	11
Abbildung 6:	Beispielhafte binäre, statische Design-Struktur-Matrix (DSM)	32
Abbildung 7:	Darstellung unterschiedlicher Graphen (in Anlehnung an WERNERS 2006)	33
Abbildung 8:	Szenario-Trichter (in Anlehnung an GAUSEMEIER ET AL. 1996)	39
Abbildung 9:	Produkt-, Technologie- und Gebäudelebenszyklus (in Anlehnung an SCHENK & WIRTH 2004)	41
Abbildung 10:	Produktlebenszyklus (in Anlehnung an BRANKAMP 1996)	42
Abbildung 11:	Informationsstände der Entscheidungstheorie (in Anlehnung an WÖHE & DÖRING 2010, MÖLLER 2008)	43
Abbildung 12:	Dichtefunktion $F(X)$ einer beispielhaften Normalverteilung (μ_X : Erwartungswert, σ_X : Standardabweichung, x : Werte, die die Zufallsvariable X annehmen kann).....	45
Abbildung 13:	Beispielhaftes Fuzzy-Set mit Zugehörigkeitsfunktion (μ : Zugehörigkeitsfunktion) (KREBS 2012).....	46
Abbildung 14:	Abgrenzung von Einflussfaktoren und Anforderungen.....	53
Abbildung 15:	Ausschnitte aus einem beispielhaften Betriebsmittelanforderungs- bzw. einem Betriebsmitteleigenschaftsmodell.....	54

Abbildung 16: Abgrenzung Betriebsmittelanforderungs- und Betriebsmitteleigenschaftsmodell.....	55
Abbildung 17: Ausschnitt aus einem beispielhaften Betriebsmittelanforderungsmodell	61
Abbildung 18: Betriebsmittelstrukturmodell eines beispielhaften Betriebsmittels (1: geringer, 2: mittlerer, 3: hoher Aufwand zum Lösen und Wiederherstellen der Abhängigkeit).....	65
Abbildung 19: Grobe Struktur eines beispielhaften Rekonfigurationsgraphen.	67
Abbildung 20: Kreisschluss in Form sich wiederholender, identischer Bauteilfolgen.....	67
Abbildung 21: Beispielhafter Knoten im Rekonfigurationsgraph.....	68
Abbildung 22: Bewertungen im Rahmen dieser Arbeit.....	68
Abbildung 23: Komplexität (in Anlehnung an ULRICH & PROBST 2001)	69
Abbildung 24: Betriebswirtschaftliche Bewertung beispielhafter Alternativen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten.....	75
Abbildung 25: Überblick über die Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen.....	77
Abbildung 26: Ausschnitt eines beispielhaften Betriebsmitteleigenschaftsmodells	80
Abbildung 27: Ausschnitt eines beispielhaften Betriebsmittelanforderungsmodells zum Zeitpunkt T.....	81
Abbildung 28: Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen durch Abgleich von Anforderungen und Eigenschaften	83
Abbildung 29: Nötige Adaptionen zur Handhabung eines breiteren Produkts .	84
Abbildung 30: Ablauf zur Generierung alternativer Rekonfigurationen.....	86
Abbildung 31: Rekonfigurationsalgorithmus	88
Abbildung 32: Vorgehen zur Auswahl der besten Alternative.....	93

Abbildung 33: Beispielhafte strukturelle und betriebswirtschaftliche Kennzahlen	94
Abbildung 34: Einbindung des Software-Werkzeugs in die Methodik (Icons: Microsoft® Corporation)	101
Abbildung 35: Montagezelle des Tischsets mit beispielhaft eingezeichneten Bauteilen (Bild: Festo Didactic GmbH & Co.KG®).....	107
Abbildung 36: Altes und neues Produkt der Montagezelle (Bild links: Festo Didactic GmbH & Co.KG®).....	107
Abbildung 37: Ausschnitt des Betriebsmitteleigenschaftsmodells der Montagezelle.....	108
Abbildung 38: Ausschnitt des Betriebsmittelstrukturmodells der Montagezelle	109
Abbildung 39: Ausschnitt des Betriebsmittelanforderungsmodellmodells an die Montagezelle durch das neue Produkt.....	110
Abbildung 40: Direkt durch Produktneueinführung in Montagezelle zu adaptierende Bauteile.....	111
Abbildung 41: Unterschiedliche Rekonfigurationsalternativen.....	112
Abbildung 42: Rekonfigurationsgraphen der unterschiedlichen Alternativen	112
Abbildung 43: Adaptionenlisten der Rekonfigurationsalternativen	113
Abbildung 44: Kapitalwerte der einzelnen Alternativen	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Betriebsmittelrelevante Forschungsarbeiten im Bereich Veränderungsfähigkeit.....	14
Tabelle 2:	Spezifizierte betriebsmittelrelevante Einflussfaktoren differenziert nach ihrer Relevanz (gemäß Studie)	26
Tabelle 3:	Einflussfaktoren differenziert nach ihrer Bedeutung für die strategische bzw. operative Fabrikplanung (gemäß Studie)	27
Tabelle 4:	Anforderungen an eine Methodik zur Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln	51
Tabelle 5:	Kriterien zur Beschreibung der Anforderungen sowie Eigenschaften eines Betriebsmittels (in Anlehnung an KARL ET AL. 2012B)	59
Tabelle 6:	Kriterien zum Prüfen der Durchführbarkeit bzw. Integrierbarkeit von Adaptionen.....	89
Tabelle 7:	Beispielhafte Adaptionsliste	92
Tabelle 8:	Kennzahlen zur Beschreibung der Rekonfigurationsfähigkeit der Montagezelle.....	109
Tabelle 9:	Kennzahlen zur Auswahl der besten Alternative.....	114
Tabelle 10:	Beurteilung des Erfüllungsgrads bzgl. der gestellten Anforderungen	115
Tabelle 11:	Abschätzung des Aufwands zur Anwendung der Methodik anhand der exemplarischen Anwendung in Abschnitt 8.1 (PT: Personentag).....	118
Tabelle 12:	Im Rahmen dieser Dissertation betreute Studienarbeiten.....	149
Tabelle 13:	Der Alternativenbewertung zu Grunde gelegten Daten.....	181
Tabelle 14:	Adaptionsliste von Alternative 1	182
Tabelle 15:	Weitere unsichere Daten zur Bewertung der Alternativen	183

Tabelle 16: Deterministische Berechnung der gesamten
Rekonfigurationskosten (K_{Rekonfig}) von Alternative 1 183

Abkürzungsverzeichnis

Hinweis: Im Duden (WERMKE et al. 2009) enthaltene Abkürzungen werden hier nicht explizit erläutert.

AHP	Analytisch-Hierarchischer Prozess
BOM	Stückliste (engl. Bill-of-Materials)
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DIN	Deutsche Industrienorm
DSM	Design-Struktur-Matrix (engl. design structure matrix)
ERA-TV	Tarifvertrag über das Entgelt-Rahmenabkommen
ERP	Warenwirtschaft (engl. Enterprise Resource Planning)
HBW	Brinellhärte
HR	Rockwellhärte
HV	Vickershärte
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
LCC	Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life-Cycle Costing)
MA, MAs	Mitarbeiter (Singular/Plural)
MTBF	mittlere störungsfreie Zeit (engl. Mean Time Between Failures)
MTTR	mittlere Reparaturzeit (engl. Mean Time To Repair)
NPV	Kapitalwert (engl. Net Present Value)
PDM	Produktdatenmanagement
ppm	Teile pro Million (engl. parts per million)
PROFIBUS	Process Field Bus
PT	Personentag

RFID	Identifikation mit elektromagnetischen Wellen (engl. radio-frequency identification)
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
Stck.	Stück
TGA	technische Gebäudeausrüstung
TUM	Technische Universität München
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
vgl.	vergleiche
WLAN	drahtloses lokales Netz (engl. Wireless Local Area Network)

Verzeichnis der Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

A_{gew}	gewichtete Abhängigkeit, $A_{\text{gew}} \in \{1; 2; 3\}$
$A_{\text{intern, gew}}$	gewichtete intramodulare Abhängigkeit, $A_{\text{intern, gew}} \in \{1; 2; 3\}$
$A_{\text{extern, gew}}$	gewichtete intermodulare Abhängigkeit, $A_{\text{extern, gew}} \in \{1; 2; 3\}$
alleMa	alle beteiligten Mitarbeiter
alleMa,Ent	alle beteiligten Entwicklungsmitarbeiter
alleMasch	alle benötigten Maschinen
A_p	Auszahlung in Periode p
$A_{\text{Rekonfigurationsgraph, gew}}$	gewichtete Abhängigkeit im Rekonfigurationsgraph, $A_{\text{Rekonfigurationsgraph, gew}} \in \{1; 2; 3\}$
AnzA	Anzahl Abhängigkeiten
$\text{AnzA}_{\text{BT}_j, \text{gew}}$	Anzahl Abhängigkeiten des Bauteils j
AnzAdapt	Anzahl Adaptionen
$\text{Anz}(A/BT)$	Abhängigkeiten pro Bauteil
AnzBT	Anzahl Bauteile im Betriebsmittel vor Rekonfiguration
$\text{AnzBT}_{\text{adapt}}$	Anzahl der zu adaptierenden Bauteile
$\text{AnzBT}_{\text{hinzu}}$	Anzahl bei Rekonfiguration hinzugefügter Bauteile
$\text{AnzKN}_{\text{Rekonfigurationsgraph}}$	Anzahl Knoten im Rekonfigurationsgraph (ohne Anforderung)
AnzKR	Anzahl Kreise

$AnzKR_{BTj}$	Anzahl Kreise des Bauteils j
$AnzM$	Anzahl Module
BT	Bauteil
BTj	Bauteil j
BTl	Bauteil l
$dirAkt_{BTj}$	direkte Aktivität des Bauteils j
E_p	Einzahlung in Periode p
i	Zinssatz
I_0	Investition in Periode 0
$indirAkt_{BTj}$	indirekte Aktivität des Bauteils j
j	Zählvariable für Bauteile, $j \in \mathbb{N}$, $j \geq 1$; $j \leq AnzBT$
KN	Knoten
$K_{Adapt, BTj}$	gesamte Adaptionkosten für Bauteil j
$K_{Adapt, BTj, T}$	Adaptionkosten für Bauteil j zu Zeitpunkt T
K_{Anlauf}	Anlaufkosten
K_{Doku}	Dokumentationskosten
K_{Ent}	Entwicklungskosten
$K_{Ent, BTj}$	Entwicklungskosten für Bauteil j
$K_{Ent, BTl}$	Entwicklungskosten für Bauteil l
$K_{Ent, T}$	Entwicklungskosten für Gesamtrekonfiguration zu Zeitpunkt T
K_{Fehler}	Fehlerkosten

K_{Fremd}	Fremdleistungskosten
$K_{\text{ind,BTj}}$	durch Bauteil j indirekt ausgelöste Kosten, $j \in [1;\text{AnzBT}]$
$K_{\text{ind,BTj,T}}$	durch Bauteil j zu Zeitpunkt T indirekt ausgelöste Kosten, $j \in [1;\text{AnzBT}]$
K_{Ma}	Mitarbeiterkosten
$K_{\text{Ma,BTj}}$	Mitarbeiterkosten für Bauteil j
$K_{\text{Ma,BTl}}$	Mitarbeiterkosten für Bauteil l
K_{Masch}	Maschinenkosten
$K_{\text{Masch,BTj}}$	Maschinenkosten für Bauteil j
$K_{\text{Masch,BTl}}$	Maschinenkosten für Bauteil l
$K_{\text{Mat,BTj}}$	Materialkosten für Bauteil j
K_{Mat}	Materialkosten
$K_{\text{Mat,BTl}}$	Materialkosten für Bauteil l
K_{MatEK}	Materialeinzelkosten
$K_{\text{Mat,Ent}}$	Materialkosten für Entwicklungstätigkeiten
K_{MatGK}	Materialgemeinkosten
K_{Rekonfig}	gesamte Rekonfigurationskosten
$K_{\text{Rekonfig,T}}$	Rekonfigurationskosten zu Zeitpunkt T
K_{Schulung}	Schulungskosten
$K_{\text{Sonder,Ent}}$	Entwicklungssonderkosten
K_{sonst}	sonstige Rekonfigurationskosten
$K_{\text{sonst,T}}$	sonstige Rekonfigurationskosten zu Zeitpunkt T

Verzeichnis der Formelzeichen

K_{Still}	Stillstandkosten
$K_{\text{Still},T}$	Stillstandkosten zu Zeitpunkt t
K_{verurs,BT_j}	verursachte Kosten durch Bauteil j
$k_{\text{BM},h}$	Betriebsmittelstundensatz
k_{Lohnneb}	Lohnnebenkostenzuschlagsatz
$k_{\text{Ma},h}$	Mitarbeiterstundensatz
$k_{\text{Masch},h}$	Maschinenstundensatz
l	Zählvariable für die zu adaptierenden Bauteile, $l \in \mathbb{N}$, $l \leq \text{AnzBT}_{\text{adapt}}$
M	Modul
Mod	Modularität
n_{BT_j}	Anzahl Adaptionen an Bauteil j , $n \in \mathbb{N}$
NPV	Kapitalwert (engl. Net Present Value)
P	Anzahl der betrachteten Perioden
Reichw	Reichweite
$\text{relZentr}_{\text{BT}_j}$	relative Zentralität des Bauteils j
$\text{SchneeFakt}_{\text{BT}_j}$	Schneeballfaktor des Bauteils j
T	Periode, in der die Rekonfiguration durchgeführt wird
t_{Adapt}	Adaptionsdauer
t_{Ent}	Entwicklungsdauer
t_{Masch}	Bearbeitungszeit
t_{Still}	Stillstandzeit

y Zählvariable für die Kombinationen an direkt anzupassenden Bauteilen

Griechische Buchstaben

μ Zugehörigkeitsfunktion

μ_x Erwartungswert

σ_x Standardabweichung

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die deutsche Wirtschaftsleistung wird auch heute noch maßgeblich durch das verarbeitende Gewerbe getragen. So wurde im Jahr 2011 von über 7,1 Mio. Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in über 200.000 Unternehmen ein Umsatz von 1,96 Bio. € erwirtschaftet. Die Bruttowertschöpfung zu Faktorkosten¹ entsprach dabei ca. 490 Mrd. € (STATISTISCHES BUNDESAMT 2013A). Obwohl von 1991 bis 2012 der prozentuale Anteil des produzierenden Gewerbes am Bruttoinlandsprodukt von 30,2 % auf 26,0 % abnahm, stieg der absolute Betrag des Bruttoinlandsproduktes um 67,4 %. Inflationbereinigt betrug die genannte Steigerung 7,5 % (STATISTISCHES BUNDESAMT 2013B und C).

Das für die deutsche Wirtschaftsleistung somit elementare produzierende Gewerbe steht vor großen Herausforderungen, da dessen Umfeld einer steigenden Dynamik unterliegt (ABELE ET AL. 2006B). Die wachsende Globalisierung sowie die Sättigung der Märkte erhöhen den Wettbewerbsdruck auf Unternehmen. Diese müssen hohe Kundenanforderungen erfüllen, gleichzeitig aber auch Effizienzsteigerungen in den Produktionsprozessen bewältigen (WIENDAHL ET AL. 2003, REINHART & ZÄH 2003). Dem begegnen sie mit Innovationen, insbesondere in Hochlohnländern wie Deutschland (ABELE & REINHART 2011, ZÄH ET AL. 2010B, HERRMANN 2010, SCHUH 2010, JANORSCHKE & PRITZEL 2009). Durch Produkt- und Prozessinnovationen können nämlich Wettbewerbsvorteile erzielt und ausgebaut werden (SCHUMPETER 1939, ASCHHOFF ET AL. 2007, SPATH ET AL. 2003).

Unternehmen müssen immer häufiger pro Zeiteinheit innovieren, da auf Grund des Innovationsdrucks Neuerungen in immer kürzer werdenden Abständen auf den Markt gebracht werden (EVERSHEIM ET AL. 2002, MÜLLER ET AL. 2011). Dies resultiert bspw. in sich verkürzenden Produktlebenszyklen (ABELE ET AL. 2006A, SPATH ET AL. 2001), wie in Abbildung 1 beispielhaft an den Lebenszyklen eines Automobils dargestellt ist. Ebenfalls bei Produktionstechnologiezyklen führt der Innovationsdruck zu sich verkürzenden Zykluslängen (WAGNER 2006, NYHUIS ET AL. 2010).

¹ Die Bruttowertschöpfung zu Faktorkosten ergibt sich aus der „Bruttowertschöpfung minus sonstige indirekte Steuern abzüglich Subventionen“ (STATISTISCHES BUNDESAMT 2007, S. 3).

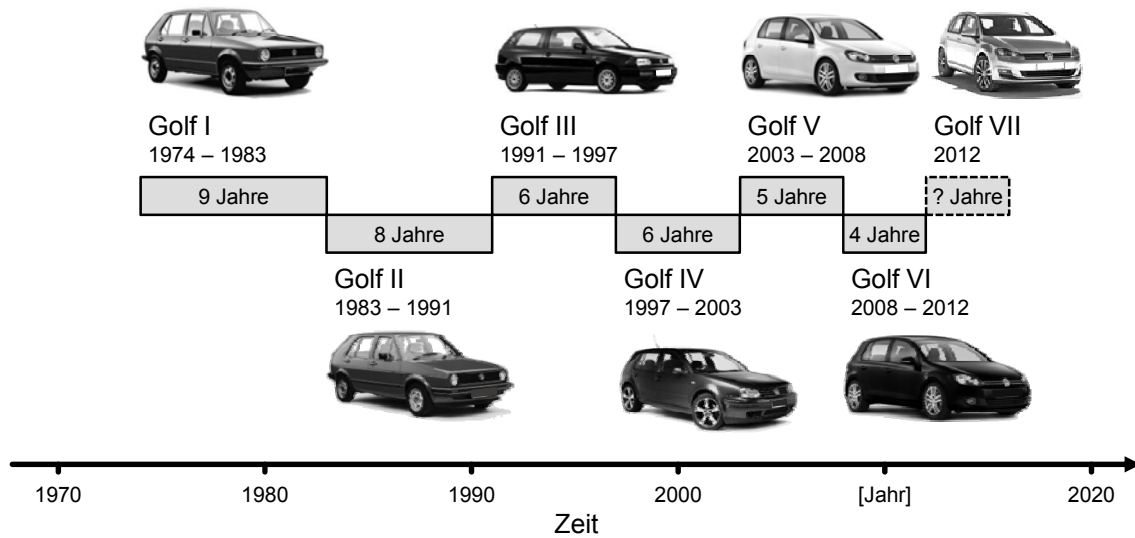


Abbildung 1: Abnehmende Längen von Produktlebenszyklen am Beispiel des Kraftfahrzeugs „Golf“ der Volkswagen AG (in Anlehnung an FIEBIG 2010, SCHMIDT 2012, Bilder: Volkswagen AG)

Ferner nimmt durch die Dynamik die Prognosegenauigkeit für notwendige Anpassungen ab (REINHART ET AL. 2009B, JANORSCHKE & PRITZEL 2009). Für Unternehmen verkürzen sich somit die Zeiten reagieren zu können, weshalb sie sich immer schneller anpassen müssen (BLEICHER 2004, KOHLER 2008).

Darüber hinaus steigen durch den Wechsel vom Anbieter- zum Käufermarkt die Anforderungen der Kunden an die Individualität von Produkten (PICOT ET AL. 2003, DU ET AL. 2006, ELMARAGHY ET AL. 2009). Dem begegnen Unternehmen mit einer steigenden Variantenvielfalt (ABELE & REINHART 2011). Die Volkswagen AG bspw. fertigte im Jahr 1974 lediglich ein Derivat des Kraftfahrzeugs „Golf“. Im Jahr 2010 waren es bereits zehn (FIEBIG 2010). Daher werden immer mehr Produkte, die in Produktionssystemen² hergestellt werden, in immer kürzer werdenden Abständen auf den Markt gebracht. Produktionssystemen fällt im Innovationsprozess somit eine signifikante Rolle zu und sie sind aus den genannten Gründen immer häufiger anzupassen (JANORSCHKE & PRITZEL 2009).

Technische Anpassungsprozesse des Produktionssystems sind in der Regel sehr zeitintensiv, wobei ein hoher Zeitdruck besteht (KIEFER 2007). Daher laufen sie hektisch ab und sind fehleranfällig (KIEFER 2007). In der industriellen Praxis ist zu beobachten, dass bei der Anpassung von Produktionsanlagen, die ein zentraler

² Produktionssysteme beinhalten alle Konzepte, Methoden und Werkzeuge, die den gesamten Produktionsablauf darstellen (SCHUH & GIERTH 2006).

Bestandteil von Produktionssystemen sind, häufig unvorhergesehene Schwierigkeiten auftreten, da sie nicht systematisch bzw. methodisch unterstützt ablaufen. Sind bspw. Bestandteile von Anlagen anzupassen, die in der Planung zuvor nicht berücksichtigt wurden, stehen benötigte Ressourcen nicht zur Verfügung. Dies führt zu Verzögerungen und somit zu Kostensteigerungen.

Produktionsanlagen stellen darüber hinaus hohe Investitionswerte dar (KIEFER 2007, WEISMANN 2008). Für den Aufbau eines neuen Karosseriebaus zur Herstellung eines neuen Fahrzeugmodells sind dreistellige Millionenbeträge zu bezahlen, wobei die Kosten für Produktionsanlagen stetig steigen (SPIECKERMANN ET AL. 2000, NEBL 2006). Trotz ihres hohen Werts werden Produktionsanlagen oftmals nicht an neue Anforderungen angepasst, sondern ausgetauscht, um die notwendigen Veränderungen umzusetzen (vgl. Studie von KARL ET AL. 2012A).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Produktionsanlagen auf Grund der steigenden Dynamik im Unternehmensumfeld zunehmend häufiger und schneller an neue Anforderungen anzupassen sind. Heutzutage werden sie jedoch oftmals nicht angepasst, sondern ausgetauscht, da potenzielle Anpassungspotenziale nicht erkannt und somit nicht genutzt werden. Durch den Austausch nimmt die für die Anlagen zur Verfügung stehende Amortisationszeit ab.

1.2 Zielsetzung

Produktionsanlagen bzw. Betriebsmittel sind zukünftig häufiger zu rekonfigurieren und nicht auszutauschen, um deren Amortisationszeit zu verlängern und somit wirtschaftlicher zu produzieren (ABELE & REINHART 2011). Zur Ermittlung bestehender Veränderungspotenziale in Anlagen und zur wirtschaftlichen Durchführung dieser Veränderungen bedarf es methodischer Vorgehensweisen sowie Werkzeuge zur Planung³. Dabei bestehen in der Betriebsmittelplanung⁴ noch große Rationalisierungspotentiale (SELIGER 2007).

³ Planung ist definiert als die „gedankliche Vorwegnahme eines angestrebten Ergebnisses einschließlich der zur Erreichung als erforderlich erachteten Handlungsabfolge“ (VDI 5200, S. 4).

⁴ Die Betriebsmittelplanung hat die „Festlegung der im Unternehmen einzusetzenden (...)“ Betriebsmittel zum Ziel (EVERSHEIM ET AL. 1996, S. 7-108). Die Planung lässt sich in die Bereiche strategisch, taktisch und operativ gliedern (WÖHE & DÖRING 2010). Die strategische Planung fokussiert u. a. die Konstruktion oder Auswahl von Produktionsanlagen sowie die Abstimmung der Anlagen aufeinander (EVERSHEIM ET AL. 1996). Sie bestimmt damit den langfristig zur Verfügung stehenden Maschinenpark. Die taktische Planung betrachtet mittelfristig u. a. den Verwendungszweck, die Einsatzbedingungen und führt die Eig-

Die Unterstützung von Unternehmen bei der Rekonfiguration ihrer Betriebsmittel und somit die *Entwicklung einer Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen* stellt daher das übergeordnete Ziel dieser Arbeit dar. Die Methodik soll zu der von LOTTER & WIENDAHL (2006) geforderten Erhöhung des Anteils wiederverwendbarer Anlagenteile beitragen. Unter Bedarfsermittlung wird die Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen verstanden. Die Planung umfasst das Erarbeiten von Rekonfigurationsalternativen sowie die Auswahl der besten Alternative. Die Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen setzt somit die Kenntnis des zu erreichenden Endzustandes sowie der durchzuführenden Tätigkeiten voraus (vgl. Fußnote 3, S. 3).

Damit Betriebsmittel aufwandsarm und kostengünstig an neue Rahmenbedingungen angepasst werden können, müssen sie ein Maß an Veränderungsfähigkeit aufweisen. Deren Höhe ist proportional zu den Investitionskosten zur Erzeugung der Veränderungsfähigkeit (HERNÁNDEZ MORALES 2003). Daher darf das Maß der bereitgestellten Veränderungsfähigkeit nicht über den Anforderungen liegen, um dem von WESTKÄMPER (2002) geforderten „Primat der Wirtschaftlichkeit“ zu genügen. Aus diesem Grund stellt die *Bewertung der Veränderungsfähigkeit von Produktionsanlagen* ein wichtiges Element der zu erarbeitenden Methodik dar. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass die optimale Veränderungsfähigkeit immer unternehmensspezifisch festzulegen ist (ANDRESEN & GRONAU 2004).

Um Veränderungen an Betriebsmitteln ermitteln und planen zu können, sind Veränderungsbedarfe zu antizipieren. Daher bildet die Erarbeitung eines Vorgehens zur *Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen* einen wichtigen Bestandteil. Hierfür sind einerseits Eigenschaften und Fähigkeiten von Anlagen sowie andererseits Anforderungen an Anlagen zu beschreiben und abzugleichen.

Ferner ist zu untersuchen, ob die Anlagen Anpassungspotenziale aufweisen. Üblicherweise existieren diverse Möglichkeiten zur Durchführung notwendiger Veränderungen. Demnach ist ein Verfahren zur *Generierung und Darstellung alternativer Veränderungsmöglichkeiten* zu erstellen. Zur Auswahl der besten Alternative ist außerdem ein *Verfahren zur Bewertung der Alternativen* zu entwickeln.

nungsprüfung durch (EVERSHEIM ET AL. 1996). Sie legt also auch die Anordnung der Betriebsmittel fest. Entscheidungen über die kurzfristige Veränderung von Systemen werden hingegen in der operativen Planung getroffen sowie durchgeführt (MÖLLER 2008). Darüber hinaus werden hier die Betriebsmittel für die Produktion einzelner Aufträge ausgewählt (EVERSHEIM ET AL. 1996).

Zusammengefasst ist das übergeordnete Ziel dieser Arbeit Unternehmen bei der Rekonfiguration ihrer Betriebsmittel zu unterstützen. Hierfür bedarf es einer Methodik, um Bedarfe für Betriebsmittelrekonfigurationen zu ermitteln und diese Rekonfigurationen zu planen. Als Teilziele sind hierfür insbesondere

1. Vorgehensweisen zu erarbeiten, um Rekonfigurationsbedarfe frühzeitig zu erkennen,
2. Verfahren zur Generierung und Darstellung von Alternativen, wie die Rekonfigurationen durchgeführt werden können, zu definieren sowie
3. Bewertungsvorschriften zur Auswahl der besten Alternative festzulegen.

1.3 Untersuchungsbereich

1.3.1 Definitionen und Begriffe

Betriebsmittel

In VDI 2815 werden Betriebsmittel als die Gesamtheit der „Anlagen, Geräte und Einrichtungen, die zur betrieblichen Leistungserstellung dienen“, bezeichnet. Es wird differenziert zwischen Ver-/Entsorgungsanlagen, Fertigungsmitteln, Mess- und Prüfmitteln, Fördermitteln, Lagermitteln, Organisationsmitteln, Innenausstattung sowie Grundstücken und Gebäuden. Nach WIENDAHL ET AL. (2009) existieren in der Produktion Fertigungs-, Montage- und Logistikmittel.

Zur Beschreibung von Betriebsmitteln in der Produktion kann das hierarchische Betriebsmittelmodell nach ZAEH ET AL. (2006) Verwendung finden. Dieses Modell strukturiert Betriebsmittel hierarchisch in fünf Ebenen (Anlagen-, Zellen-, Funktionsgruppen-, Komponenten- und Elemente-Ebene). In untergeordneten Ebenen sind alle Bauteile oder Teilsysteme aufgelistet, aus welchen das übergeordnete System besteht. Die Elemente-Ebene stellt die unterste, nicht weiter zerlegbare Ebene dar. Mehrere Elemente (z. B. Schrauben, Kabel oder Profile) formen Komponenten (z. B. Antriebe, Speicher oder Pneumatikzylinder), die eine einzige Tätigkeit ausführen und dazu Energie oder Informationen benötigen können. Funktionsgruppen (z. B. Roboter, Greifer) werden durch das Verbinden von mehreren Komponenten erzeugt. Sie setzen spezifische Prozesse um, wobei hie-

runter sowohl primäre als auch sekundäre Prozesse fallen.⁵ Zellen (z. B. Karosseriebauzellen im Automobilbau) sind die kleinsten autonomen Einheiten (JONAS 2000). Sie bestehen aus unterschiedlichen Funktionsgruppen und erfüllen einen Primärprozess, wobei die notwendigen Sekundärprozesse eingeschlossen sind. Die höchste Ebene ist die Anlagenebene (z. B. Montagelinie). Eine Anlage umfasst mehrere Zellen, die durch Systeme zur Realisierung von Energie-, Informations- und Materialflüssen verbunden sein können (ZAEH ET AL. 2006).

Bei den in dieser Arbeit betrachteten *Betriebsmitteln* handelt es sich um Fertigungs- und Montagemittel auf Zellen-Ebene, die mindestens einen Primärprozess der Produktion nach DIN 8580 ausführen. Darüber hinaus können sie eine unbegrenzte Anzahl an unterstützenden Sekundärprozessen verrichten.

Einflussfaktor

Bei einem Einflussfaktor handelt es sich um einen Faktor, der auf ein Unternehmen wirkt und durch Variation seiner Ausprägungen Veränderungen im Unternehmen und somit auch im Produktionssystem mit den hier vorhandenen Betriebsmitteln hervorrufen kann. Ein Einflussfaktor wird über seine Ausprägungen beschrieben, wobei eine oder mehrere unterschiedliche Ausprägungen existieren können (z. B. Qualifikation, Anzahl verfügbarer Arbeitskräfte etc. für den Einflussfaktor „Personal/Arbeitsmarkt“). WESTKÄMPER (2002) nennt acht Einflussfaktoren auf Produktionssysteme (siehe Abbildung 2).

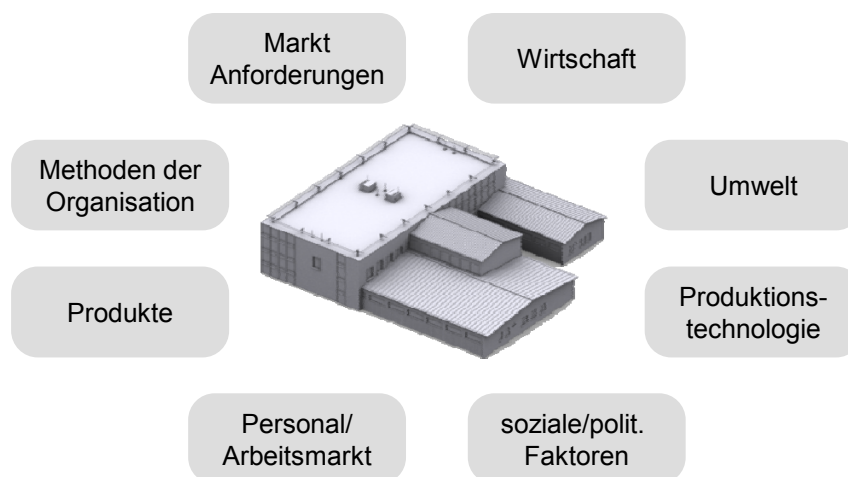


Abbildung 2: Einflussfaktoren (in Anlehnung an WESTKÄMPER 2002)

⁵ Primärprozesse tragen direkt zur Wertschöpfung am Produkt bei (z. B. Schweißen). Sekundärprozesse hingegen haben keine wesentliche Wertschöpfungsanteile und werden in der Regel nur für Unterstützungsfunktionen (z. B. Messen, Handhaben) eingesetzt (ZAEH ET AL. 2006, CHRISTIANSEN 2009).

Zur Identifikation der betriebsmittelrelevanten Einflussfaktoren wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine fragebogenbasierte Studie mit 80 Teilnehmern mit produktionstechnischem Hintergrund durchgeführt. Dazu wurden die in Abbildung 2 genannten Einflussfaktoren unter Berücksichtigung weiterer Arbeiten (z. B. HERNÁNDEZ MORALES 2003) detailliert, so dass 15 Faktoren zur Auswahl standen. Die Studienteilnehmer hätten noch weitere Faktoren hinzufügen können. Dies erfolgte jedoch nicht, so dass davon ausgegangen wird, dass die Auswahl die relevanten Faktoren beinhaltet. Die betriebsmittelrelevanten *Einflussfaktoren* sind in Abbildung 3 gezeigt. Durch die Änderung der Ausprägungen dieser Faktoren können Anpassungen am Betriebsmittel notwendig werden.

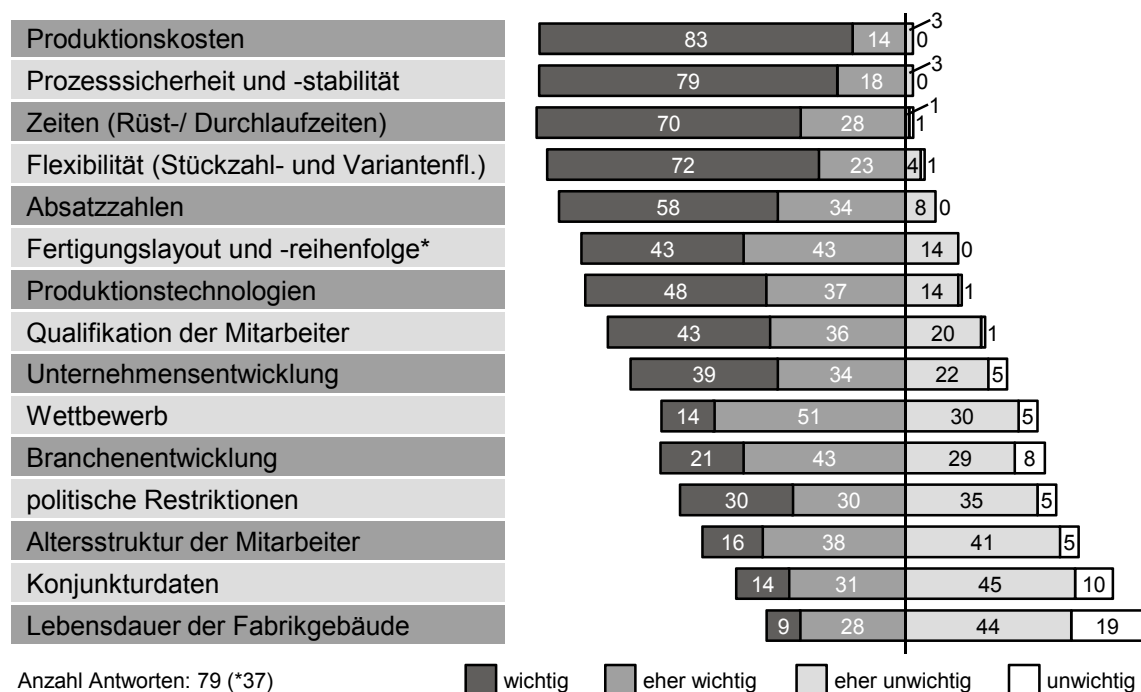


Abbildung 3: Betriebsmittelrelevante Einflussfaktoren nach Anteil der Nennungen in [%] (vgl. Studie in Abschnitt 3.1)

Adaption und Rekonfiguration

Eine *Adaption* wird definiert als die Veränderung eines einzelnen Betriebsmittelbauteils, wobei die Adaptionarten Austauschen, Entfernen, Anpassen oder Hinzufügen existieren (ELMARAGHY 2009). Eine *Rekonfiguration* hingegen ist die Veränderung eines Betriebsmittels durch Adaption mehrerer Bauteile, um auf geänderte Einflussfaktoren zu reagieren (WIENDAHL 2002, WIENDAHL ET AL. 2007, ELMARAGHY 2009). Eine Rekonfiguration umfasst somit immer eine oder mehrere Adaptionen. Sowohl Adaptionen als auch Rekonfigurationen sind stets mit Aufwänden (Zeit und Kosten) verbunden (WIENDAHL ET AL. 2007).

Ein Bauteil ist ein Bestandteil des Betriebsmittels, der adaptiert werden kann. Auf welcher Ebene des hierarchischen Betriebsmittelmodells (siehe Seite 5) sich die Bauteile (Elemente, Komponenten oder Funktionsgruppen) befinden, ist unternehmensspezifisch festzulegen. So kann ein Unternehmen bspw. über das Know-how verfügen, Bestandteile von Robotern (z. B. Antriebe, mechanische Komponenten) auszutauschen. Somit würden diese Bestandteile als Bauteile definiert. Andere Unternehmen hingegen müssen Roboter als Ganzes austauschen. Aus diesem Grund wäre der Roboter das Bauteil.

Eine Rekonfiguration ist kein Teil des regulären Systembetriebs. Sie ist die Reaktion auf etwas Neues bzw. etwas bei der Konstruktion des Betriebsmittels noch nicht Vorhergesehenes. Durch eine Rekonfiguration wird demzufolge das Leistungspotenzial (siehe RASCH 2000) eines Betriebsmittels verändert und nicht das ursprüngliche Potenzial wiederhergestellt. Daher stellen das Rüsten (VDI 1983) sowie die Instandhaltung⁶ (RASCH 2000, DIN 31051) von Betriebsmitteln im Kontext der vorliegenden Arbeit keine Rekonfigurationen dar.

Rekonfigurationsfähigkeit im Kontext Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Die Veränderungsfähigkeit beschreibt die Fähigkeit von Unternehmen auf den bestehenden Veränderungsdruck (siehe Abschnitt 1.1) reagieren und Veränderungsprozesse erfolgreich durchführen zu können (KRÜGER 1998). In diesem Kontext werden in der Literatur die Begriffe Flexibilität sowie Wandlungsfähigkeit ausführlich diskutiert, da sich hieraus die Veränderungsfähigkeit eines Unternehmens zusammensetzt (siehe bspw. DASHCHENKO 2006, WIENDAHL ET AL. 2007, NYHUIS ET AL. 2008, ELMARAGHY 2009). Der Zusammenhang zwischen Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ist in Abbildung 4 gezeigt. Die nachfolgend beschriebenen Definitionen werden für diese Arbeit herangezogen, da sie in der produktionstechnischen Forschung etabliert sind.

Flexibilität bildet die Fähigkeit eines Produktionssystems ab auf veränderte Einflussfaktoren schnell und mit geringem finanziellen Aufwand, innerhalb definierter Flexibilitätskorridore zu reagieren (ELMARAGHY 2005, ABELE ET AL. 2006B, HEINEN ET AL. 2008). Die Flexibilitätskorridore sind durch in der Planung bereits vorgehaltene Maßnahmenbündel definiert (HEINEN ET AL. 2008). Rüsten (VDI 1983) stellt somit einen Bestandteil der Flexibilität dar.

⁶ Die Instandhaltung beinhaltet u. a. die Wartung sowie die Instandsetzung (DIN 31051).

Wandlungsfähigkeit geht darüber hinaus und beschreibt das Potenzial jenseits der Flexibilitätskorridore Veränderungen reaktiv sowie proaktiv durchführen zu können (HEINEN ET AL. 2008). Die Veränderungen sind stets mit finanziellem sowie zeitlichem Aufwand verbunden (HEINEN ET AL. 2008). Das Potenzial zu wandeln setzt sich aus Wandlungsbefähigern⁷ zusammen (HERNÁNDEZ MORALES 2003).

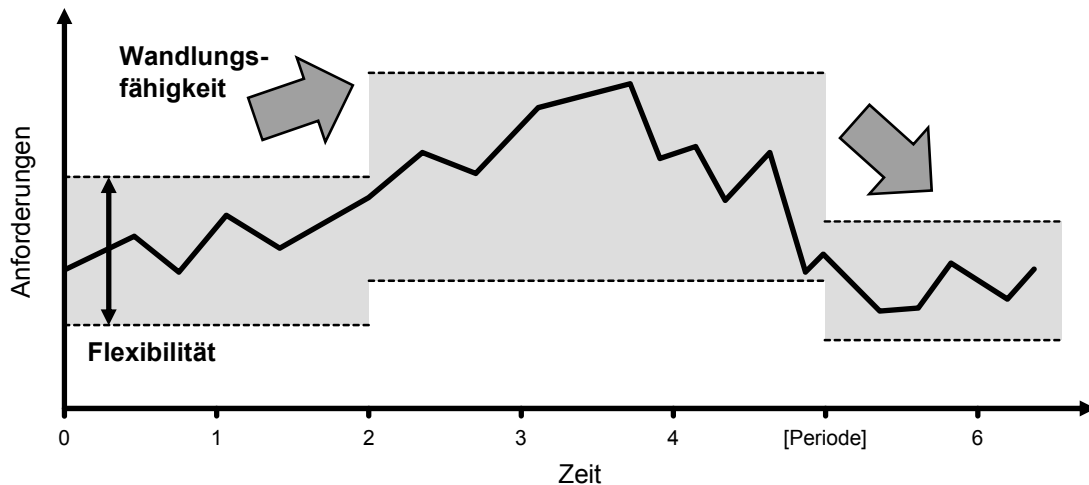


Abbildung 4: Abgrenzung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit (in Anlehnung an ZAEH ET AL. 2005)

Rekonfigurationen wurden zuvor als Veränderungen eines Betriebsmittels durch Bauteiladaptionen definiert. Da Rekonfigurationen mit Aufwänden verbunden und keine vorgehaltenen Maßnahmenbündel sind, beschreibt die Rekonfigurationsfähigkeit somit die Wandlungsfähigkeit auf Betriebsmittelebene und nicht die Flexibilität (WIENDAHL ET AL. 2007).

Rekonfigurationsfähigkeit wird daher definiert als das Potenzial von Betriebsmitteln, Rekonfigurationen mit geringem Zeit- und Kostenaufwand umsetzen zu können. Sie stellt ein Maß dar, um Aussagen über den Durchführungsaufwand von unbekanntem Veränderungen (HEINEN ET AL. 2008) treffen zu können und ist somit unabhängig von einzelnen bzw. spezifischen Rekonfigurationen sowie Einflussfaktoren. Da Kosten erst bei spezifischen Rekonfigurationen auftreten, lässt sich die Rekonfigurationsfähigkeit nicht monetär beschreiben. Generell können rekonfigurationsfähige Betriebsmittel aufwandsärmer (schneller und kostengünstiger) an geänderte Einflussfaktoren angepasst werden als reaktionsträge.

⁷ Bei einem Wandlungsbefähiger handelt es sich um eine „(...) individuelle und ungerichtete, abrufbare Eigenschaft eines Wandlungsobjektes zum Wandel“ (HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 54). Es existieren die fünf primären Wandlungsbefähiger Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität (HEINEN ET AL. 2008).

1.3.2 Eingrenzung des Betrachtungsbereichs

Die Arbeit richtet sich an kleine und mittelständische Unternehmen sowie an Großunternehmen. Firmen, die die Methodik zukünftig anwenden sollen, sind produzierende Betriebe im Bereich der diskreten Industrien, die unter einem hohen Veränderungsdruck stehen. Deren, in Abschnitt 1.3.1 definierte, Betriebsmittel weisen hohe Sachwerte auf und sind in deren Lebenszyklus während der Betriebsphase mehrfach zu rekonfigurieren. Die Anordnung unterschiedlicher Betriebsmittel zueinander, also die Produktionsstruktur (REINHART ET AL. 2009A), wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Solche Unternehmen sind in der Stückgutproduktion mit variantenreichem Produktspektrum zu finden, wie bspw. in der Automobil-, der Elektro- oder der Konsumgüterindustrie. Die zu entwickelnde Methodik soll zukünftig in deren Planungsabteilungen eingesetzt werden, die sich mit dem Betriebsmittelmanagement beschäftigen⁸. Die Anwender sollten betriebswirtschaftliche und technische Grundkenntnisse aufweisen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Abbildung 5 zeigt die zehn Kapitel der vorliegenden Arbeit. In der Einleitung wurden bereits die Ausgangssituation dargelegt, die Zielsetzung erläutert sowie der Untersuchungsbereich mit den grundlegenden Begriffen definiert.

In Kapitel 2 werden betriebsmittelrelevante Forschungsarbeiten aus dem Bereich der Veränderungsfähigkeit, Ansätze zur Lebenszykluskostenrechnung sowie weitere betriebsmittelrelevante Ansätze, z. B. aus der Fabrikplanung hinsichtlich der Erfüllung der in Kapitel 1 geschilderten Zielsetzung evaluiert. In diesem Zusammenhang erfolgt die Untersuchung der Ansätze hinsichtlich der Bedarfsermittlung, Planung und Bewertung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln. Dies dient der Identifikation von Defiziten bestehender Methoden. Darüber hinaus werden Aspekte bzw. Teilbereiche dieser Methoden identifiziert, die zur Erreichung der Zielstellung dieser Arbeit herangezogen werden können.

⁸ Abhängig von der Organisationsstruktur sowie der funktionalen Zuordnung von Tätigkeiten im jeweiligen Unternehmen kann es sich bei diesen Planungsabteilungen bspw. um die Betriebsmittelplanung, die Produktionsplanung, die Arbeitsplanung (EVERSHEIM ET AL. 1996) oder auch die Instandhaltung (RASCH 2000) handeln. In kleinen und mittleren Unternehmen ist das Betriebsmittelmanagement üblicherweise den unterschiedlichen Funktionen zugeordnet, wohingegen in großen Unternehmen Zentralabteilungen existieren (EVERSHEIM ET AL. 1996). Die operative Durchführung der Veränderungen fällt zumeist in den Bereich des operativen Instandhaltungsmanagements (RASCH 2000).

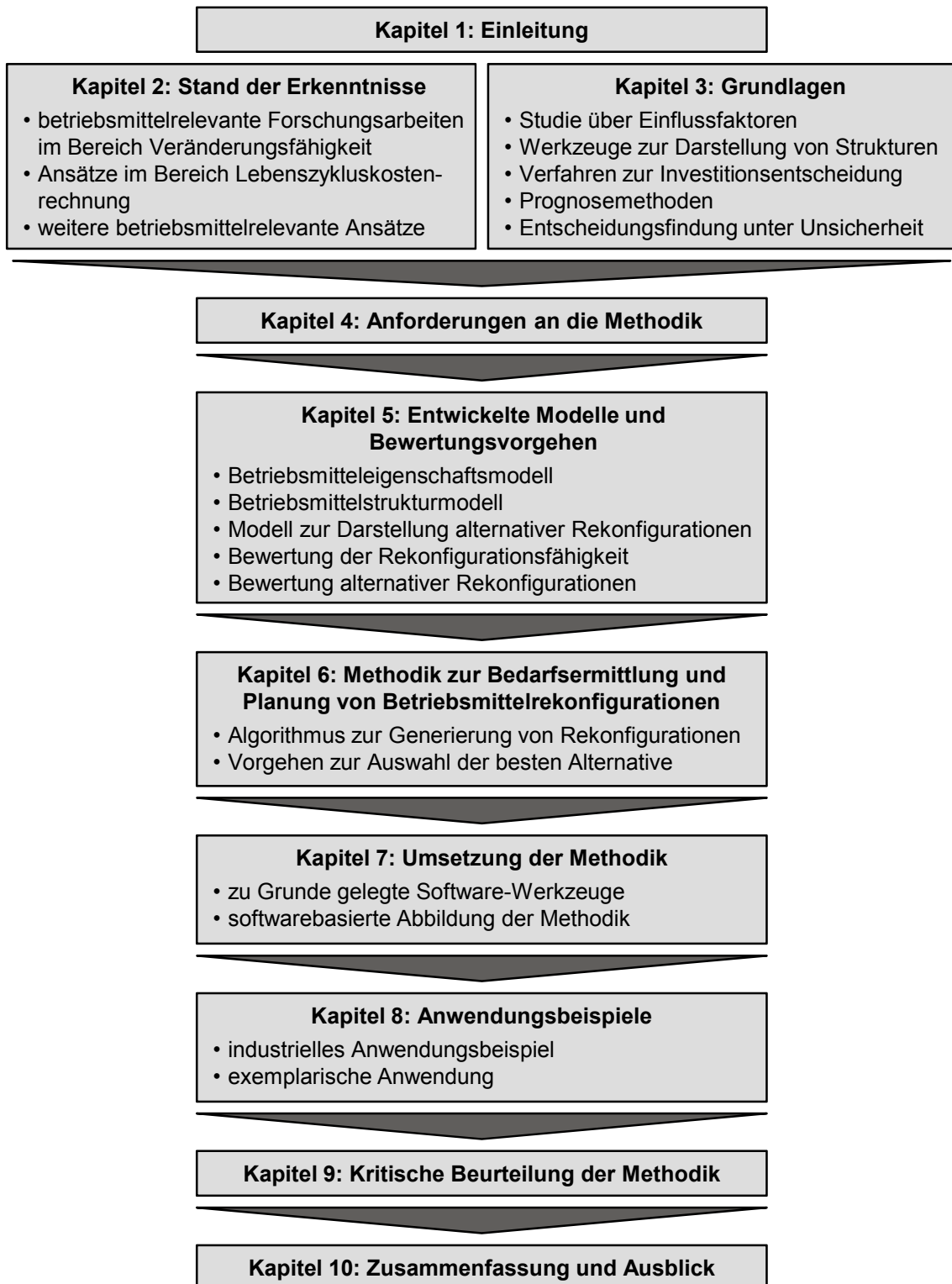


Abbildung 5: Aufbau der vorliegenden Arbeit

In Kapitel 3 werden die für das Verständnis dieser Arbeit benötigten Grundlagen dargelegt. Zunächst wird die durchgeführte Studie über betriebsmittelrelevante Einflussfaktoren beschrieben. Im zweiten Abschnitt dieses Kapitels wird die Auswahl der Werkzeuge und Methoden begründet. Anschließend wird auf Werk-

zeuge zur Strukturmodellierung eingegangen sowie Verfahren vorgestellt, die üblicherweise im Rahmen einer Investitionsentscheidung Verwendung finden. Ferner werden Prognosemethoden erläutert. Außerdem erfolgt die Präsentation von Methoden, um auch unter Unsicherheit eine Entscheidung treffen zu können.

Auf Basis der Kapitel 2 und 3 erfolgt in Kapitel 4 die Definition von sowohl allgemeinen als auch speziellen Anforderungen an eine Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen.

Kapitel 5 stellt die erarbeiteten Modelle und Bewertungen dar, die der entwickelten Methodik zu Grunde liegen. Bei diesen handelt es sich um das Betriebsmitteleigenschaftsmodell, das Betriebsmittelstrukturmodell, das Modell zur graphenbasierten Darstellung von alternativen Rekonfigurationen, die Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit sowie die strukturelle und betriebswirtschaftliche Bewertung der unterschiedlichen Alternativen.

Die entworfene vierstufige Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen wird in Kapitel 6 erläutert. Es wird zunächst auf die Datenbasis der Methodik, das Betriebsmitteleigenschafts- sowie das Betriebsmittelstrukturmodell, eingegangen. Zur Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen ist ein Modell zur Darstellung der Anforderungen notwendig, das im ersten Schritt erstellt wird. Nach der Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen im zweiten Schritt, werden mit dem einem Rekonfigurationsalgorithmus im dritten Schritt Alternativen zur Reaktion auf die Bedarfe ermittelt. Diese Alternativen werden abschließend im vierten Schritt zur Auswahl der besten Alternative strukturell und betriebswirtschaftlich unter Berücksichtigung von Unsicherheiten bewertet.

Die praktische Umsetzung wird in Kapitel 7 beschrieben. Es wird auf Software-Werkzeuge eingegangen, die bei Umsetzung der Methodik unterstützen. Ferner wird das entwickelte Software-Werkzeug zur Abbildung der Methodik erläutert.

Daraufhin erfolgt die Beschreibung der Methodik in Kapitel 8 anhand eines industriellen Anwendungsbeispiels sowie einer exemplarischen Anwendung.

Im Anschluss an die Beschreibung der Anwendungsbeispiele wird in Kapitel 9 die entwickelte Methodik kritisch beurteilt. Es wird hier der Erfüllungsgrad der definierten Anforderungen untersucht und die Methodik technisch-wirtschaftlich beurteilt. Abschließend wird ein Fazit gezogen.

Die Zusammenfassung mit dem Ausblick auf offene Forschungsfragen sowie möglichen Weiterentwicklungen ist in Kapitel 10 zu finden.

2 Stand der Erkenntnisse

Zur Planung, Bewertung und Gestaltung der Veränderungsfähigkeit bzw. Wandlungsfähigkeit und Flexibilität existiert eine Vielzahl von Methoden. Da diese einen ähnlichen Fokus wie die vorliegende Arbeit aufweisen, werden erstens sie hinsichtlich der Erreichung der in Abschnitt 1.2 geschilderten Zielsetzung evaluiert. Ferner sind Rekonfigurationen stets mit Aufwänden verbunden (WIENDAHL ET AL. 2007), bezüglich derer unterschiedliche Rekonfigurationsalternativen vergleichbar sind. Diese Kosten fallen im Lebenszyklus eines Betriebsmittels an. Daher werden zweitens Ansätze zur Lebenszykluskostenrechnung (LCC, engl. life cycle costing) hinsichtlich ihrer Berücksichtigung und Ermittlung von Rekonfigurationskosten untersucht. Außerdem erfolgt drittens die Analyse weiterer betriebsmittelrelevanter Ansätze aus den Bereichen Fabrikplanung, Anlagenwirtschaft sowie Instandhaltung hinsichtlich der Beachtung von Betriebsmittelrekonfigurationen.

2.1 Betriebsmittelrelevante Arbeiten im Bereich Veränderungsfähigkeit

Die nachfolgend vorgestellten Forschungsarbeiten stehen exemplarisch für eine Vielzahl weiterer Vorgehen, von welchen ausgewählte am Ende dieses Abschnitts angeführt sind. Sie wurden herausgegriffen, da sie repräsentativ für andere Arbeiten stehen oder auf diesen aufbauen.

Der Vergleich der Verfahren erfolgt hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien (siehe Tabelle 1). Es wird ermittelt, auf welche Betrachtungsebene die Verfahren sich beziehen sowie, ob im Fokus die Bewertung der Veränderungsfähigkeit, die initiale Planung des Betrachtungsobjekts oder die Planung von Veränderungen liegen. Darüber hinaus wird mit der Kategorie Bewertung erläutert, ob sie betriebswirtschaftlich oder strukturell erfolgt. Unter einer betriebswirtschaftlichen Bewertung wird die Betrachtung von bspw. monetären Kenngrößen oder auch Kenngrößen, wie z. B. Durchlaufzeiten, Bearbeitungszeiten oder Liefertreue, verstanden. Die strukturelle Bewertung bezieht die Struktur des Betrachtungsobjekts ein. Ferner erfolgt die Darlegung des Methodenumfangs.

Außerdem werden die allgemeinen Kriterien Übertragbarkeit, Erweiterbarkeit, Integrationsfähigkeit sowie Transparenz abgeschätzt. Die Übertragbarkeit bezieht sich auf die Eigenschaft unterschiedliche Anwendungsfälle zu betrachten. Die

Erweiterbarkeit beschreibt die Möglichkeit dem Verfahren weitere Aspekte hinzuzufügen zu können. Die Integrationsfähigkeit umfasst die Aufwände zur Implementierung des Verfahrens in ein Unternehmen. Hierbei ist bspw. zu berücksichtigen inwieweit auf bestehende Daten zurückgegriffen werden kann oder zusätzliche Software-Werkzeuge zu implementieren sind. Mit Transparenz wird die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse für den Anwender geschildert. Dies ist insbesondere für die Akzeptanz der Resultate erforderlich.

	Dohms 2001	Sesterhenn 2003	Vielhaber 2004	Heger 2006	Drabow 2006	Alexoulous 2007	Möller 2008	Rogalski 2009	Pachow-Fr. 2012
Legende ● : Nahezu vollständig betrachtet ◐ : Teilweise betrachtet ○ : Nahezu gar nicht betrachtet ■ : Bewertung nicht möglich									
Betrachtungsebene									
Netzwerk	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Fabrik	●	●	●	●	○	●	●	●	◐
Betriebsmittel	○	○	○	●	●	○	◐	●	○
Fokus									
Bewertung Veränderungsfähigkeit	○	●	●	●	●	◐	●	◐	●
initiale Planung Betrachtungsobjekt	●	◐	○	○	○	○	○	○	●
Planung Veränderungen	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Bewertung									
betriebswirtschaftlich	◐	●	●	●	◐	●	●	●	●
strukturell	○	○	○	◐	◐	○	○	○	○
Umfang									
Abbildung Betriebsmittel (Eigenschaften)	○	○	○	●	◐	○	○	○	○
Abbildung Betriebsmittel (Struktur)	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ermittlung Veränderungsbedarfe	●	○	○	○	○	○	○	○	○
Ermittlung alternativer Veränderungen	●	◐	○	○	○	○	◐	○	○
Bewertung alternativer Veränderungen	●	◐	○	○	○	○	●	○	◐
Berücksichtigung Unsicherheiten	○	◐	◐	●	●	◐	●	○	○
Allgemein									
Übertragbarkeit	●	●	■	●	●	●	●	●	●
Erweiterbarkeit	◐	●	■	●	●	○	◐	◐	◐
Integrationsfähigkeit	◐	●	■	◐	◐	◐	◐	●	◐
Transparenz	◐	◐	■	◐	◐	◐	◐	●	◐

Tabelle 1: Betriebsmittelrelevante Forschungsarbeiten im Bereich Veränderungsfähigkeit

Zunächst werden die Arbeiten hinsichtlich der ersten vier Kategorien Betrachtungsebene, Fokus, Bewertung sowie Umfang beschrieben. Die Abschätzung der allgemeinen Kriterien wird in den letzten Absätzen dieses Abschnitts erläutert.

DOHMS (2001) fokussiert in seiner Arbeit die Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionsstrukturen für variantenreiche Produkte mit kurzen Lebenszyklen. Kern der Arbeit ist eine Bewertungssystematik zur frühzeitigen Identifikation von Anpassungsbedarfen bzw. -möglichkeiten von Produktionsstrukturen sowie die Abbildung von Gestaltungsmaßnahmen. Dazu wurde ein betriebsbegleitendes Controlling-Instrument entwickelt, dem ein Kennzahlensystem zu Grunde liegt, um Adaptionbedarfe zu erkennen. Hierfür wird die Effizienz von bestehenden Produktionsstrukturen bewertet.

SESTERHENN (2003) erarbeitete eine Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme. Im Fokus liegen Produktionslinien, wobei sowohl monetäre als auch nicht monetäre Ziele bei der Bewertung herangezogen werden. Zu Beginn sind unterschiedliche Strukturalternativen festzulegen, die das Produktionssystem annehmen kann. Unsicherheiten finden in Form von unterschiedlichen Szenarien Berücksichtigung. Darüber hinaus basiert die wirtschaftliche Bewertung auf der Kapitalwertmethode. Bei dieser strategischen Bewertung werden die Lebenszykluskosten abgeschätzt. Eine lebenszyklusbegleitende Planung von Veränderungen ist bei SESTERHENN (2003) jedoch nicht vorgesehen, sie erfolgt initial. Das System wird also zu Beginn ausgelegt und nachfolgend evtl. notwendige Veränderungen nicht mehr beachtet.

VIELHABER (2004) definiert einen Wandlungsfähigkeitsindex. Dieser beinhaltet die Kosten sowie die Dauer der Wandlungen, die zu gewichten sind. Außerdem werden unterschiedliche Szenarien gebildet. Es erfolgt ebenfalls eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit mit dynamischen Wirtschaftsrechnungsverfahren. Im Fokus von VIELHABER (2004) liegen komplette Fabriken. Er geht allerdings auf viele Details zur Durchführung seines Vorgehens nicht ein, die für das Verständnis notwendig wären. Daher wird die Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

HEGER (2007) entwickelte, basierend auf den Arbeiten von HERNÁNDEZ MORALES (2003), eine Methodik zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Diese Objekte sind auf der Fabrikebene sowie den untergeordneten Ebenen verortet⁹, wobei Betriebsmittel enthalten sind. Zunächst wird eine an der Nutzwertanalyse angelehnte Wandlungspotentialwertanalyse durchgeführt. Betriebsmittel werden dabei anhand von 26 quantitativen und qualitativen Wandlungspotentialmerkmalen beschrieben. Der damit ermittelbare Ist-Wandlungs-

⁹ Die Definition sowie Beschreibung unterschiedlicher Fabrikebenen ist WIENDAHL ET AL. 2007 zu entnehmen.

potentialwert wird letztendlich mit einem Soll- sowie einem Plan-Wandlungspotentialwert verglichen. Darüber hinaus führt HEGER (2007) eine Wandlungswirtschaftlichkeitsanalyse durch. Basierend auf der Kapitalwertmethode (siehe Abschnitt 3.4.1) wird ein wandlungsspezifischer Kapitalwert berechnet, indem wandlungsspezifische Ein- sowie Auszahlungen quantifiziert und abgezinst werden. Dabei werden Unsicherheiten in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen integriert. Die Struktur des Betriebsmittels findet bei HEGER (2007) keine Berücksichtigung. Lediglich die Systemarchitektur wird in Form eines qualitativen Merkmals einbezogen, indem die Modularität abgeschätzt wird. Ferner ist die Planung von Rekonfigurationen nicht enthalten. Kosten für Rekonfigurationen fallen in den Bereich der wandlungsspezifischen Auszahlungen, wobei die Erhebung dieser Auszahlungen nicht erläutert wird.

DRABOW (2006) beschreibt eine Methode zur modularen Gestaltung und ganzheitlichen Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme, wobei der Fokus auf Betriebsmitteln liegt. Die Bewertung erfolgt anhand der Wandlungsbefähiger (siehe Fußnote 7, S. 9). Für jeden Wandlungsbefähiger definiert DRABOW (2006) mehrere Bewertungskriterien, für die mit unterschiedlichen Verfahren Punktwerte von 0 (niedrige Wandlungsfähigkeit) bis 10 (hohe Wandlungsfähigkeit) vergeben werden. Diese 14 Kriterien werden in Abhängigkeit ihrer Relevanz gewichtet und zu einem Wandlungsfähigkeitsindex verdichtet. In einer Kosten-Wandlungsfähigkeits-Analyse werden auch Investitions- und Betriebskosten (Personal, Abschreibung, Verzinsung, Energie, Unterhalt) berücksichtigt. Unsicherheiten fließen lediglich in Form von Risikostufen in die Bewertung ein. Kosten für Rekonfigurationen fallen in den Bereich der Unterhaltskosten, wobei DRABOW (2006) auf die Ermittlung dieser Unterhaltskosten nicht genauer eingeht. Ferner wird die Struktur der Betriebsmittel nicht direkt einbezogen. Sie wird lediglich als Bewertungskriterium „Systemarchitektur“ aufgenommen. In einer Matrix wird die Systemarchitektur auf Grund der physischen sowie funktionalen Unabhängigkeit eingeteilt und Punktwerte im Bereich von 0 bis 10 vergeben. Diese Unabhängigkeiten werden nur qualitativ abgeschätzt. Der Fähigkeit zu rekonfigurieren wird in Teilen durch das Kriterium „Schnittstellenstandardisierung“ Rechnung getragen. DRABOW (2006) bezieht in sein Vorgehen nicht die Planung von Rekonfigurationen bzw. Wandlungen, basierend auf dem Erkennen von Bedarfen, ein.

ALEXOPOULOS ET AL. (2007) beschreiben eine Algorithmus-basierte Methode zur Abschätzung der Flexibilität von Produktionssystemen über deren Lebenszyklus. Die Bewertung erfolgt durch Abzinsen der Zahlungsströme (z. B. Flächen-, Mit-

arbeiter-, Energie-, Ausschuss-, Wandlungskosten), wobei Unsicherheiten durch die Berücksichtigung einer Vielzahl von Marktszenarien einfließen, die sich hinsichtlich der Nachfragemengen unterscheiden. Ein System wird letztendlich als flexibel bezeichnet, wenn die Streuung über die Zahlungsströme der einzelnen Szenarien gering ist. Um die Vergleichbarkeit verschiedener Produktionssysteme sicherzustellen, wird für jedes Szenario der minimale Zahlungsstrom berechnet. Die Bewertung basiert lediglich auf der Prognose der Absatzzahlen. Außerdem liegt der Betrachtungsfokus nicht auf Ebene der Betriebsmittel und die Ermittlung der Wandlungskosten wird auch nicht dargelegt.

MÖLLER (2008) entwickelte eine Methodik zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Diese dient dem Nachweis des finanziellen Nutzens von wandlungsfähigen Systemen. Betrachtet werden einzelne produzierende Unternehmen, wobei die initiale Investitionsrechnung einen langfristigen Charakter aufweist. MÖLLER (2008) legt die Kapitalwertmethode zu Grunde und berücksichtigt Unsicherheiten in Form einer Risikoanalyse. Ferner werden Wandlungsmöglichkeiten mit Hilfe von Realoptionen bewertet. Im ersten Schritt der Methodik erfolgt eine Basisbewertung unter Annahme einer quasi-sicheren Umwelt. Unsicherheiten werden im zweiten Schritt einbezogen und dadurch ein dynamisches Grundmodell erstellt. Außerdem werden hier potenzielle Optionen quantitativ bewertet. Im dritten Schritt wird der Wert der Realoptionen ermittelt, wozu zunächst die Zahlungsströme der einzelnen Alternativen zu quantifizieren sind. Der Anwendungsaufwand für die Methodik nach MÖLLER (2008) ist hoch (KREBS 2012). Daher lässt sie sich tendenziell besser für Großprojekte anwenden (MÖLLER 2008). Darüber hinaus werden auch spezielle Software-Applikationen benötigt (z. B. PlantCalc[®] der Siemens[®] AG), was den Anwendungsaufwand weiter erhöht.

ROGALSKI (2009) erarbeitete eine Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. Dabei beschreibt er die Mengen-, Mix- und Erweiterungsflexibilität. Während der Betrachtungshorizont der Mengen- und Mixflexibilität kurzfristig ist, ist der der Erweiterungsflexibilität langfristig und ist mit Umbauten an den Anlagen verbunden. Diese Flexibilität ist die Fähigkeit eines Produktionssystems die Kapazität durch Veränderungen zu erhöhen und stellt somit einen Teilbereich der Rekonfigurationsfähigkeit dar. Dargestellt wird die Erweiterungsflexibilität anhand eines Prozentwertes. Ferner erfolgt eine monetäre Bewertung in Form einer Teilkostenrechnung. Mit dem Vorgehen lassen sich auch Betriebsmittel bewerten, nicht jedoch Rekonfigurationen planen.

PACHOW-FRAUENHOFER (2012) beschreibt ein Vorgehen zur Planung veränderungsfähiger Montagesysteme. Dieses beinhaltet ein Beschreibungsmodell zur Abbildung der relevanten Einflüsse auf den Veränderungsprozess. In Wirkmodellen werden darüber hinaus die Beziehungen zwischen den Segmenten des Beschreibungsmodells sowie auf die Einflussgrößen dargestellt. Mit einem Bewertungsmodell wird letztendlich die Systemalternative mit dem optimalen Maß an Veränderungsfähigkeit gemessen an dem Zielsystem identifiziert. PACHOW-FRAUENHOFER (2012) bewertet die monetären Aufwände zur Aktivierung veränderungsfähiger Eigenschaften von Systemelementen. Die Ermittlung dieser Eigenschaften sowie deren Kosten sind jedoch unklar. Der Fokus des Vorgehens liegt weder auf Betriebsmitteln noch auf der Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen.

Neben den bereits ausgeführten Kriterien wurden die Arbeiten auch hinsichtlich der allgemeinen Kriterien verglichen (siehe Tabelle 1). Dabei konnte das Vorgehen nach VIELHABER (2004) auf Grund der knappen Darstellung nicht einbezogen werden. Bei Erstellung der Methoden wurde auf Allgemeingültigkeit Wert gelegt, so dass die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Anwendungsfälle stets gegeben ist. Die Vorgehen nach SESTERHENN (2003), DRABOW (2006) und HEGER (2007) sind offen gehalten und weisen eine geringe Komplexität auf. Daher sind sie prinzipiell einfach erweiterbar. Dahingegen sind die Verfahren von DOHMS (2001), MÖLLER (2008) und ROGALSKI (2009) komplexer und somit schwieriger zu erweitern. ALEXOPOULOS ET AL. (2007) entwickelten in sich geschlossene Verfahren, weshalb die Erweiterbarkeit begrenzt ist. Die Integrationsfähigkeit der Methoden von SESTERHENN (2003) und ROGALSKI (2009) wird als hoch eingeschätzt, da die Verfahren ausführlich beschrieben wurden und einfach vom Anwender zu erschließen sind. Die anderen Verfahren erfordern das Einarbeiten in neue Bewertungsverfahren (z. B. Realoptionstheorie bei MÖLLER 2008) bzw. eigene Software-Applikationen oder die Anbindung an bestehende IT-Systeme (z. B. DOHMS 2001), wodurch die Integrationsfähigkeit eingeschränkt ist. Dies limitiert auch die Transparenz bzw. Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse einiger Methoden (z. B. ALEXOPOULOS ET AL. 2007). Bei anderen Verfahren sind außerdem Grenzwerte für Kennzahlen (z. B. zur Vergabe der Punktwerte bei DRABOW 2006) anwendungs- bzw. unternehmensspezifisch zu definieren (DRABOW 2006, HEGER 2007). Damit wird die allgemeine bzw. unternehmensübergreifende Vergleichbarkeit und somit die Transparenz reduziert. Die Transparenz ist ferner bei Verfahren eingeschränkt, bei denen die Ermittlung benötigter Kosten unklar ist (z. B. PACHOW-FRAUENHOFER 2012).

In diesem Abschnitt wurden ausgewählte Arbeiten aus den Bereichen der Planung, Bewertung und Gestaltung der Veränderungsfähigkeit vorgestellt. Sie stehen repräsentativ für eine Vielzahl weiterer Arbeiten, auf denen sie aufbauen bzw. welche sie ergänzen (siehe bspw. DÜRRSCHMIDT 2001, HERNÁNDEZ MORALES 2003, SCHUH ET AL. 2004, CISEK 2005, HEINECKER 2006, AMICO ET AL. 2006, ABDI 2009, FLESCHTZ 2010, BAQAI 2010, KLEMKE 2014, VELKOVA 2014).

Bei der Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen haben Rekonfigurationskosten einen hohen Einfluss auf die Auswahl der besten Alternative. Diese Kosten sowie Rekonfigurationen werden bei den präsentierten Methoden nicht beachtet oder lediglich abgeschätzt bzw. deren Ermittlung nicht dargelegt. Diese Kosten stellen einen Bestandteil der Lebenszykluskosten dar. Daher werden im folgenden Abschnitt Ansätze zur LCC hinsichtlich der Berücksichtigung bzw. Ermittlung von Rekonfigurationskosten untersucht.

2.2 Ansätze zur Lebenszykluskostenrechnung

Im Rahmen von Investitionsentscheidungsprozessen sind üblicherweise die Anschaffungskosten das zentrale Auswahlkriterium von Investitionsgütern, wengleich diese Kosten oftmals lediglich 10 bis 50 % der Lebenszykluskosten betragen (SCHWEIGER 2009A). Diesem Defizit kann durch Berücksichtigung aller Lebenszykluskosten als Entscheidungsgrundlage begegnet werden. Diese Kosten werden aufgenommen und zur Entscheidungsfindung auf den Zeitpunkt der Investitionsentscheidung zusammengefasst (bspw. mit der Kapitalwertmethode, siehe Abschnitt 3.4.1), um unterschiedliche Investitionsalternativen zu vergleichen oder die Vorteilhaftigkeit zu bewerten.

Die LCC¹⁰ umfasst neben den Anschaffungskosten auch die Folgekosten (ZEBOLD 1996), wobei zwischen Produzenten- und Kundensicht unterschieden wird. Während der Kunde möglichst die Lebenszykluskosten als Ganzes reduzieren möchte, da er das Investitionsgut einsetzt, liegt der Fokus des Produzenten üblicherweise auf der Reduktion Herstellungskosten, die einen Teil der Anschaffungskosten darstellen. Übernimmt der Produzent Gewährleistungen, kann es für

¹⁰ Ein weiteres Verfahren, das neben dem LCC alle auftretenden Kosten zur Bewertung heranzieht, ist Total Cost of Ownership (TCO, GEIBDÖRFER 2009). Einige Autoren differenzieren zwischen beiden Verfahren. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch der Auffassung der überwiegenden Mehrheit in der Fachliteratur gefolgt und beide Verfahren als synonym betrachtet (BÜNTING 2009).

ihn nichtsdestotrotz relevant sein auch Folgekosten gering zu halten. Bei Folgekosten handelt es sich bspw. um Betriebs-, Instandhaltungs- oder Verwertungskosten (EMBLEMSVÅG 2003). Neben Verfahren von einzelnen Autoren (siehe bspw. DHILLON 1988, GÖTZE 2000, EMBLEMSVÅG 2003, SCHWEIGER 2009B) existieren mit der VDI 2884, VDMA 34160 sowie DIN EN 60300-3-3 auch allgemein akzeptierte Normen und Vorschriften zur Ermittlung von Lebenszykluskosten.

Die VDI 2884 dient der Beschaffung, dem Betrieb sowie der Instandhaltung von Produktionsmitteln aus Betreiber- bzw. Kundensicht unter der Anwendung der LCC. In dieser Norm werden im Bereich der Instandhaltungskosten Änderungskosten an der Anlage aufgeführt. Zur Ermittlung der Instandhaltungskosten wird auf VDI 2885 verwiesen. Dort ist jedoch kein Vorgehen zur Berechnung der Änderungskosten zu finden.

VDMA 34160 beinhaltet die Definition sowie die Prognose von Lebenszykluskosten bei Maschinen, Anlagen und Komponenten. Sie fokussiert sowohl Produzenten als auch Kunden. Im Rahmen der Norm ist ein Prognosemodell zur Ermittlung der Lebenszykluskosten zu erstellen. Dabei sind Rekonfigurationen unzureichend integriert und nicht eindeutig beschrieben. „Umbauten, die nicht unter die Instandhaltung fallen, (...) werden einer Verwertung gleichgesetzt und beenden den jeweiligen Betrachtungszeitraum“ (VDMA 34160, S. 3). Somit ist das Vorgehen mehrfach anzuwenden, wenn das Betriebsmittel in seinem Lebenszyklus rekonfiguriert wird.

DIN 60300-3-3 zielt auf die Ermittlung der Lebenszykluskosten durch die Produzenten und Kunden ab. Dazu führt sie drei Methoden zur Abschätzung von identifizierten Kostenelementen an: die „ingenieurmäßige Kostenmethode“ zur Ermittlung von wiederkehrenden Kosten, die „analoge Kostenmethode“ zur Ableitung anhand von ähnlichen Kosten sowie die „parametrische Kostenmethode“ zur Ermittlung der Kosten anhand von Parametern und Variablen. Eine Berechnung von Rekonfigurationskosten ist bei den drei Methoden in DIN 60300-3-3 nicht dargelegt.

DERVISOPOULOS (2011) entwickelte eine Methode zur lebenszyklusbezogenen Optimierung von Werkzeugmaschinen. Es werden ein hierarchisches Strukturmodell ähnlich zum hierarchischen Betriebsmittelmodell (siehe Seite 5) aufgestellt, ohne jedoch Wechselwirkungen zwischen Bauteilen auf der gleichen hierarchischen Ebene abzubilden, und Lebenszykluskosten den Bauteilen zugeord-

net. Es wird nicht explizit auf Rekonfigurationskosten zur Anpassung der Anlagen an neue Anforderungen eingegangen. Außerdem liegen im Fokus der Arbeit von DERVISOPOULOS (2011) ausschließlich spanende Werkzeugmaschinen.

2.3 Weitere betriebsmittelrelevante Ansätze

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Methoden in den Bereichen der Fabrikplanung bzw. der Planung von Montagesystemen, der Anlagenwirtschaft sowie des Instandhaltungsmanagements bzgl. der Berücksichtigung von Rekonfigurationen untersucht.

BULLINGER & AMMER (1986) beschreiben ein Vorgehen zur Planung eines kompletten Montagesystems, ohne speziell auf die Planung von einzelnen Betriebsmitteln einzugehen. Es umfasst die sechs Phasen Konzeption, Ablaufplanung, Montagesystementwurf, Ausarbeitung, Realisierung sowie Betrieb. Die Betriebsmittel bzw. Montagestationen werden im Rahmen der Ausarbeitung konzipiert. Das Vorgehen lässt sich für Neu- sowie Umplanungen von Montagesystemen heranziehen. Es wird dabei jedoch nicht auf die Rekonfiguration von einzelnen Betriebsmitteln eingegangen, mit dem Erkennen von Bedarfen sowie der Ermittlung und Auswahl von Alternativen.¹¹

Einen allgemeineren sieben-phasigen Planungsansatz stellt die VDI 5200 bereit, da sie den kompletten Fabrikplanungsprozess fokussiert. Die Planung der Betriebsmittel erfolgt in der dritten Phase, der Konzeptplanung. Obwohl bei dem Vorgehen auch Umplanungen abgebildet werden, liegt eine Rekonfigurationsplanung nicht im Fokus. Da diese Norm sehr allgemein gehalten ist, wird sie spezifischen Anforderungen zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen nicht gerecht.

NEBL (2006) beschreibt darüber hinaus einen organisatorischen Rahmen zur Anlagenwirtschaft. Die Arbeit ist stark wirtschaftswissenschaftlich geprägt und geht nicht auf technische Aspekte ein. So werden zwar im Rahmen der Instandsetzung allgemein auch Verbesserungen der Eigenschaften der Anlagen bzw. Betriebsmittel behandelt, die das technische Niveau der Anlage steigern. Damit gehen diese Verbesserungen über die Instandhaltung hinaus, die üblicherweise lediglich

¹¹ Weitere Vorgehen zur Planung sind bspw. in REFA (1990) sowie bei MERZ (1987), LOTTER (1992), EVERSHEIM (1997), SPUR & KRAUSE (1997) und WHITNEY (2004) beschrieben. Keines berücksichtigt Rekonfigurationen an Betriebsmitteln bzw. deren Planung.

die Wiederherstellung des Anlagenzustands zum Ziel hat. Wie allerdings die Kosten hierfür ermittelt werden oder sich technische Aspekte, wie die Machbarkeit, darstellen wird nicht erläutert. Die Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen sowie die Ermittlung von Rekonfigurationsalternativen werden nicht dargestellt.

RASCH (2000) zeigt außerdem Erfolgspotenziale der Instandhaltung auf. Dabei werden auch Verbesserungen an der Anlage behandelt, die eine Rekonfiguration im Sinne der hier vorliegenden Arbeit darstellen. Allerdings wird weder auf die Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen noch die anwendungsorientierte Berechnung deren Kosten eingegangen. Wie auch die Arbeit von NEBL (2006) stellen sich die Ausführungen von RASCH (2000) sehr wirtschaftswissenschaftlich dar ohne auf technische Aspekte einzugehen.

2.4 Ableitung des Handlungsbedarfs

Forschungsarbeiten im Bereich der Veränderungsfähigkeit (siehe Tabelle 1) fokussieren zumeist Fabrikebenen, die sich über der für diese Arbeit definierten Betriebsmittel-Ebene befinden (z. B. DOHMS 2001, SESTERHENN 2003, VIELHABER 2004, ALEXOPOULOS ET AL. 2007). Die Methoden dienen primär der Bewertung der Veränderungsfähigkeit des jeweils betrachteten Objekts. Diese erfolgt zumeist betriebswirtschaftlich, wobei mit Ausnahme von DRABOW (2006) und HEGER (2007) stets spezifische Veränderungen oder nur einzelne Rekonfigurationstreiber bzw. Einflussfaktoren (siehe bspw. ALEXOPOULOS ET AL. 2007, ROGALSKI 2009, ABDI 2009) in die Bewertung einfließen. Die Veränderungsfähigkeit wird somit nicht als allgemeine Fähigkeit beschreiben (siehe Abschnitt 1.3.1). Darüber hinaus wird die Struktur lediglich bei zwei Methoden als qualitatives, subjektiv abgeschätztes Kriterium in die Bewertung einbezogen (DRABOW 2006, HEGER 2007). Da die Veränderung von Anlagenteilen Auswirkungen auf andere Teile der Anlage haben kann, sind bei Bewertung der Rekonfigurationfähigkeit von Betriebsmitteln Abhängigkeiten zwischen Bestandteilen der Anlage bzw. deren Aufbau, also die Struktur, einzubeziehen. Außerdem zielen die Verfahren nicht auf die Ermittlung von Veränderungsbedarfen und alternativer Veränderungsmöglichkeiten sowie deren Bewertung ab. Sie sind zumeist strategisch ausgerichtet, wobei die operative Durchführung bzw. Planung von Rekonfigurationen nicht behandelt wird.

Im Bereich der LCC-Verfahren finden Rekonfigurationskosten indirekt Berücksichtigung, deren Ermittlung wird jedoch nicht dargelegt. Sie werden erwähnt und grob abgeschätzt, aber nicht explizit behandelt. Sie fallen oftmals in den Bereich der Instandhaltungskosten. Da die Instandhaltung üblicherweise dem Funktionserhalt dient, widerspricht dies der in Abschnitt 1.3.1 gegebenen Definition von Rekonfigurationen. Bei den LCC-Verfahren erfolgt zudem keine Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen sowie alternativen Rekonfigurationen. Somit sind Rekonfigurationen zur Erfüllung der in dieser Arbeit definierten Zielsetzung unzureichend verankert.

Bei den Planungsvorgehen existieren keine Methoden, die speziell die Betriebsmittelplanung fokussieren. Außerdem wird die Rekonfiguration von Betriebsmitteln nicht behandelt. Im Bereich der Anlagenwirtschaft und Instandhaltung liegt der gleiche Sachverhalt vor. Die Arbeiten hier sind darüber hinaus sehr wirtschaftswissenschaftlich geprägt und gehen nicht auf technischen Randbedingungen ein. Somit werden in diesem Bereich die Bedarfsermittlung sowie die Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen noch unzureichend behandelt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bestehende Ansätze Rekonfigurationen unzureichend berücksichtigen und nicht zur Erfüllung der Zielsetzung dieser Arbeit herangezogen werden können. Mit ihnen können produzierende Unternehmen Betriebsmittelrekonfigurationen weder ermitteln noch planen. Daher ist eine Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen zu erarbeiten.

3 Grundlagen

3.1 Studie über Einflussfaktoren auf Betriebsmittel

Wie bereits in Abschnitt 1.3 geschildert wurde, wirken auf Betriebsmittel unterschiedliche Einflussfaktoren, die in einer Studie untersucht wurden (siehe Abbildung 3) (KARL ET AL. 2011, KARL ET AL. 2012A).¹² Ziel der Studie war die Identifikation betriebsmittelrelevanter Einflussfaktoren sowie deren Spezifikation. Nachfolgend werden ausgewählte Studienergebnisse vorgestellt, die Relevanz für die vorliegende Arbeit haben. In diesem Kontext sind insbesondere von Interesse wie die Faktoren prognostiziert und wo Informationen zu ihnen ermittelt werden können sowie in welcher Form sie zu berücksichtigen sind.

Die Einflussfaktoren können hinsichtlich verschiedener Kriterien differenziert werden (siehe Tabelle 2). Hier wird unterschieden, ob sie zyklisch oder nicht-zyklisch (ZAEH ET AL. 2009) sowie unternehmensinternen oder -externen Ursprungs sind (NEUHAUSEN 2001). Die Zyklizität von Faktoren kann zur Prognose herangezogen werden (siehe Lebenszykluskonzepte in Abschnitt 3.5.2). Die Kenntnis des Ursprungs unterstützt in zweierlei Hinsicht. Erstens gibt sie Hinweise darauf, wo Informationen zu dem jeweiligen Faktor ermittelt werden können. Zweitens lassen sich unternehmensinterne Faktoren einfacher als externe beeinflussen (ZAEH ET AL. 2010B), falls abzuwägen ist, ob ein Betriebsmittel angepasst oder der Einflussfaktor geändert werden soll.¹³ Einige Einflussfaktoren können sowohl internen als auch externen Ursprungs sein.

Erkennbar ist, dass nicht-zyklische Einflussfaktoren eine höhere Relevanz aufweisen. Die Absatzzahlen sind zyklisch, da diese als Ausprägung eines Produktlebenszyklus dargestellt werden können (siehe Abbildung 10). Sie sind auf Grund des heutzutage bestehenden, nachfragegetriebenen Käufermarkts (PICOT ET AL. 2003) extern angesiedelt. Produktionstechnologien sind ebenfalls zyklischer Art (siehe Abbildung 9). Sie sind sowohl unternehmensinternen als auch -externen Ursprungs, da die Entwicklung im Unternehmen sowie extern (z. B. in Universitäten) durchgeführt werden kann.

¹² Weiterführende Informationen zu der Studie wurden bereits in Abschnitt 1.3 angegeben.

¹³ Die Abwägungen zur Beeinflussung eines Einflussfaktors werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Einflussfaktoren stellen hier zu erfüllenden Anforderungen an das Betriebsmittel.

		zyklisch	nicht-zyklisch	unternehmensintern	unternehmensextern	
Produktionskosten	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="width: 50%; height: 100%; background: linear-gradient(to top, #ccc, #000); clip-path: polygon(50% 0%, 50% 100%);"></div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); font-weight: bold; padding: 0 10px;">Relevanz</div> </div>		X	X		
Prozesssicherheit und -stabilität			X	X		
Zeiten (Rüst-/ Durchlaufzeiten)				X	X	
Flexibilität (Stückzahl- und Variantenflexibilität)				X	X	
Absatzzahlen			X			X
Fertigungslayout und -reihenfolge			X		X	
Produktionstechnologien			X		X	X
Qualifikation der Mitarbeiter			X		X	
Unternehmensentwicklung			X		X	
Wettbewerb				X		X
Branchenentwicklung			X			X
politische Restriktionen			X			X
Altersstruktur der Mitarbeiter			X		X	
Konjunkturdaten			X			X
Lebensdauer der Fabrikgebäude			X		X	

Tabelle 2: Spezifizierte betriebsmittelrelevante Einflussfaktoren differenziert nach ihrer Relevanz (gemäß Studie)

Um Änderungen der Faktoren frühzeitig zu erkennen, ist die Kenntnis wichtig, ob die Einflussfaktoren über einen längeren oder kürzeren Zeitraum zu betrachten sind. Daher wurde in der Studie für ausgewählte Einflussfaktoren ermittelt, ob sie für die strategische oder operative Fabrikplanung heranzuziehen sind. Dabei wurden betriebsmittelspezifische Faktoren zu dem Einflussfaktor „Produktionsanlagen“ zusammengefasst, so dass 12 Faktoren zur Auswahl standen. Obwohl die Möglichkeit bestand, wurden durch die Studienteilnehmer keine weiteren Faktoren hinzugefügt. In diesem Kontext fällt auf, dass zyklische Faktoren einen höheren Einfluss auf die strategische Planung haben, wie bspw. die Produktionsanlagen (siehe Abschnitt 3.5.2). Nicht-zyklische Faktoren werden dagegen tendenziell zur operativen Planung herangezogen (siehe Tabelle 3).

		zyklisch	nicht-zyklisch
Unternehmensentwicklung	Betrachtungsfokus eher strategisch eher operativ	X	
Branchenentwicklung		X	
Produktionstechnologien		X	
Altersstruktur der Mitarbeiter		X	
Produktionsanlagen		X	
politische Restriktionen		X	
Wettbewerb			X
Konjunkturdaten		X	
Qualifikation der Mitarbeiter		X	
Produktionskosten			X
Flexibilität (Stückzahl- und Variantenflexibilität)			X
Absatzzahlen		X	

Tabelle 3: Einflussfaktoren differenziert nach ihrer Bedeutung für die strategische bzw. operative Fabrikplanung (gemäß Studie)

3.2 Begründung der Methodenauswahl

In diesem Abschnitt wird die Auswahl der in den Abschnitten 3.3 bis 3.6 beschriebenen, dieser Arbeit zu Grunde liegenden Methoden und Werkzeuge kurz begründet. Weiterführende Informationen, bspw. zu exemplarisch genannten Alternativen, sind der jeweils angegebenen Fachliteratur zu entnehmen.

Als erstes Teilziel wurde definiert, dass Vorgehensweisen zum frühzeitigen Erkennen von Rekonfigurationsbedarfen zu erarbeiten sind (siehe Abschnitt 1.2). Hierfür sind die unterschiedlichen Faktoren zu prognostizieren, um zukünftige Entwicklungen zu antizipieren. Dazu werden in Abschnitt 3.5 verschiedene Verfahren vorgestellt, wobei keine Empfehlung zur Verwendung eines speziellen Verfahrens gegeben werden kann. Abhängig von dem jeweiligen Faktor, den verfügbaren Daten und Informationen sowie dem zeitlichen Horizont ist ein passendes Vorgehen zu wählen. Darüber hinaus heben KLEIN & SCHOLL (2004) hervor, dass Prognoseverfahren anhand der grundsätzlichen Eignung, der Prognosegenauigkeit sowie der Prognosekosten auszuwählen sind. Eine Beschreibung unterschiedlicher Prognoseverfahren sowie eine Einteilung dieser ist bei GÖTZE (2008) zu finden. Dort ist angegeben, ob das formalgebende Modell analytisch

oder intuitiv ist, sich die Methode für die kurze, mittlere oder lange Frist eignet und ob es für eine Singulär- oder eine Systemprognose heranziehen lässt. Quantitative Verfahren eignen sich eher zur kurz- und mittelfristigen Prognose (PERRIDON ET AL. 2009). Für eine langfristige Vorausschau sind tendenziell die Szenario-Technik sowie Lebenszyklusmodelle geeignet (MIETZNER 2009).

Ferner sind bei der Bewertung sowie der Prognose zukünftig auftretende Kosten abzuschätzen. Dabei ist den auftretenden Unsicherheiten Rechnung zu tragen. Dazu können bspw. das Korrekturverfahren, die Sensitivitätsanalyse, die Risikoanalyse, das Entscheidungsbaumverfahren oder auch die Realoptionstheorie herangezogen werden.¹⁴ Mit dem Korrekturverfahren werden Risiken anhand von „einfachen Faustregeln“ durch Zu- bzw. Abschläge einbezogen, wobei ein oder mehrere Eingangsparameter berücksichtigt werden (WÖHE & DÖRING 2010, S. 562-563). Im Rahmen der Entscheidungsbaummethode wird die Problemstellung mit einem Graphen abgebildet. Unterschiedliche Handlungsalternativen werden hierbei mit Entscheidungsknoten und (unsichere) Ereignisse über Zufallsereignisknoten abgebildet (WÖHE & DÖRING 2010). Eine Realoption verbrieft „(...) das Recht, aber nicht die Verpflichtung (...) ein bestimmtes Gut (...) während eines bestimmten Zeitraumes zu einem bestimmten Preis zu kaufen (...) oder zu verkaufen (...)“ (ADAMS & RUDOLF 2009). Unternehmen können damit zukünftigen Unsicherheiten entgegenwirken, indem sie sich vorhalten später Handlungsspielräume zu nutzen. Realoptionen werden nur ausgeübt, wenn wirtschaftliche Vorteile entstehen. Sie weisen einen Wert auf, der von unterschiedlichen Einflussgrößen abhängt, wie unsicheren zukünftigen Entwicklungen. Je höher die zukünftige Unsicherheit ist, desto höher ist auch der Wert der Option (GÖTZE 2008).

Beim Korrekturverfahren werden lediglich Gefahren und keine Chancen abgebildet (GÖTZE 2008). Außerdem werden Risiken zumeist pauschal geschätzt sowie nur summarisch erfasst, wobei die Gefahr der Doppelerfassung entsteht und die Aussagekraft des errechneten Zielwerts nur gering ist (GÖTZE 2008, WÖHE & DÖRING 2010, POGGENSEE 2009). Ferner wird die denkbar schlechteste Zukunftslage als relevant erachtet (KRUSCHWITZ 2009). Das Entscheidungsbaumverfahren kann lediglich monetäre Werte berücksichtigen und erfordert einen

¹⁴ Zur weitergehenden Darstellung des Korrekturverfahrens, des Entscheidungsbaumverfahrens sowie der Realoptionstheorie wird auf die gängige Fachliteratur verwiesen (z. B. COPELAND & ANTIKAROV 2001, HOMMEL 2001, MUN 2006, GÖTZE 2008, POGGENSEE 2009, ADAMS & RUDOLF 2009, KRUSCHWITZ 2009, PERRIDON ET AL. 2009, WÖHE & DÖRING 2010).

relativ hohen Planungsaufwand, wobei es bei einem hohen Datenumfang schnell unübersichtlich wird (WÖHE & DÖRING 2002, GÖTZE 2008). Daher ist es nur durchführbar, falls relativ wenige unsichere Eingangsparameter vorliegen (GÖTZE 2008). Die Realloptionstheorie wird darüber hinaus in der produktionstechnischen Forschung verwendet (siehe bspw. SUDHOFF 2008, MÖLLER 2008, ABELE ET AL. 2006B, AMICO ET AL. 2006), ist aber mit hohem Aufwand verbunden und hat sich daher in der produktionstechnischen Praxis noch nicht durchgesetzt (KREBS 2012).

Daher wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die in Abschnitt 3.6.1 vorgestellte Risikoanalyse mit der Erweiterung um qualitative Faktoren nach KREBS (2012) herangezogen, um Unsicherheiten abzubilden. Sie ist von Vorteil, da eine Vielzahl unsicherer Faktoren wirken kann, die nicht ausschließlich monetärer Art sind (z. B. Dauer der Stillstandzeiten zur Durchführung einer Rekonfiguration). Außerdem handelt es sich auf Grund des hohen Investitionsvolumens von Betriebsmitteln um große Projekte. Insbesondere im Rahmen von Großprojekten wird die Risikoanalyse zur Abschätzung von Unsicherheiten positiv bewertet (WÖHE & DÖRING 2010). Zur Ermittlung von kritischen Faktoren wird die Sensitivitätsanalyse als Ergänzung eingebunden (siehe Abschnitt 3.6.2).

Als zweites Teilziel für diese Arbeit wurde festgelegt, dass Verfahren zur Generierung von alternativen Rekonfigurationen zu erarbeiten sind. Die Darstellung des strukturellen Aufbaus von Betriebsmitteln ist dabei wichtig, da die Struktur Möglichkeiten für Rekonfigurationen bzw. auch die Aufwände hierfür determiniert (ULRICH 1995).¹⁵ Die Struktur beschreibt den Aufbau von Betriebsmitteln mit den Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen. Diese Bauteile, die untereinander interagieren bzw. Abhängigkeiten aufweisen, sind über physikalische Schnittstellen verbunden (ULRICH 1995). Zur Modellierung der Struktur von Systemen bieten sich Design-Struktur-Matrizen (siehe z. B. LINDEMANN ET AL. 2009) oder auch graphentheoretische Betrachtungsweisen (siehe z. B. DIESTEL 2006) an.

Zur Darstellung der Betriebsmittelstruktur werden Produktarchitektur-DSMs herangezogen (siehe Abschnitt 3.3.1), da mit DSMs die direkte Modellerstellung einfacher als mit Graphen ist (LINDEMANN ET AL. 2009). Außerdem wurden sie

¹⁵ Zur Abbildung von Betriebsmitteln existieren unterschiedliche Modelle, wie bspw. die hierarchische Gliederung von Montageanlagen nach JONAS (2000) und das hierarchische Betriebsmittelmodell nach ZAEH ET AL. (2006) (siehe Seite 6). Diese stellen den hierarchischen, nicht jedoch den strukturellen Aufbau von Betriebsmitteln dar.

bereits erfolgreich zur Modellierung von Produkten herangezogen, wodurch eine Übertragbarkeit auf Betriebsmittel gegeben ist. Mit DSMs lassen sich darüber hinaus die Auswirkungen von Bauteiladaptionen auf andere Bauteile ermitteln. Zur Abbildung der Struktur werden die Bauteile des Betriebsmittels mit ihren Abhängigkeiten untereinander modelliert.

Ferner umfasst das zweite Teilziel die Notwendigkeit zur Erstellung von Verfahren, um alternative Rekonfigurationen darzustellen. Dabei sind u. a. die zu adaptierenden Bauteile mit ihren Abhängigkeiten untereinander abzubilden. Es werden Graphen hierfür herangezogen, da diese Abbildungen aus dem Modell der Betriebsmittelstruktur abgeleitet werden und sie nicht direkt zu erstellen sind. Ein weiterer Grund ist das einfachere Verstehen von graphenbasierten Darstellungen (LINDEMANN ET AL. 2009).

Das dritte Teilziel bezieht sich auf die Festlegung von Bewertungsvorschriften für die Rekonfigurationsalternativen, um die beste Alternative auszuwählen. Ferner sollen strategische Aspekte bei der zu entwickelnden Methodik betrachtet werden. Daher treten Kosten zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf, die zum Vergleich von Alternativen unter Berücksichtigung von Zinseffekten auf einen Zeitpunkt zu beziehen sind. Hierfür existieren im Bereich der dynamischen Investitionsrechnung unterschiedliche Methoden¹⁶, denen entweder ein einheitlicher oder von Periode zu Periode unterschiedliche Zinssätze zu Grunde liegen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kapitalwertmethode (siehe Abschnitt 3.4.1) angewandt, da sie das am stärksten akzeptierte Verfahren ist und der Rechenaufwand gering ist (GÖTZE 2008). Außerdem ist sie in der Industrie weit verbreitet (KREBS 2012).

Darüber hinaus werden zur Bewertung neben dem Kapitalwert in dieser Arbeit weitere Kennzahlen ermittelt, die zur Entscheidungsfindung zusammenzufassen sind. Dazu ist eine multikriterielle Bewertung heranzuziehen, wofür unterschiedliche Verfahren existieren, wie bspw. die Nutzwertanalyse, das Entscheidungsmodell nach GHANDFOROUGH ET AL. (1985), der AHP, die Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) oder auch die Multi-Attributive Nutzentheorie (GÖTZE 2008).¹⁷ Bei PROMETHEE erfolgen,

¹⁶ An dieser Stelle seien die Kapitalwertmethode, die Annuitätenmethode, die interner Zinssatz-Methode, die dynamische Amortisationsrechnung, die Vermögensendwertmethode, die Sollzinssatzmethode oder die Methode der vollständigen Finanzpläne genannt (GÖTZE 2008,). Informationen hierzu sind der gängigen Fachliteratur zu entnehmen (z. B. GÖTZE 2008, PERRIDON ET AL. 2009, WÖHE & DÖRING 2010).

¹⁷ Zur Erläuterung der Verfahren PROMETHEE sowie Multi-Attributive Nutzentheorie wird auf die gängige Fachliteratur verwiesen (z. B. FIGUEIRA ET AL. 2005, GÖTZE 2008).

wie beim AHP, Paarvergleiche und es lassen sich auch unvollständige Informationen integrieren. Dies ist in dieser Arbeit jedoch nicht notwendig. Außerdem dient dieses Verfahren eher zur Entscheidungshilfe als zur Bestimmung einer Optimallösung (GÖTZE 2008). Die Multi-Attributive Nutzentheorie ist der Nutzwertanalyse ähnlich, weist jedoch eine höhere nutzentheoretische Fundierung auf. Bei ihr bestehen aber die Probleme der Datenermittlung sowie der strengen Anwendungsvoraussetzungen (GÖTZE 2008). Daher werden dem Nutzer der in dieser Arbeit entwickelten Methodik mit der Nutzwertanalyse sowie dem AHP (siehe Abschnitt 3.4.2) zwei Verfahren zur Verfügung gestellt, aus denen er abhängig von seinen Präferenzen ein Verfahren auswählen kann. Während der Rechenaufwand des AHP über dem der Nutzwertanalyse liegen, weist dieses Verfahren auch ein strukturierteres Vorgehen auf und es erfolgt eine Konsistenzüberprüfung, wodurch eine höhere Transparenz und somit Akzeptanz der Ergebnisse erreicht wird. Es ist möglich die Verfahren miteinander zu kombinieren.

3.3 Ausgewählte Werkzeuge zur Darstellung von Strukturen

3.3.1 Design-Struktur-Matrizen

Matrizenbasierte Methoden werden herangezogen, um Systeme zu modellieren und zu analysieren (siehe bspw. STEWARD 1962, KEHAT & SHACHAM 1973, WARFIELD 1973, STEWARD 1981, LINDEMANN ET AL. 2009). STEWARD (1981) verwendete matrizenbasierte Methoden für die Strukturanalyse von Produktentwicklungsprozessen und gebrauchte hierfür den Begriff DSM (Design-Struktur-Matrix, engl. design structure matrix), wobei in der Literatur die Begriffe „dependency structure matrix“ oder „dependency source matrix“ synonym verwendet werden (BROWNING 2001). DSMs finden bei der Entwicklung von Produkten, Prozessen und Organisationen, bei der Abbildung von Projektstrukturen und Informationsflüssen, der Visualisierung voneinander abhängiger Informationen in der Produktentwicklung oder der Darstellung von Produkten Anwendung (PIMMLER & EPPINGER 1994, BROWNING 2001, LINDEMANN ET AL. 2009). Sie werden durch die Strukturdarstellung u. a. zur Komplexitätsreduktion beim Verstehen von komplexen Systemen herangezogen. Sie erlauben es, vernetzte Systeme anschaulich und kompakt zu beschreiben, indem die Beziehungen zwischen den Systemelementen abgebildet und Schnittstellen aufgezeigt werden.

DSMs sind quadratische Matrizen, deren Elemente auf der Ordinate den Elementen auf der Abszisse entsprechen. Es werden Abhängigkeiten innerhalb eines Bereichs bzw. einer Domäne betrachtet (engl. intra-domain matrix) (LINDEMANN ET AL. 2009). Komponenten oder Personen können bspw. eine Domäne repräsentieren. Beziehungen zwischen den Elementen werden durch entsprechende Einträge in der Matrix festgehalten (siehe Abbildung 6). Elemente der Matrix können bspw. physische Produktkomponenten, Leistungsmerkmale, Anforderungen der Entwicklungsabteilung oder Prozessfunktionen sein (LINDEMANN ET AL. 2009).

beeinflusst ↑	ω^1	ω^2	ω^3	ω^4	ω^5	ω^6	:
Element E ₁			X	X		X	
Element E ₂				X			
Element E ₃					X	X	
Element E ₄	X				X		
Element E ₅		X					
Element E ₆				X			
...							

Abbildung 6: Beispielhafte binäre, statische Design-Struktur-Matrix (DSM)

EPPINGER & BROWNING (2012) unterscheiden zwischen den Grundtypen statische, zeitbasierte sowie Multi-Domänen-DSM. In den Bereich der statischen DSMs fallen Produkt- sowie Organisationsarchitektur-DSMs (BROWNING 2001, EPPINGER & BROWNING 2012). Dahingegen zeigen zeitbasierte DSMs durch die Reihenfolge der Zeilen und Spalten einen Zeitverlauf auf (BROWNING 2001). Mit ihnen werden Prozessarchitekturen abgebildet (EPPINGER & BROWNING 2012). Multi-Domänen-DSMs umfassen Produkt-, Organisations- und Prozessarchitektur-DSMs in ihren Abhängigkeiten untereinander (EPPINGER & BROWNING 2012). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Betriebsmittel mit DSMs modelliert. Daher werden statische Produktarchitektur-DSMs herangezogen. In diesen können nach EPPINGER & BROWNING (2012) Subsysteme, Komponenten oder Funktionen mit ihren Schnittstellen dargestellt werden.

Darüber hinaus können DSMs weiter in binäre und numerische DSMs differenziert werden (EPPINGER & BROWNING 2012). Während binäre DSMs Auskunft geben, ob zwischen zwei Elementen eine Beziehung besteht, enthalten numerische DSM noch detailliertere Informationen über die Beziehung, wie bspw. die Beziehungsstärke oder die Höhe der Beeinflussung (LINDEMANN ET AL. 2009).

Zur Analyse von DSMs existiert eine Vielzahl von Kennzahlen (siehe bspw. KREIMEYER 2010). Die Analyse identifiziert Defizite und zeigt damit Verbesserungspotenziale für bspw. Schnittstellen, Informationsflüsse oder Strukturen auf.¹⁸

3.3.2 Graphen

Graphen werden durch eine Menge an Knoten und Kanten gebildet (siehe Abbildung 7) (DIESTEL 2006). Sie visualisieren komplexe Problemstellungen (TITTMANN 2003). Durch die graphenbasierte Abbildung können Zusammenhänge leichter erfassen werden, wodurch das Systemverständnis steigt (LINDEMANN ET AL. 2009).¹⁹

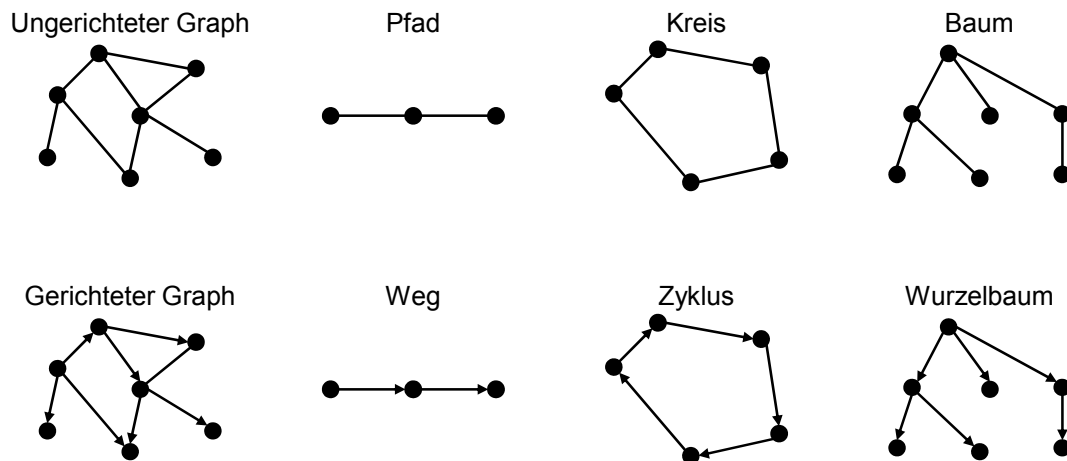


Abbildung 7: Darstellung unterschiedlicher Graphen (in Anlehnung an WERNERS 2006)

In einem Graphen verkörpern die Knoten die Elemente, die durch Kanten verbunden bzw. zueinander in Relation gesetzt werden, wobei zwischen gerichteten und ungerichteten Graphen unterschieden wird (siehe Abbildung 7). Während für ungerichtete Graphen keine Reihenfolge definiert ist, existieren für gerichtete Graphen ein Anfangs- und ein Endpunkt (WERNERS 2006). Gerichtete Kanten werden als Pfeile dargestellt. Direkt abhängige bzw. miteinander verbundene Knoten werden als adjazent bezeichnet (DIESTEL 2006).

¹⁸ Weiterführende Informationen zu DSMs sowie deren Analyse können der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden (siehe bspw. LINDEMANN ET AL. 2009, EPPINGER & BROWNING 2012)

¹⁹ Weiterführende Informationen zu Graphen sowie zu deren Analyse und zur Graphentheorie können der entsprechenden Grundlagenliteratur entnommen werden (siehe bspw. FOULDS 1992, MELNIKOV ET AL. 1994, TITTMANN 2003, DIESTEL 2006, WERNERS 2006).

DSMs lassen sich direkt in Graphen sowie Graphen in DSMs überführen. Die Kanten eines Graphen stellen Einträge in der DSM und die Knoten die Elemente der DMS dar (siehe Abbildung 6). Bezogen auf die DSM sind ungerichtete Graphen symmetrische Matrizen.

3.4 Ausgewählte Verfahren zur Unterstützung von Investitionsentscheidungen

Bei der Auswahl der besten Rekonfigurationsalternative sind die zur Durchführung der Rekonfiguration anfallenden Kosten zu berücksichtigen. Durch die Auswahl wird die Entscheidung über eine Investition in das Betriebsmittel gefällt. Investitionsentscheidungen sind üblicherweise mit einem hohen Kapitaleinsatz, einer langfristigen Kapitalbindung sowie weitreichenden Wirkungen verbunden (WÖHE & DÖRING 2010). Daher sind sie sorgfältig abzusichern. Aus diesem Grund werden hier die Kapitalwertmethode sowie multikriterielle Bewertungsverfahren zur Entscheidungsfindung vorgestellt.

3.4.1 Kapitalwertmethode

Im Rahmen der Investitionsrechnung existieren statische und dynamische Verfahren. Während statische Verfahren der Investitionsrechnung lediglich einen Zeitabschnitt berücksichtigen, basiert die Bewertung mit dynamischen Verfahren auf mehreren Perioden (GÖTZE 2008). Dabei werden Zinseffekte berücksichtigt, die auftreten, wenn Ein- bzw. Auszahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen (POGGENSEE 2009).

Bei der Kapitalwertmethode handelt es sich um ein weit verbreitetes und akzeptiertes Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung. Sie wird verwendet, um Zahlungsreihen, die aus Ein- und Auszahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten bestehen, auf einen Zeitpunkt zu beziehen. Dies dient bspw. der Bewertung der Vorteilhaftigkeit oder dem Vergleich unterschiedlicher Zahlungsreihen bzw. Investitionen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Meinung der Fachliteratur gefolgt und vereinfachend von einem konstanten Kalkulationszinssatz ausgegangen (WÖHE & DÖRING 2010, GÖTZE 2008), wobei die Einbeziehung unterschiedlicher Zinssätze im Rahmen der Kapitalwertmethode generell möglich ist.

Der Kapitalwert (NPV, engl. Net Present Value) ist in Formel (1) definiert (in Anlehnung an BECKER 2007). Zur Bildung des Kapitalwertes werden alle Zahlungsflüsse (Ein- und Auszahlungen) auf die Periode 0 abgezinst, wobei ein vollkommener Kapitalmarkt²⁰ zu Grunde gelegt wird (GÖTZE 2008). Ein Investitionsprojekt ist vorteilhaft, wenn der Kapitalwert positiv ist ($KW > 0$) (PERRIDON ET AL. 2009). Stehen mehrere Projekte zur Auswahl, wobei nur eine begrenzte Anzahl durchgeführt werden kann, sind die Projekte mit den höchsten, positiven Kapitalwerten umzusetzen bis die zur Verfügung stehenden Investitionen aufgebraucht sind.

$$NPV = -I_0 + \sum_{p=1}^P \frac{E_p - A_p}{(1+i)^p} \quad (1)$$

NPV	Kapitalwert (engl. Net Present Value)
I_0	Investition in Periode 0
E_p	Einzahlung in Periode p
A_p	Auszahlung in Periode p
i	Zinssatz
P	Anzahl der betrachteten Perioden

3.4.2 Multikriterielle Bewertungsverfahren

Häufig sind Entscheidungen, bei denen die beste Alternative aus verschiedenen Möglichkeiten auszuwählen ist, basierend auf unterschiedlichen Kriterien zu fällen. Zur Entscheidungsfindung bei mehreren Zielgrößen lassen sich multikriterielle Bewertungsverfahren heranziehen (siehe bspw. HWANG & YOON 1981, GÖTZE 2008). Dabei werden Kriterien, die unterschiedliche Ausprägungen aufweisen können, zu einem Wert verdichtet.

Als beispielhafte Verfahren lassen sich die Nutzwertanalyse (siehe bspw. ZANGEMEISTER 1973, GÖTZE 2008) sowie der Analytisch-Hierarchische Prozess (AHP) (SAATY 1990) nennen, die nachfolgend beschrieben werden.²¹ Bei allen

²⁰ Ein vollkommener Kapitalmarkt geht von den Annahmen aus, dass ein einheitlicher Kalkulationszinssatz existiert, zu dem finanzielle Mittel zu jedem Zeitpunkt in beliebiger Höhe aufgenommen und angelegt werden können, keine Transaktions- oder Informationskosten anfallen, keine Markteintrittsbarrieren auftreten, vollkommene Konkurrenz besteht, Wertpapiere beliebig teilbar sind und Marktteilnehmer rationale Entscheidungen fällen (LAUX & SCHABEL 2009, GÖTZE 2008).

²¹ Für weiterführende Informationen zu den genannten sowie zu weiteren Verfahren (z. B. Entscheidungsmodells nach GHANDFOROUSH ET AL. (1985)) wird an dieser Stelle auf die angeführte Fachliteratur verwiesen (siehe bspw. ZANGEMEISTER 1973, HWANG & YOON 1981, GHANDFOROUSH ET AL. 1985, SAATY 1990, GÖTZE 2008).

multikriteriellen Bewertungsverfahren Verfahren erfolgt eine Problemaufspaltung. Dazu sind Zielkriterien zu bestimmen und zu gewichten. Daraufhin erfolgt die Ermittlung der Ausprägungen der Alternativen, die Transformation in Einzelnutzenwerte oder vergleichbare Werte sowie abschließend die Aggregation zu einem Gesamtnutzwert unter Berücksichtigung der Gewichtung (GÖTZE 2008).

Nutzwertanalyse

Im Rahmen einer Nutzwertanalyse sind die fünf Schritte (GÖTZE 2008)

1. Zielkriterienbestimmung,
2. Zielkriteriengewichtung,
3. Teilnutzenbestimmung,
4. Nutzwertermittlung sowie
5. Beurteilung der Vorteilhaftigkeit durchzuführen.

Im ersten Schritt der Nutzwertanalyse erfolgt die Zielkriterienbestimmung, wobei die Kriterien operational zu formulieren bzw. anhand einer Messskala zu beschreiben sind. Ferner müssen sie voneinander unabhängig sein. Daraufhin sind die Kriterien zu gewichten, wofür bspw. auf subjektives Expertenwissen zurückgegriffen, eine Rangfolge der Kriterien gebildet oder die Methode des paarweisen Vergleichs²² angewandt werden kann. Anschließend erfolgt im dritten Schritt die Ermittlung des Teilnutzens durch Multiplikation der Kriteriengewichte mit individuell für jedes Kriterium und jede Alternative zu vergebenden, subjektiven Nutzwerten (z. B. im Intervall $[1; 10] \in \mathbb{N}$). Zur Erhöhung der Transparenz lassen sich für die subjektive Beurteilung Transformationsfunktionen heranziehen. Im vierten Schritt wird der Nutzwert für jede Alternative durch Summieren der Teilnutzen berechnet und abschließend im fünften Schritt die Vorteilhaftigkeit beurteilt. Diese kann absolut oder relativ im Vergleich mit anderen Alternativen erfolgen (ZANGEMEISTER 1973, GÖTZE 2008).

Analytisch-Hierarchischer Prozess

Der AHP nach SAATY (1990) hat durch seinen strengen mathematischen Ablauf eine höhere Transparenz. Die relative Bedeutung von verschiedenen Kriterien wird mit Paarvergleichen ermittelt. Es können quantitative und qualitative Kriterien verknüpft werden. Der AHP besteht aus den fünf Schritten (GÖTZE 2008)

²² Für weiterführende Informationen zur Methode des paarweisen Vergleichs siehe LINDEMANN (2009).

1. Bildung der Hierarchie,
2. Ermittlung der Prioritäten,
3. Berechnung lokaler Prioritätenvektoren (Gewichtungsfaktoren),
4. Überprüfung der Konsistenz der Prioritätenbeurteilungen und
5. Bestimmung von Ziel- und Maßnahmenprioritäten für die gesamte Hierarchie.

Im ersten Schritt erfolgt die Bildung der Hierarchie, wobei die unterschiedlichen Alternativen sowie Unterziele eindeutig voneinander abzugrenzen sind. Im zweiten Schritt wird die Priorität für alle Elemente der Hierarchie ermittelt, wofür eine Paarvergleichsmatrix mittels Schätzen anhand einer von SAATY (1990) vorgeschlagenen Neun-Punkte Skala aufgestellt wird. Damit lassen sich Präferenzen des Anwenders einbeziehen. Daraufhin sind im dritten Schritt die lokalen Prioritätenvektoren bzw. die Gewichtungsfaktoren zu berechnen. Der vierte Schritt dient der Überprüfung der Konsistenz der Prioritätenbeurteilungen. Dies ist notwendig, da nicht von der Konsistenz aller Schätzungen ausgegangen werden kann. Abschließend sind die Ziel- und Maßnahmenprioritäten für die gesamte Hierarchie zu bestimmen (GÖTZE 2008).

3.5 Ausgewählte Prognosemethoden

Zur frühzeitigen Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen sind in der Zukunft liegende und somit unsichere Entwicklungen zu antizipieren. Um solche Entwicklungen vorherzusagen, existieren unterschiedliche Prognoseverfahren, mit der Absicht die Unsicherheit zu reduzieren (WINKER 2010). WINKER (2010) differenziert zwischen qualitativen und quantitativen Verfahren. Andere Autoren teilen die Verfahren in subjektive, extrapolierende oder kausale ein (PERRIDON ET AL. 2009). An dieser Stelle wird der Einteilung nach WINKER (2010) gefolgt.²³

3.5.1 Qualitative Verfahren

Bei qualitativen Verfahren werden zukünftige Entwicklungen von einzelnen oder mehreren Experten abgeschätzt. Sie beruhen demnach hauptsächlich auf menschlichen Erfahrungen (PERRIDON ET AL. 2009). Sie eignen sich daher insbesondere

²³ Für weiterführende Informationen zu den genannten sowie zu weiteren Prognoseverfahren wird auf die Fachliteratur verwiesen (siehe bspw. MAKRIDAKIS ET AL. 1998, HÖFT 1992, GAUSEMEIER ET AL. 1996, HOMBURG 2000, KLEIN & SCHOLL 2004, PERRIDON ET AL. 2009, KRUSCHWITZ 2009).

für die Prognose von Werten mit ungenügenden Vergangenheitsdaten, wobei die Delphi-Methode das bekannteste Verfahren darstellt (HOMBURG 2000). Diese sowie die Szenario-Technik werden nachfolgend präsentiert.

Delphi-Methode

Die Befragung im Rahmen der Delphi-Methode zur Ermittlung zukünftiger Entwicklungen erfolgt zweistufig. Zunächst werden mehrere Personen unabhängig voneinander strukturiert in isolierten Expertengesprächen interviewt, um Nachteile, wie bspw. Gruppenzwänge, zu vermeiden (PERRIDON ET AL. 2009). Zur Reduktion des Aufwands lassen sich auch formale Fragebögen heranziehen. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse zusammengefasst, bspw. durch die Bildung des arithmetischen Mittels oder auch des Medians (PERRIDON ET AL. 2009). Die Ergebnisse werden im zweiten Schritt den befragten Experten als Gruppe bereitgestellt und durch sie überprüft. (KRUSCHWITZ 2009). Diese beiden Schritte werden iterativ durchlaufen, wobei der Prozess idealerweise auf eine Gruppenmeinung konvergiert (HOMBURG 2000).

Szenario-Technik

Die Szenario-Technik eignet sich zur strategischen Vorausschau (MIETZNER 2009). Sie wird häufig den qualitativen Verfahren zugerechnet (HOMBURG 2000). Dabei erfolgt die Bildung alternativer Szenarien, die aus logisch konsistenten, widerspruchsfreien Annahmen abgeleitet werden (HOMBURG 2000). Für diese Zukunftsbilder sollten Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt werden. Häufig werden mindestens drei Szenarien (Worst-case-, Trend-, Best-case-Szenario) erstellt (REIBNITZ 1981), um hieraus den Szenario-Trichter abzuleiten (siehe Abbildung 8). Innerhalb dieses Trichters befinden sich zukünftige Entwicklungen, wobei der zunehmenden Unsicherheit zukünftiger Ereignisse Rechnung getragen wird.

Zur Erstellung der Szenarien werden die fünf Phasen (GAUSEMEIER ET AL. 1996)

- Szenario-Vorbereitung,
- Szenariofeld-Analyse,
- Szenario-Prognostik,
- Szenario-Bildung sowie
- Szenario-Transfer durchlaufen.

Während der Szenario-Vorbereitung erfolgt bspw. die Definition des Betrachtungsgegenstands sowie des Zeithorizonts. Mit der Szenariofeld-Analyse beginnt die eigentliche Szenario-Erstellung. Sie beinhaltet die Identifikation der in der Zukunft liegenden Einflussfaktoren. Die Szenario-Prognostik umfasst die Erarbeitung von unterschiedlichen Entwicklungsmöglichkeiten der Einflussfaktoren. Hierfür können wiederum die anderen genannten Verfahren herangezogen werden. Im Rahmen der Szenario-Bildung werden konsistente und widerspruchsfreie Kombinationen der Entwicklungsmöglichkeiten gebildet. Im letzten Schritt, dem Szenario-Transfer, erfolgt basierend auf den Szenarien bspw. die Entwicklung von zukunftsrobusten Strategien und Zielen (GAUSEMEIER ET AL. 1996).

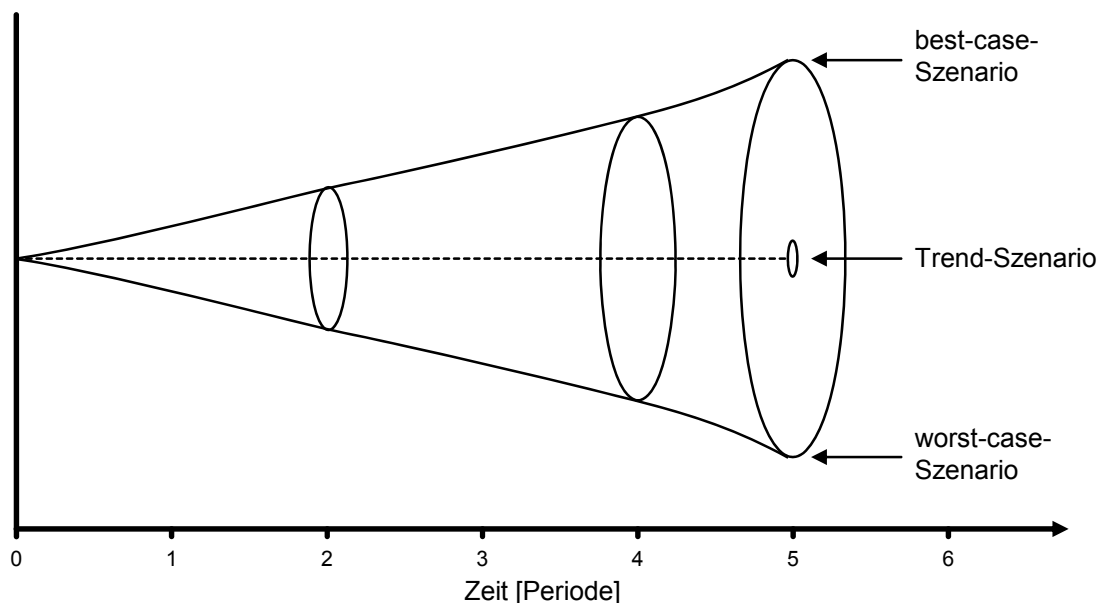


Abbildung 8: Szenario-Trichter (in Anlehnung an GAUSEMEIER ET AL. 1996)

Im Bereich der qualitativen Prognosemethoden finden keine mathematischen Verfahren Verwendung (PERRIDON ET AL. 2009). Diese liegen quantitativen Methoden zu Grunde.

3.5.2 Quantitative Verfahren

Während bei qualitativen Verfahren Entwicklungstendenzen ermittelt werden, geben quantitative Verfahren auch Größenordnungen an (WINKER 2010). In diesem Bereich existiert eine Vielzahl von Verfahren, wie bspw. die einfache Mittelwertbildung, die Methode der kleinsten quadratischen Abweichung, die exponentielle Glättung oder Zyklusmodelle (PERRIDON ET AL. 2009, HÖFT 1992). Diese werden nachfolgend kurz erläutert.

Einfache Mittelwertbildung

Im Rahmen der einfachen Mittelwertbildung wird der Mittelwert der Vergangenheitswerte berechnet und als Prognosewert verwendet. Die Vergangenheitswerte werden nicht unterschiedlich gewichtet. Bei der einfachen Mittelwertbildung können keine Trends berücksichtigt werden (PERRIDON ET AL. 2009).

Methode der kleinsten quadratischen Abweichungen

Dem Defizit der Vernachlässigung von Trends wird bei der Methode der kleinsten quadratischen Abweichung begegnet. Der linear in die Zukunft fortgeschriebene Trend wird unter der Annahme ermittelt, dass die Summe der quadratischen Abweichungen der Vergangenheitswerte von der Trendgeraden minimal ist (KLEIN & SCHOLL 2004, PERRIDON ET AL. 2009). Auf anhaltende Trendänderungen reagiert diese Methode jedoch relativ träge, da die Vergangenheitswerte ungewichtet für die Prognose herangezogen werden (PERRIDON ET AL. 2009).

Verfahren der exponentiellen Glättung

Bei der exponentiellen Glättung erster Ordnung wird das Problem der Gleichgewichtung durch die Gewichtung der Einzelwerte behoben. Jüngere Vergangenheitswerte, die üblicherweise einen höheren Einfluss auf Zukunftswerte haben als ältere, werden durch einen Gewichtungsfaktor bei der Prognose stärker beachtet (KLEIN & SCHOLL 2004). Dieses Verfahren läuft einsetzenden Trends jedoch hinterher (PERRIDON ET AL. 2009). Daher ist bei der Annahme von linearen Trends die exponentielle Glättung zweiter Ordnung anzuwenden.²⁴ Dabei wird die Summe der diskontierten Abweichungsquadrate von der Trendgerade minimiert (PERRIDON ET AL. 2009).

Die drei bisher beschriebenen Verfahren lassen sich für die kurz- bzw. mittelfristige Prognose einsetzen, da sie auf der Annahme basieren, dass die Einflussfaktoren in Zukunft in gleicher Weise wirken (PERRIDON ET AL. 2009).

Zyklusmodelle

Als weitere Verfahren finden im Bereich der strategischen Planung Zyklusmodelle Verwendung (siehe Abbildung 9). Dabei handelt es sich um Modelle, die

²⁴ In weiteren Verfahrensvarianten oder auch eigenständigen Verfahren ist es darüber hinaus aus möglich saisonale Einflüsse bei der Prognose einfließen zu lassen (siehe BURMAN 1979, SCHLITGEN & STREITBERG 2001, STIER 2001, SCHUHR 2012).

sich zur langfristigen Prognose heranziehen lassen, indem der zyklische Verlauf der Vergangenheitswerte in die Zukunft fortgeschrieben wird. Sie eignen sich eher für die langfristige Prognose, da zyklische Faktoren einen höheren Einfluss auf die strategische Planung haben (siehe Studie in Abschnitt 3.1). Die Berücksichtigung der Zyklizität erhöht die Prognosegenauigkeit (ZAEH ET AL. 2010A).

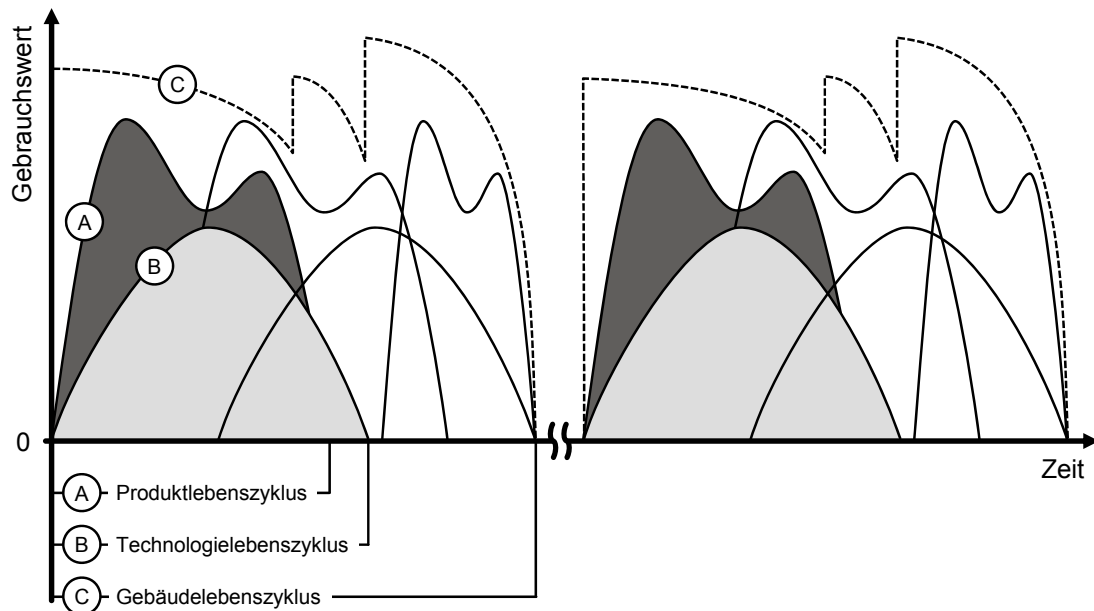


Abbildung 9: Produkt-, Technologie- und Gebäudelebenszyklus (in Anlehnung an SCHENK & WIRTH 2004)

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 768 „Zyklusmanagement von Innovationsprozessen – verzahnte Entwicklung von Leistungsbündeln auf Basis technischer Produkte“ definierten ZÄH ET AL. (2010A, S. 653) einen Zyklus als „(...) ein wiederkehrendes Verlaufsmuster (temporal und strukturell) (...), welches sich in Phasen gliedern lässt. Ein Zyklus ist stets verbunden mit Wiederholung, Phasen, Dauer, Auslösern sowie Auswirkungen. Darüber hinaus können Zyklen Rückwirkungen, Verschachtelungen, Wechselwirkungen (innerhalb des Zyklus und mit anderen Zyklen) sowie Hierarchien aufweisen, beeinflussbar sein und diversen Einflussfaktoren unterliegen“. Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird Zyklus als zyklischer Einflussfaktor (siehe Abschnitt 1.3.1) definiert. Zyklen sind bspw. Produktlebenszyklen (BRANKAMP 1996) oder Technologiezyklen (HÖFT 1992, SCHUH & KLAPPERT 2011).

Lebenszyklusmodellen liegt die Annahme zu Grunde, dass die Werte einen periodischen bzw. zyklischen Verlauf aufweisen. Somit kann aus dem Verlauf vergangener Zyklen auf zukünftige Zyklen geschlossen werden. Die Modelle lassen

sich auf viele Betrachtungsgegenständen anwenden, wie bspw. Produkte, Technologien, Gebäude, Organisationen oder Branchen (siehe Abbildung 9). Bei den Zyklusmodellen besteht die Problematik darin, dass die Längen unterschiedlicher Zyklen variieren. Demzufolge kann die Produktion von mehreren Produktgenerationen auf dem gleichen Betriebsmittel notwendig sein (MÖLLER 2008).

Der Produktlebenszyklus stellt das am weitesten verbreitete Lebenszyklusmodell dar (siehe Abbildung 10). Demnach durchläuft ein Produkt sieben Phasen von der Produktfindung über die Markteinführung bis hin zum Abstieg (BRANKAMP 1996). Andere Produktlebenszyklusmodelle gehen von neun (SCHENK & WIRTH 2004) bzw. vier (HÖFT 1992) Phasen aus, wobei häufig lediglich die Marktphasen (Phasen 3 bis 7 in Abbildung 10) betrachtet werden.

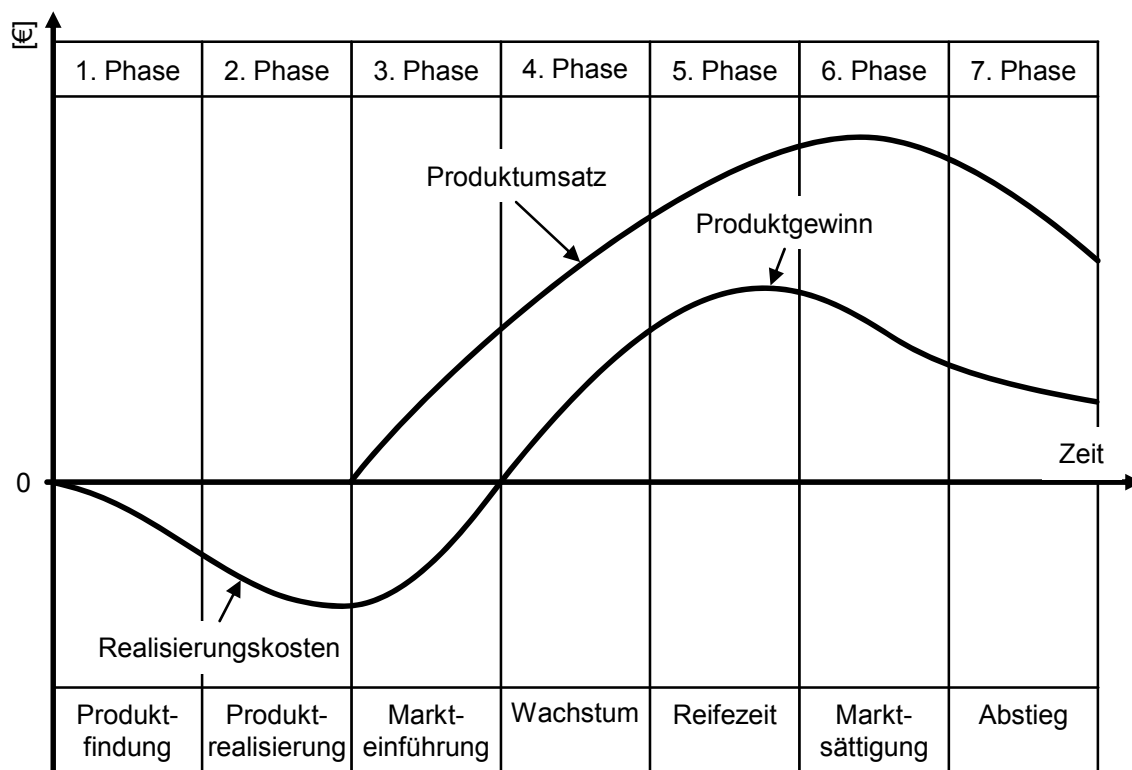


Abbildung 10: Produktlebenszyklus (in Anlehnung an BRANKAMP 1996)

Produktlebenszyklen werden über unterschiedliche Ausprägungen quantifiziert (z. B. Produktumsatz, Gewinn, Stückzahl). Die Absatzverläufe lassen sich kumuliert darstellen (HÖFT 1992). Unter der weit verbreiteten Annahme eines S-förmigen Kurvenverlaufs dient diese Darstellung der Absatzprognose, wozu die Sättigungsgrenze sowie der Kurvenverlauf festzulegen sind, bspw. anhand von Vergleichs- oder Vergangenheitswerten (HÖFT 1992). Neben Produkten unterliegen Betriebsmittel ebenfalls einem zyklischen Verlauf, der sich mit der sogenannten Badewannenkurve beschreiben lässt (SIHN & SPECHT 1996).

3.6 Entscheidungsfindung unter Unsicherheit

Prognosen werden u. a. durchgeführt, um basierend auf zukünftigen eintretenden Ereignissen Entscheidungen treffen zu können. Zukünftige Ereignisse bzw. Entwicklungen lassen sich jedoch zumeist nicht mit absoluter Sicherheit vorhersagen. Daher sind Unsicherheiten zu berücksichtigen. Abhängig von den Informationsständen lassen sich in der Entscheidungstheorie unterschiedliche Situationen differenzieren (siehe Abbildung 11).²⁵

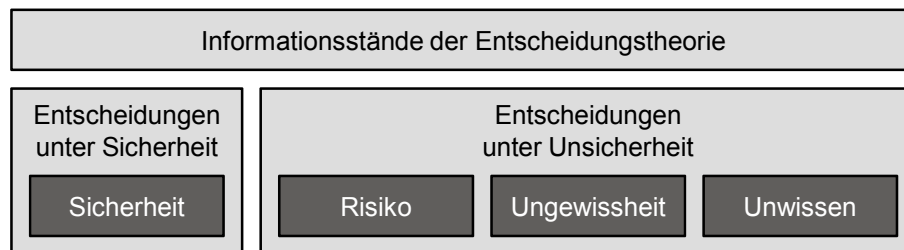


Abbildung 11: Informationsstände der Entscheidungstheorie (in Anlehnung an WÖHE & DÖRING 2010, MÖLLER 2008)

Nachfolgend werden mit der Risikoanalyse sowie der Sensitivitätsanalyse Verfahren im Bereich der Entscheidungsfindung unter Unsicherheit vorgestellt.²⁶

3.6.1 Risikoanalyse

Im Rahmen einer Risikoanalyse werden Unsicherheiten implizit berücksichtigt. Unsichere Eingangsparameter werden mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen abgebildet, um hiermit Unsicherheiten Rechnung zu tragen (KRUSCHWITZ 2009, POGGENSEE 2009). Das Ergebnis einer Risikoanalyse stellt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zielwerts dar (WÖHE & DÖRING 2010). Nach GÖTZE (2008) wird eine Risikoanalyse in die fünf Schritte

²⁵ Entscheidungen können grundsätzlich unter Sicherheit oder Unsicherheit getroffen werden. Bei Entscheidungen unter Sicherheit sind die Konsequenzen des Handelns vollständig bekannt (WÖHE & DÖRING 2010). Unsicherheit entsteht auf Grund unvollständiger Informationen, wenn unterschiedliche zukünftige Zustände möglich sind (ZWEHL 1993). Unsicherheit lässt sich weiter in Risiko, Ungewissheit und Unwissen unterteilen (MÖLLER 2008). In Risikosituationen liegen Eintrittswahrscheinlichkeiten für die unterschiedlichen Szenarien vor (WÖHE & DÖRING 2010), wohingegen sie bei Ungewissheit nicht bekannt sind (MÖLLER 2008). Von Unwissen wird gesprochen, wenn weder die Eintrittswahrscheinlichkeiten, noch alle möglichen Umweltzustände bekannt sind (MÖLLER 2008).

²⁶ Für weiterführende Informationen zu diesen sowie zu weiteren Verfahren zur Entscheidungsfindung unter Unsicherheit wird an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen (siehe bspw. WÖHE & DÖRING 2010, GÖTZE 2008, KRUSCHWITZ 2009, PERRIDON ET AL. 2009).

1. Erstellung des Entscheidungsmodells,
2. Modellierung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen der unsicheren Eingangsparameter,
3. Abbildung von Korrelationen zwischen den unsicheren Eingangsparametern,
4. Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zielwerts sowie
5. Interpretation der Ergebnisse unterteilt.

Nach der Erstellung des Entscheidungsmodells ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten im ersten Schritt einer Risikoanalyse erfolgt die Erweiterung um unsichere Eingangsparameter im zweiten Schritt. Die unsicheren Parameter können sowohl quantitativer als auch qualitativer Art²⁷ sowie jeweils zeitabhängiger bzw. zeitunabhängiger Art²⁸ sein (RIMPAU 2011). In üblichen Risikoanalysen werden lediglich quantitative Unsicherheiten berücksichtigt. KREBS (2012) erweiterte das Vorgehen um qualitative Unsicherheiten, die ebenfalls in Schritt 2 zu modellieren sind.

Quantitative Unsicherheiten lassen sich mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen abbilden (siehe Abbildung 12) (PERRIDON ET AL. 2009). Diese werden mit der Dichtefunktion $F(X)$ beschrieben (siehe Abbildung 12) (GRAF ET AL. 1998, BAMBERG ET AL. 2012).

Es existieren unterschiedliche Arten von Dichtefunktionen (z. B. Gleich-, Normal-, Dreiecks-, Binomialverteilung), die in Abhängigkeit der Unsicherheitsausprägung gewählt werden (MÖLLER 2008).²⁹ Die Abbildung der Dichtefunktion erfolgt abhängig von deren Art anhand unterschiedlicher Parameter.³⁰ Während

²⁷ Die Ausprägungen quantitativer Kriterien können „(...) anhand einer messbaren Größe bestimmt und als Zahlenwert angegeben werden (...)“ (KREBS 2012, S. 15). Dies sind bspw. die Abmessungen des Betriebsmittels oder die fertig- bzw. handhabbaren Produktabmaße. Die Ausprägungen qualitativer Kriterien hingegen sind „(...) zwar über bestimmte Eigenschaften beschreibbar (...)“, können „(...) jedoch nicht als Zahlenwert angegeben werden (...)“ (KREBS 2012, S. 15).

²⁸ „Die Zeitabhängigkeit gibt an, ob sich die einzelne Unsicherheit über den Bewertungszeitraum (...) zeitlich verändert oder nicht“ (KREBS 2012, S. 66).

²⁹ Hinweise zur Modellierung unsicherer Variablen bzw. welche Variable mit welcher Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dargestellt werden kann sind bspw. bei BRAS & EMBLEMSVÄG (1996), GLEIBNER & ROMEIKE (2005), ROSSELLO (2008), MÖLLER (2008), RIMPAU (2011) oder KREBS (2012) zu finden.

³⁰ Die Normalverteilung wird bspw. über die Parameter μ_X sowie σ_X abgebildet (KLEIN & SCHOLL 2004). Der Erwartungswert μ_X stellt den Wert dar, den die Zufallsvariable im Mittel annimmt. Die Standardabweichung σ_X drückt die Abweichung der Zufallsvariable von ihrem Erwartungswert aus. Je größer die Standardabweichung ist, desto weiter streut die Verteilung um den Erwartungswert (GÜTLER 2000).

stetige Verteilungen unendlich viele Zahlenwerte in einem Intervall annehmen können, werden diskrete Verteilungen mit abzählbar vielen Werten dargestellt (KLEIN & SCHOLL 2004). Jedoch ist die Ermittlung der Dichtefunktion ein problematischer Schritt, da sie auf Grund der Einmaligkeit von Entscheidungssituationen oftmals nur durch subjektive Schätzungen erfolgen kann (GÖTZE 2008).

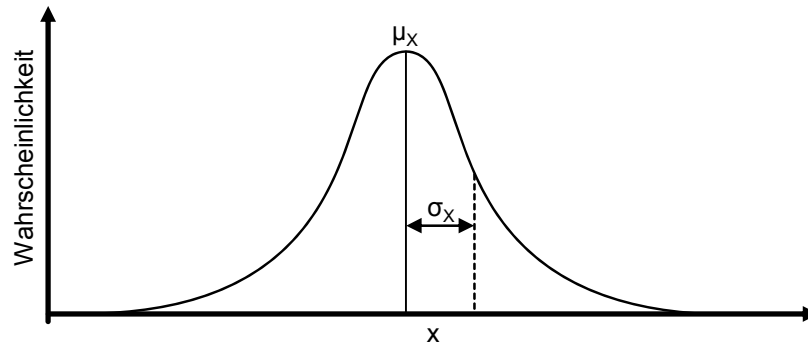


Abbildung 12: Dichtefunktion $f(x)$ einer beispielhaften Normalverteilung (μ_x : Erwartungswert, σ_x : Standardabweichung, x : Werte, die die Zufallsvariable X annehmen kann)

Neben quantitativen Unsicherheiten treten oftmals auch qualitative Unsicherheiten auf. Zur Abbildung dieser kann die Fuzzy-Set-Theorie verwendet werden (KREBS 2012). Sie ist eine Erweiterung der klassischen Mengenlehre, in der nur klare Zuordnungen zu Mengen möglich sind, um auch fließende bzw. unscharfe (engl. fuzzy) Abgrenzungen vornehmen zu können (ZADEH 1965). Mit dieser werden über eine Zugehörigkeitsfunktion linguistische Terme und menschliche Empfindungen, die qualitatives Wissen darstellen können, in quantitative Werte umgewandelt (Defuzzifizierung), die zu weiteren Berechnungen herangezogen werden (GÖTZE 2008, KRAMER 2009). Zunächst sind zur Modellierung der qualitativen Unsicherheiten die Zugehörigkeitsfunktionen zu beschreiben (siehe Abbildung 13).³¹ Im Anschluss daran wird die Fläche des Fuzzy-Sets basierend auf den qualitativen Antworten gebildet. Gerechnet wird letztendlich mit dem Abszissenwert des Schwerpunkts dieser Fläche.

Ein beispielhaftes Fuzzy-Set ist in Abbildung 13 gezeigt (KREBS 2012). Hier ist die linguistische Variable „Größe einer Person“ mit den linguistischen Termen „klein“, „mittelgroß“ und „groß“ über die Zugehörigkeitsfunktion dargestellt. Damit ist es möglich die unscharfe Aussage abzubilden, dass Mensch eher groß

³¹ Für Zugehörigkeitsfunktionen existieren unterschiedliche Formen. Einige sind bspw. bei NICOLAI (1995) gezeigt.

als mittelgroß ist. Somit wird diese Aussage den Mengen „mittelgroß“ und „groß“ zugewiesen, wodurch die graue Fläche in Abbildung 13 aufgespannt wird. Der Abszissenwert des sich ergebenden Flächenschwerpunkts stellt dann den scharfen Wert dieser unscharfen Aussage dar, mit dem die Berechnung durchgeführt wird.³²

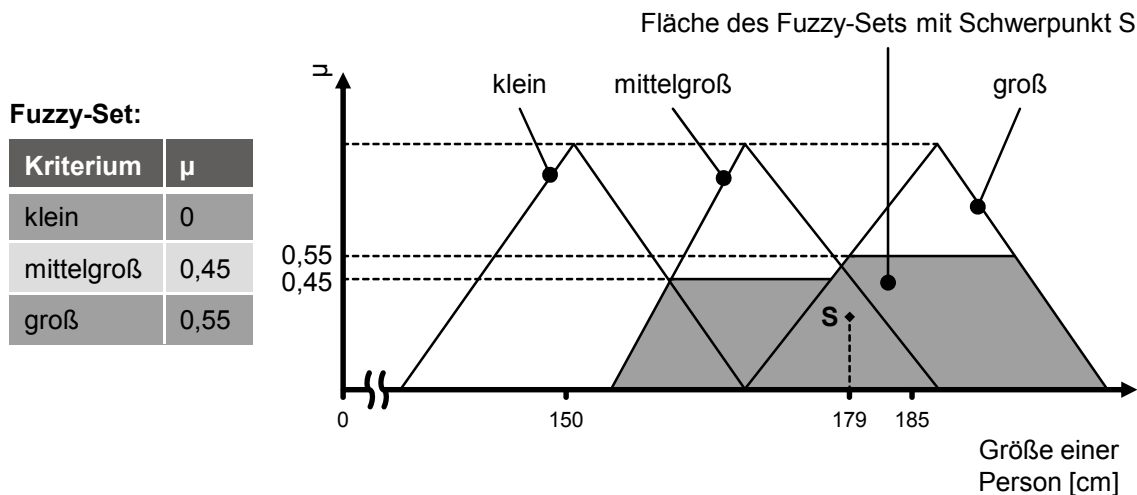


Abbildung 13: Beispielhaftes Fuzzy-Set mit Zugehörigkeitsfunktion (μ : Zugehörigkeitsfunktion) (KREBS 2012)

Im dritten Schritt einer Risikoanalyse sind die Korrelationen zwischen den unsicheren Eingangsparametern abzubilden. Abhängigkeiten zwischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen können in Form von Korrelationskoeffizienten (z. B. Spearmanischer oder Parsonscher Korrelationskoeffizient) dargestellt werden, die im Intervall $[-1,1]$ liegen. Nimmt der Korrelationskoeffizient einen positiven Wert an, korrelieren die Verteilungen positiv. Sinkt (steigt) der Wert einer Verteilung, so neigt auch der Wert der korrelierenden Verteilung zu sinken (steigen). Je näher der Korrelationskoeffizient bei -1 oder $+1$ ist, desto größer ist die (positive oder negative) Abhängigkeit. Beide Verteilungen sind unabhängig voneinander, wenn der Korrelationskoeffizient den Wert Null annimmt (POGGENSEE 2009).³³

Abhängigkeiten bei qualitativen Unsicherheiten und die hiermit einhergehende Dynamik lassen sich bspw. mit rekurrenten Fuzzy-Systemen darstellen (ADAMY & KEMPF 2004). Hierbei werden Vorgängerabhängigkeiten über Wenn-Dann-

³² Für weiterführende Informationen zur Fuzzy-Set-Theorie wird an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen (z. B. REUSCH 1993, ROMMELFANGER 1994, SEISING 2005, FLEMMING 2008).

³³ Neben Korrelationskoeffizienten können auch mit der Kovarianz Aussagen über die Abhängigkeiten zwischen zwei Verteilungen getroffen werden. Allerdings ist mit ihr keine Aussage über die Stärke des Zusammenhangs möglich und sie ist nicht auf das Intervall $[-1,1]$ normiert (POGGENSEE 2009).

Regeln abgebildet (DIEPOLD & LOHMANN 2010). Darüber hinaus können auch Wirkbeziehungen zwischen quantitativen und qualitativen Unsicherheiten abgebildet werden.³⁴

Nach der Modellierung der unsicheren Werte und Abbildung der Korrelationen ist im vierten Schritt die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zielwerts zu berechnen. Hierfür können die Vollenumeration sowie analytische oder simulative Verfahren verwendet werden (WÖHE & DÖRING 2010). Dank leistungsstarker IT-Systeme, die jedoch für eine Vollenumeration nicht ausreichend sind, findet hauptsächlich die Monte-Carlo-Methode als simulatives Verfahren Anwendung (PERRIDON ET AL. 2009). Hierbei wird in einer Vielzahl von Simulationsdurchläufen in Abhängigkeit der definierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen für jeden quantitativen, unsicheren Parameter ein Wert gezogen und der Zielwert errechnet. Die Ergebnisse der einzelnen Simulationsläufe werden abschließend zu einer diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zielwerts in Form eines Histogramms zusammengefasst (PERRIDON ET AL. 2009). Die Anzahl der benötigten Simulationsläufe ist so zu wählen, dass die gezogenen Werte repräsentativ für die Wahrscheinlichkeitsverteilung sind (z. B. 20.000) (GÖTZE 2008).

Der Vorteil der Risikoanalyse liegt darin, dass eine große Zahl unsicherer Eingangsparameter berücksichtigbar sowie Abhängigkeiten zwischen unsicheren Eingangsparametern darstellbar sind (GÖTZE 2008). Jedoch liefert sie keine Entscheidungsregeln und es werden EDV-Programme benötigt (GÖTZE 2008, PERRIDON ET AL. 2009). Ferner ist der Einfluss der einzelnen Eingangsparameter nicht bestimmbar (GÖTZE 2008). Dieses Defizit kann jedoch durch eine Sensitivitätsanalyse behoben werden, die im fünften Schritt der Risikoanalyse bei der Interpretation der Ergebnisse durchzuführen wäre.

3.6.2 Sensitivitätsanalyse

Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen lassen sich die Einflüsse von Eingangsparametern auf einen Zielwert ermitteln (PERRIDON ET AL. 2009). Hierzu wird ein Eingangsparameter in einem zu definierenden Umfang verändert, wobei die übrigen Parameter konstant gehalten werden (WÖHE & DÖRING 2010). Durch Beobachtung des Einflusses auf den Zielwert bzw. die Höhe der Veränderung des

³⁴ Eine detaillierte Darstellung zur Abbildung von Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Unsicherheiten ist bei KREBS (2012) zu finden.

Zielwerts können einerseits erfolgskritische Parameter identifiziert und andererseits Grenzen für Eingangsparameter definiert werden, um einen gewünschten Zielwert zu erreichen (KRUSCHWITZ 2009, GÖTZE 2008).

Die Risikoanalyse (siehe Abschnitt 3.6.1) kann bspw. um eine Sensitivitätsanalyse erweitert werden, um den Einfluss der unsicheren Eingangsparameter auf den Zielwert aufzuzeigen. Als Ergebnis liegen dann die Korrelationskoeffizienten zwischen den unsicheren Parametern und dem Zielwert vor. Eine Sensitivitätsanalyse kann allerdings keine Lösung für ein Entscheidungsproblem liefern, jedoch wertvolle Informationen über die Struktur sowie die unsicheren Größen geben (PERRIDON ET AL. 2009).

4 Anforderungen an die Methodik

Aufbauend auf den in Kapitel 2 identifizierten Defiziten bestehender Verfahren hinsichtlich der Erreichung der in Abschnitt 1.2 definierten Zielsetzung, werden in diesem Kapitel allgemeine und spezielle Anforderungen an eine Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen gestellt. Während allgemeine Anforderungen generell von Vorgehensweisen zu erfüllen sind, beziehen sich spezielle Anforderungen auf die zu entwickelnde Methodik.

4.1 Allgemeine Anforderungen

Die Methodik soll im praktischen Arbeitsumfeld von Betriebsmittelplanern Anwendung finden. Aus diesem Grund muss durch *Transparenz* die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sowie des Ablaufs der Methodik die Praxistauglichkeit sichergestellt werden. Hierdurch wird außerdem die Anwendungskomplexität begrenzt.

Darüber hinaus soll die Methodik in unterschiedlichen produzierenden Unternehmen eingesetzt werden. Daher müssen sowohl sie als auch die integrierten Modelle sowie Bewertungsvorschriften auf Unternehmensspezifika übertrag- bzw. anpassbar sein. Die geforderte *Übertragbarkeit* bezieht sich hierbei nicht nur auf unterschiedliche Unternehmen, sondern auch auf Betriebsmittel sowie Anwendungsfälle.

Außerdem besitzen jeder Planungsprozess bzw. jedes Betriebsmittel oder Unternehmen spezifische Ausprägungen. Im Rahmen der Erstellung der Methodik ist es daher möglich, dass nicht alle individuellen Aspekte Beachtung finden oder zukünftig neue Aspekte aufkommen. Demzufolge ist die *Erweiterbarkeit* der Methodik sicherzustellen, um bspw. zusätzliche Bewertungskriterien oder Planungsaspekte integrieren zu können.

Ferner existieren in Unternehmen üblicherweise standardisierte Planungsprozesse (siehe Abschnitt 2.3), die wiederum bspw. durch spezifische Softwareapplikationen Unterstützung finden. Deshalb muss bei der Konzeption die *Integrationsfähigkeit* der Methodik in bestehende Strukturen oder Prozesse gewährleistet werden. Dies ist auch nach der Konzeption bei der Implementierung der Methodik zu beachten, bspw. durch die Verwendung von Standardsoftware.

4.2 Spezielle Anforderungen

Betriebsmittel auf Zellen-Ebene liegen im Fokus dieser Arbeit. Daher muss die zu entwickelnde Methodik auf dieser Unternehmensebene anwendbar sein.

Zum frühzeitigen Erkennen von Rekonfigurationsbedarfen bereits während der initialen Planung ist das Verfahren *ex ante* durchzuführen. Um Anpassungen der Prognosen sowie ein Überwachen der Einflussfaktoren zu ermöglichen, muss es auch *lebenszyklusbegleitend* anwendbar sein. Hiermit können die im Zeitverlauf abnehmende Unschärfe berücksichtigt und sich kurzfristig ergebende Änderungen erkannt werden. Damit lassen sich Bedarfe exakt und rechtzeitig ermitteln.

Bestehende Methoden im Bereich der Veränderungsfähigkeit sind strategisch ausgerichtet, da sie lediglich initial planen bzw. bewerten und keine Veränderungen berücksichtigen (siehe Abschnitt 2.4). Außerdem liegen Betriebsmittel kaum im Fokus. Mit der zu entwickelnden Methodik sollen jedoch Betriebsmittelrekonfigurationen geplant werden. In diesem Kontext hat eine Empfehlung zu erfolgen welche Bauteile des Betriebsmittels wie zu adaptieren sind. Dies betrifft die operative Betriebsmittelplanung (siehe Fußnote 4, S. 3). Darüber hinaus wird durch die Auswahl der besten Rekonfigurationsalternative, die auch die Neuan-schaffung einer Anlage darstellen kann, der langfristig verfügbare Maschinenpark festgelegt, also die strategische Betriebsmittelplanung fokussiert (siehe Fußnote 4, S. 3). Mit der Methodik sollen daher *operative und strategische Aspekte* betrachtet und verknüpft werden, wobei heutzutage ein Bedarf an solchen Werkzeugen besteht (BAQAI 2010).

Ein wichtiges Element der Methodik stellt die *Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit* dar. Dabei ist die Beachtung des strukturellen Aufbaus von Betriebsmitteln essenziell, da die Struktur Möglichkeiten für Rekonfigurationen sowie die Aufwände hierfür definiert (ULRICH 1995).

Ein weiteres Ziel ist ferner die Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen. Diese Bedarfe treten auf, wenn ein Betriebsmittel nicht mehr die an es gestellten Anforderungen erfüllt. Zur Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen sind daher die *Eigenschaften von Betriebsmitteln* sowie die *Anforderungen an Betriebsmittel* eindeutig zu beschreiben.

Im Rahmen von Rekonfigurationen sind Bauteile zu adaptieren. Da die Adaption eines Bauteils Einflüsse auf andere Bauteile des Betriebsmittels haben kann, sind solche *Auswirkungen von Bauteiladaptionen aufzuzeigen*. Dies ist notwendig, da die Aufwände für Rekonfigurationen durch alle notwendigen Einzeladaptionen definiert werden.

Darüber hinaus ist im Rahmen der Methodikanwendung die beste Rekonfigurationsalternative auszuwählen. Dazu sind die Alternativen zu bewerten. Nachdem es sich bei Rekonfigurationen um Investitionsentscheidungsprozesse handelt, sind zum einen *betriebswirtschaftliche Aspekte* bei der Bewertung zu beachten. Dies stellt in jedem marktwirtschaftlichen System das wichtigste Kriterium zur Bewertung von Objekten dar (HEGER 2007). Da die Rekonfigurationen erst zukünftig auftreten und die betriebswirtschaftliche Bewertung somit einer Unschärfe unterliegt, sind *Unsicherheiten einzubeziehen* (z. B. Mitarbeiterkosten, um die Rekonfiguration durchzuführen). Zum anderen sind für die Bewertung auch *strukturelle Aspekte* zu berücksichtigen, da die Struktur bzw. der Aufbau der Anlagen einen maßgeblichen Einfluss auf den Aufwand von Veränderungen hat (ULRICH 1995).

In diesem Kapitel wurden die allgemeinen sowie speziellen Anforderungen an eine Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen an dargelegt. Diese sind in Tabelle 4 zusammengefasst und insbesondere die speziellen Anforderungen werden von bisherigen Verfahren nicht erfüllt.

Allgemeine Anforderungen
Transparenz
Übertragbarkeit
Erweiterbarkeit
Integrationsfähigkeit
Spezielle Anforderungen
Betriebsmittel auf Zellen-Ebene
ex-ante und lebenszyklusbegleitende Anwendung
operative und strategische Aspekte
Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit von Betriebsmitteln
Beschreibung von Betriebsmitteleigenschaften und -anforderungen
Aufzeigen der Auswirkungen von Bauteiladaptionen
betriebswirtschaftliche und strukturelle Bewertung von (alternativen) Rekonfigurationen
Einbeziehung von Unsicherheiten

Tabelle 4: *Anforderungen an eine Methodik zur Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln*

5 Entwickelte Modelle und Bewertungsvorgehen

5.1 Betriebsmittelanforderungs- und Betriebsmitteleigenschaftsmodell

Die Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen erfolgt mit zwei Modellen, dem Betriebsmittelanforderungs- sowie dem Betriebsmitteleigenschaftsmodell. Diese werden in diesem Abschnitt skizziert. Dabei werden zunächst der Zusammenhang zwischen Einflussfaktoren (siehe Abbildung 3) und Anforderungen dargestellt (siehe Abbildung 14) und der Unterschied zwischen den Modellen erläutert.

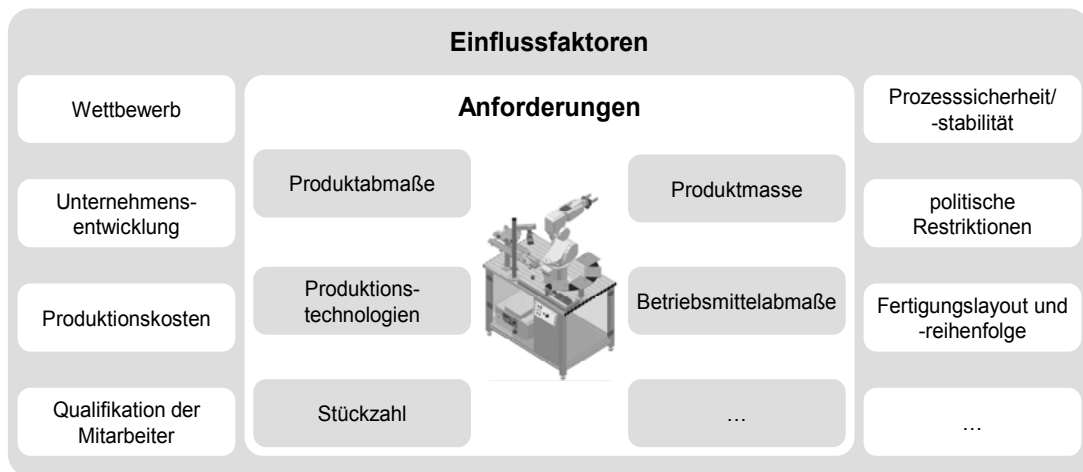


Abbildung 14: Abgrenzung von Einflussfaktoren und Anforderungen

Im Rahmen der Studie in Abschnitt 3.1 wurden 15 betriebsmittelrelevante Einflussfaktoren identifiziert.³⁵ Diese sind jedoch teilweise schwer quantifizier- bzw. modellierbar und somit Rekonfigurationsbedarfe hieraus nicht unmittelbar erkennbar.³⁶ Die Faktoren resultieren in Anforderungen, die an das Betriebsmittel gestellt werden. Daher wurden aus den Einflussfaktoren Anforderungen abgeleitet, die zu prognostizieren und überwachen sind (siehe Abbildung 14). Eine allgemeingültige Zuordnung von Einflussfaktoren zu Anforderungen ist unmöglich, jedoch sind in Abschnitt A2 exemplarische Zusammenhänge dargestellt.

³⁵ Weiterführende Informationen zur Studie sowie eine Spezifizierung der Einflussfaktoren können dem Anhang entnommen werden (siehe Abschnitt A1).

³⁶ Die Beschreibung des Wettbewerbs ist bspw. unklar sowie der Einfluss auf Betriebsmittel wenn sich der Wettbewerb ändert. Diese Änderung kann bspw. die Fertigung neuer Produkte erfordern, die wiederum neue Anforderungen an das Betriebsmittel hinsichtlich zu fertigender Produktabmaße oder auch innovativer Produktionstechnologien stellt.

Zur Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen sind neben den Anforderungen an ein Betriebsmittel auch dessen Eigenschaften zu modellieren und mit den Anforderungen abzugleichen. Um einen einfachen Abgleich zu ermöglichen, wurden das Betriebsmittelanforderungs- sowie das Betriebsmitteleigenschaftsmodell gemeinsam entwickelt und die Anforderungen sowie die Eigenschaften werden jeweils mit den gleichen Kriterien beschrieben. Neben den in Abbildung 15 gezeigten quantitativen Kriterien, existieren auch qualitative Kriterien, die kategoriell abgebildet werden. Um den Modellierungsaufwand zu begrenzen (z. B. bei komplexen Produktgeometrien), können einzelne Kategorien auch textuell oder visuell dargestellt werden (siehe Abschnitt „Modellkriterien“, S. 58ff.).

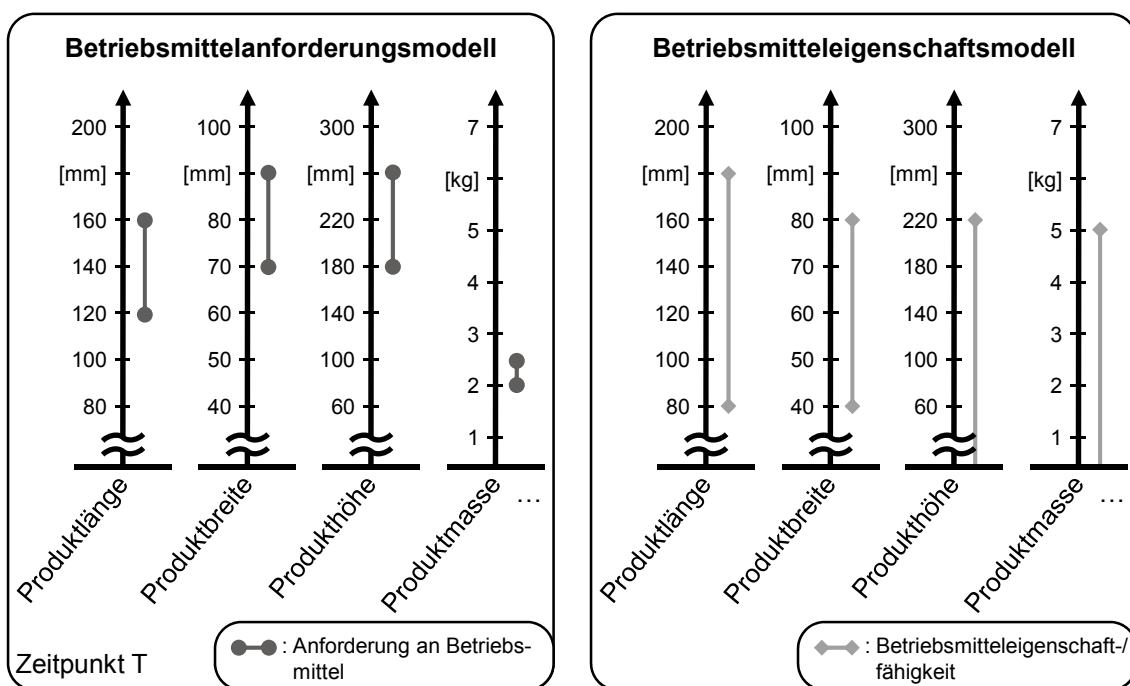


Abbildung 15: Ausschnitte aus einem beispielhaften Betriebsmittelanforderungs- bzw. einem Betriebsmitteleigenschaftsmodell

Das Betriebsmittelanforderungsmodell bildet die Anforderungen³⁷ an das Betriebsmittel ab, die sich aus den Einflussfaktoren ergeben und vom Umfeld des Betriebsmittels gefordert werden (siehe Abbildung 16). Das Betriebsmitteleigenschaftsmodell beschreibt die Eigenschaften sowie die Fähigkeiten³⁸ eines Be-

³⁷ Eine Anforderung ist im Kontext dieser Arbeit nach IEEE 610.12-1990 „eine Bedingung (...), die ein System [Anm.: im Kontext dieser Arbeit ein Betriebsmittel] (...) aufweisen muss (...)“ (POHL 2008) bzw. ein „(...) Anspruch (an die Leistungsfähigkeit) (...)“ (WAHRIG & WAHRIG-BURFEIND 2002, S. 171). Dabei existieren unterschiedliche Qualitätskriterien für Anforderungen (siehe S. 58).

³⁸ Eine Eigenschaft stellt ein „zum Wesen einer (...) Sache gehörendes Merkmal (...)“ bzw. eine „(...) charakteristische [Teil]beschaffenheit (...)“ dar (DUDEN 2013A). Bezogen auf ein Betriebsmittel sind dies

etriebsmittels. Da Anforderungen sowohl an Eigenschaften als auch an Fähigkeiten gestellt werden, sind beide abzubilden. So kann sich auf Grund eines Fabrikgebäudeneubaus eine spezifische Anforderung an die Höhe eines Betriebsmittels ändern (Eigenschaft). Auch ist es möglich, dass durch Änderungen des Käuferverhaltens eine größere Anzahl an Produkten zu fertigen ist und sich somit die Anforderungen an das Betriebsmittel verändern (Fähigkeit).

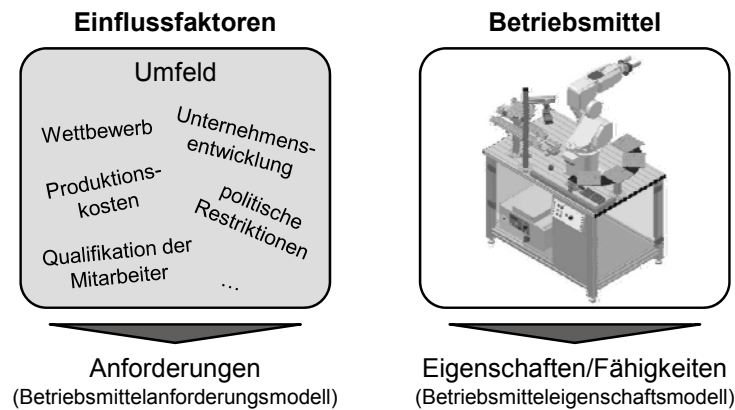


Abbildung 16: Abgrenzung Betriebsmittelanforderungs- und Betriebsmitteleigenschaftsmodell

Während sich die Eigenschaften eines Betriebsmittels üblicherweise nicht von selbst ändern, unterliegen die Anforderungen einer Dynamik. Zum frühzeitigen Erkennen von Rekonfigurationsbedarfen sind die Anforderungskriterien daher zu prognostizieren (siehe Abschnitt 3.5) und zu überwachen, um Abweichungen von den initialen Prognosen festzustellen. Sie sind Input-Größen für die Methodik.

Abbildung 15 zeigt die Ausschnitte eines beispielhaften Betriebsmittelanforderungs- bzw. eines Betriebsmitteleigenschaftsmodells. Diese Modelle werden jeweils mit den gleichen Kriterien dargestellt. Nachfolgend werden die Modellkriterien sowie deren Ermittlung erläutert. Dazu erfolgt die Beschreibung der Qualitätskriterien für Anforderungen sowie der Kriterien zur Abbildung des Betriebsmittelanforderungs- und des Betriebsmitteleigenschaftsmodells. Das Betriebsmittelanforderungsmodell bezieht sich immer auf einen spezifischen Zeitpunkt.

bspw. die Abmaße oder die Masse. Unter einer Fähigkeit wird das „(...) Vermögen etwas zu tun“ bzw. „(...) die Möglichkeit (...) gewisse Funktionen zu erfüllen (...)“ verstanden (DUDEN 2013c). Bei Fähigkeiten kann es sich bspw. um die produzierbare Stückzahl oder auch die durchführbare Produktionstechnologie handeln. Wenn im Folgenden der Begriff Eigenschaft verwendet wird, ist der Begriff Fähigkeit inkludiert.

Qualitätskriterien für Anforderungen an Betriebsmittel

Da sich die Einflussfaktoren (siehe Abschnitt A1) nicht direkt zur Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen heranziehen lassen, werden Anforderungen an das Betriebsmittel formuliert. Diese gehen über die Definition von Einflussfaktoren (siehe Abschnitt 1.3.1) dahingehend hinaus, als dass sie direkt einen Anspruch an die Eigenschaften oder Fähigkeiten des Betriebsmittels stellen. Anforderungen müssen daher klarer spezifiziert sein als die bisher genannten Einflussfaktoren. Dazu müssen sie definierten Qualitätskriterien genügen (POHL 2008). Da das Betriebsmittelanforderungs- und das Betriebsmitteleigenschaftsmodell mit den gleichen Modellkriterien dargestellt werden, müssen die Eigenschaften auch die Qualitätskriterien erfüllen. POHL (2008, S. 222-223) nennt die Qualitätskriterien

- Vollständigkeit,
- Nachvollziehbarkeit,
- Korrektheit,
- Eindeutigkeit,
- Verständlichkeit,
- Konsistenz,
- Überprüfbarkeit,
- Bewertet,
- Aktualität sowie
- Atomarität.

Die *Vollständigkeit* bezieht sich sowohl auf eine einzelne Anforderung als auch auf die Gesamtheit aller Anforderungen. Um die Vollständigkeit sicherzustellen, wurden in einer Studie bei unterschiedlichen Unternehmen Betriebsmittel sowie Anforderungsdokumente (z. B. Pflichtenhefte) untersucht. Im Zeitverlauf neu aufkommende oder im Rahmen der Studie nicht erkannte Anforderungen können jedoch problemlos aufgenommen werden. Eine Anforderung muss insofern vollständig sein, als dass sie dokumentiert ist und keine inhaltlichen Lücken aufweist. Im Bezug auf alle Anforderungen muss sichergestellt sein, dass keine Aspekte außer Acht gelassen werden. Darüber hinaus muss die *Nachvollziehbarkeit* einer Anforderung gegeben sein, wobei der Ursprung (z. B. Herkunft im Unternehmen), die Evolution sowie der Einfluss auf die Realisierung der Anforderung eingeschlossen sind. Dies ist im Kontext dieser Arbeit u. a. für die Ermittlung der Ausprägung von Anforderungen relevant (z. B. die Forderung der zu verwendenden Produktmaterialien durch die Produktentwicklung) (POHL 2008).

Ferner müssen die Anforderungen *korrekt*³⁹ sein, um klare Aussagen bzgl. Rekonfigurationsbedarfen treffen zu können. Dabei dürfen sie keine Interpretationsspielräume zulassen. Sie sind so zu formulieren, dass sie nur eine *eindeutige* Interpretation erlauben. Außerdem ist eine Anforderung *verständlich* zu beschreiben, so dass sie möglichst einfach erfassbar ist. Hierbei unterstützen insbesondere quantitativ darstellbare Anforderungen bzw. Anforderungen mit klar definierten Kategorien für die unterschiedlichen Ausprägungen. Eine Anforderung darf anderen Anforderungen auch nicht widersprechen. Die Anforderungen müssen dementsprechend *konsistent* sein. Ein weiteres Kriterium ist die *Überprüfbarkeit*. Dies wird durch die Vergleichbarkeit mit den Betriebsmitteleigenschaften sowie die quantitative bzw. kategorisierte Darstellung der Ausprägungen von Anforderungen sichergestellt (POHL 2008).

Darüber hinaus sind die Anforderungen zu *bewerten*, wodurch die Bedeutung der Anforderung in Form von Verbindlichkeiten dargestellt wird. SCHIENMANN (2002, S. 124) beschreibt hierfür die Kategorien „Pflicht“, „Wunsch (Empfehlung)“, „Absicht“, „Vorschlag“ sowie „Kommentar“. In der Arbeit wird davon ausgegangen, dass Anforderungen an Betriebsmittel nicht beeinflussbare Input-Größen für die Methodik sind, die erfüllt werden müssen. Daher stellen sie ausnahmslos Pflicht-Anforderungen dar, die zu Rekonfigurationen führen können. Außerdem ist zu gewährleisten, dass die Anforderungen *aktuell* sind. Daher sind sie im Rahmen der Methodikanwendung kontinuierlich zu prognostizieren und zu überwachen. Letztendlich ist es erforderlich, dass die Anforderungen *atomar* sind. Sie dürfen also nicht mehr weiter untergliederbar sein und nicht mehrere Sachverhalte beschreiben (POHL 2008).

Die bisher angeführten Einflussfaktoren (siehe Abbildung 3) erfüllen diese Kriterien nicht oder nur teilweise (siehe Abschnitt 3.1).⁴⁰ Daher werden die Einflussfaktoren nachfolgend weiter detailliert und als Anforderungen formuliert.

³⁹ Anmerkung: POHL (2008) verwendet hier den Begriff „korrekt“. Allgemein wäre „exakt“ passender.

⁴⁰ Nicht alle Einflussfaktoren sind bspw. verständlich. Was bedeutet eine Veränderung der Branchenentwicklung für das Betriebsmittel? Auch sind sie nicht atomar. Die „Altersstruktur der Mitarbeiter“ kann nämlich weiter in die Anzahl zur Verfügung stehenden Mitarbeiter oder in Anforderungen an die ergonomische Belastung durch das Betriebsmittel unterteilt werden. Außerdem überschneiden sich Einflussfaktoren teilweise (z. B. Unternehmensentwicklung, Konjunkturdaten, Wettbewerb oder Absatzzahlen, die alle in Anforderungen an die zu fertigende Stückzahl münden können). Daher ist das durch die Einflussfaktoren von den Betriebsmitteln Geforderte nicht immer eindeutig.

Modellkriterien

Die Anforderungen sowie die Eigenschaften eines Betriebsmittels werden anhand mehrerer Kriterien dargestellt. Diese Kriterien des Betriebsmittelanforderungs- und des Betriebsmitteleigenschaftsmodells (siehe Abbildung 15) sind dabei die gleichen, um einen einfachen Abgleich zur Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen zu ermöglichen. Im Anhang dieser Arbeit ist jedes Kriterium erläutert, wozu jeweils die Ausprägungen zur Beschreibung der Kriterien mit deren Spezifikation angegeben, Einflussfaktoren aufgezeigt und Informationsquellen angeführt sind, wo benötigte Daten ermittelt werden können (siehe Abschnitt A2). Abgeleitet wurden die Kriterien aus der Studie über betriebsmittelrelevante Einflussfaktoren (siehe Abschnitt 3.1)⁴¹, den Qualitätskriterien für Anforderungen (siehe S. 56), einer Studie von Betriebsmitteln bei unterschiedlichen Unternehmen, einer Analyse von Anforderungsdokumenten (z. B. Pflichtenhefte) und einer Literaturrecherche (siehe bspw. BULLINGER & AMMER 1986, VOIGTS 1991, TROMMER 2001, KONOLD ET AL. 2003, KIEFER 2007, HEGER 2007, HELBING ET AL. 2010).

Die beiden Modelle sind offen gestaltet, so dass weitere Kriterien problemlos hinzugefügt werden können. Bei Anwendung der Methodik sind zu beachtende Kriterien individuell auszuwählen. Die Kriterien werden mit Ausprägungen beschrieben, die wiederum unterschiedlich dargestellt werden können.⁴² Daher sind die Ausprägungen wiederum individuell mit deren Granularität festzulegen.

25 Kriterien bauen jeweils das Betriebsmittelanforderungs- bzw. das Betriebsmitteleigenschaftsmodell auf (siehe Tabelle 5). Die Kriterien stellen Eingangsgrößen für die Methodik dar und sind in vier Gruppen eingeteilt. So existieren produktbezogene (MIESE 1976), produktionsstrukturbezogene, betriebsmittelbezogene und mitarbeiterbezogene Anforderungen bzw. Eigenschaften und Fähigkeiten.

⁴¹ Die Erkenntnisse der Studie geben Hinweise, wie die aus den einzelnen Einflussfaktoren abgeleiteten Anforderungen prognostiziert und wo Informationen zu ihnen ermittelt werden können werden könnten sowie in welcher Form sie zu berücksichtigen und wie wichtig die jeweiligen Anforderungen sind.

⁴² Das Kriterium Materialien kann bspw. über die Härtearten Vickershärte, Rockwellhärte sowie Brinellhärte (siehe BERGER & KLOOS 2007) oder auch die Werkstoffe dargestellt werden.

Produktbezogen
Produktabmaße (Länge, Breite, Höhe)
Produktmasse
Materialien
Produktgeometrien
Produktionsparameter (z. B. Oberflächenqualität, Prozesskräfte)
Produktionsstrukturbezogen
Betriebsmittelabmaße (Länge, Breite, Höhe)
Betriebsmittelmasse
Medien (z. B. el. Strom, el. Spannung, Druckluft, Wasser)
Mobilität
Umgebungsbedingungen (z. B. Raumtemperatur)
Verbindungsgrad (z. B. Fundamentierung)
Betriebsmittelbezogen
Produktionskosten
Rüstzeit
Mean Time To Repair (MTTR)
Mean Time Between Failures (MTBF)
Stückzahl
Ausschuss
Wartungskosten
Emissionen (z. B. Schalldruckpegel, Vibrationen, Schadstoffe)
Produktionstechnologien
Automatisierungsgrad
Informationstechnik (z. B. Datenformat der Steuerung, Hard-/Software Schnittstellen)
Mitarbeiterbezogen
Mitarbeiteranzahl
Mitarbeiterqualifikation
ergonomische Belastung

Tabelle 5: Kriterien zur Beschreibung der Anforderungen sowie Eigenschaften eines Betriebsmittels (in Anlehnung an KARL ET AL. 2012B)

Produktbezogene Kriterien beschreiben die Fähigkeiten eines Betriebsmittels Anforderungen erfüllen zu können, die vom Produkt gestellt werden. Das sind bspw. fertig- bzw. handhabbare Produktabmaße, Oberflächenqualitäten, Massen etc. (EVERSHEIM 1996). Diese Kriterien sind ein wesentlicher Einflussfaktor auf das Betriebsmittel. Produktionsstrukturbezogene Eigenschaften stellen Kriterien dar, die Einfluss auf die Produktionsumgebung nehmen. Dabei handelt es sich u. a. um die Masse des Betriebsmittels, die Abmessungen, die Mobilität oder auch um benötigte Medien. Betriebsmittelbezogene Kriterien sind die Produktionskosten, die dargestellten Produktionstechnologien, die MTTR (mittlere Reparaturzeit, engl. Mean Time To Repair) oder die MTBF (mittlere störungsfreie

Zeit, engl. Mean Time Between Failures) (SIHN & SPECHT 1996). Die Funktion bzw. ausführbaren Tätigkeiten des Betriebsmittels werden somit über die Produktionstechnologien beschrieben. Da nicht alle Anlagen vollautomatisiert betrieben werden, sind mitarbeiterbezogene Kriterien notwendig. Diese beschreiben die Anzahl an Mitarbeitern, deren Qualifikation sowie die ergonomische Belastung. Diese Kategorie bezieht sich auf Mitarbeiter, die das Betriebsmittel bedienen, und nicht auf Mitarbeiter, die dieses bspw. planen, warten oder instandhalten.

Die Komplexität der beiden Modelle kann auf Grund einer Vielzahl zu definierender Kategorien bei qualitativen Kriterien stark zunehmen (z. B. bei Abbildung vieler fertig- bzw. handhabbarer Produktgeometrien bei Umformwerkzeugen). Damit steigt der Modellierungs- und somit der Anwendungsaufwand der Methodik erheblich. Um diese Komplexität und somit den Aufwand zu reduzieren, können einzelne Kriterien auch textuell oder visuell beschrieben werden (z. B. mit technischen Zeichnungen). Auf diese Daten ist in den Modellen zu verweisen.

Die Kriterien sind eindeutig zu beschreiben (siehe S. 56). Daher sollten sie quantitativ abgebildet werden, um durch einen Abgleich beider Modelle klare Aussagen über Rekonfigurationsbedarfe treffen zu können. Dennoch gibt es qualitative Kriterien (siehe Fußnote 27, S. 43). Um einen Abgleich zwischen Anforderungen und Eigenschaften bei qualitativen Kriterien zu ermöglichen, werden sie anhand von Kategorien dargestellt. Hierunter fallen bspw. die Mobilität (Kategorien, z. B.: hoch, mittel, gering) oder die benötigten Medien (Kategorien: Druckluft (6 bar), Druckluft (12 bar), elektrische Spannung (230 V) etc.). Diese Kategorien sind zum Abgleich eindeutig zu definieren (siehe Abschnitt A2).

Abbildung 17 zeigt den Ausschnitt eines beispielhaften Betriebsmittelanforderungsmodells. Oftmals decken Eigenschaften eines Betriebsmittels Intervalle ab (z. B. ein Betriebsmittel, das Produkte mit einer Masse von 0 bis 5 kg handhaben bzw. fertigen kann) oder es werden solche Intervalle von einem Betriebsmittel gefordert (z. B. das Betriebsmittel darf nicht höher als 3,5 m sein).

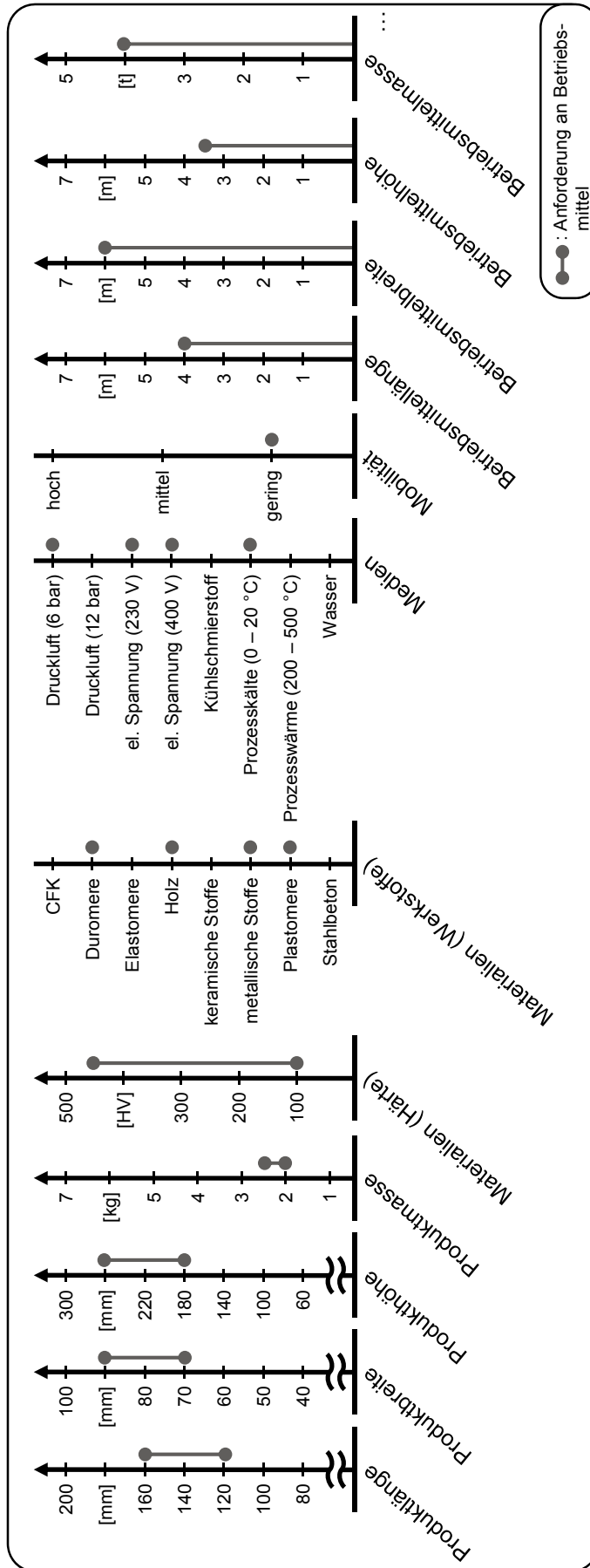


Abbildung 17: Ausschnitt aus einem beispielhaften Betriebsmittelanforderungsmodell

5.2 Betriebsmittelstrukturmodell

Die Betriebsmittelstruktur determiniert u. a. die Rekonfigurationsmöglichkeiten sowie die Aufwände für Rekonfigurationen (siehe Abschnitt 4.2). Darüber hinaus sind die Auswirkungen von Bauteiladaptionen auf andere Bauteile aufzuzeigen, wofür Abhängigkeiten zwischen Bauteilen darzustellen sind (siehe Abschnitt 4.2). Daher wird ein Betriebsmittelstrukturmodell erstellt. Dieses Modell ist außerdem die Basis zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit von Betriebsmitteln. Für das Betriebsmittelstrukturmodell werden statische Produktarchitektur-DSMs verwendet (siehe Abschnitte 3.3.1 und 3.2).

Betriebsmittel stellen vernetzte Systeme dar, wobei die Vernetzung aus Abhängigkeiten zwischen Bauteilen besteht.⁴³ Das Betriebsmittelstrukturmodell beschreibt daher den strukturellen Aufbau eines Betriebsmittels. Die Abhängigkeit ist bspw. eine Beziehung (z. B. informationstechnische Verbindung zwischen einem Roboter und der Steuerung) oder ein Kontakt (z. B. Greifer, der an einen Roboter geschraubt ist). Zur Erstellung des Betriebsmittelstrukturmodells sind

1. die Betriebsmittelbauteile zu ermitteln,
2. die Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen zu identifizieren sowie
3. die Abhängigkeiten zu gewichten.

Im ersten Schritt sind die Betriebsmittelbauteile zu ermitteln und einander gegenüber zu stellen, wodurch eine DSM aufgespannt wird. Zur Ermittlung kann auf im Unternehmen verfügbare Anlagenstammdaten zurückgegriffen werden (RASCH 2000). In den Anlagenstammdaten werden heutzutage die Bauteile üblicherweise ohne deren Abhängigkeiten untereinander abgebildet (RASCH 2000). Es ist zu untersuchen, ob der Detaillierungsgrad in den Anlagenstammdaten ausreichend ist oder die Bauteile weiter zu untergliedern sind. Ferner ist die Aktualität der Daten zu prüfen. Mitarbeiter, die das Betriebsmittel bedienen, werden auch als Bestandteil des Betriebsmittels aufgenommen.

Im zweiten Schritt sind die Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen zu identifizieren. Es existieren folgende Abhängigkeitskategorien, die in einer Untersuchung unterschiedlicher Betriebsmittel sowie basierend auf einer Literaturrecherche (siehe bspw. PIMMLER & EPPINGER 1994) erhoben wurden:

⁴³ Unterschiedliche Autoren verwenden für den Begriff Abhängigkeiten auch den Begriff Schnittstellen, die zwischen interagierenden Komponenten bestehen (siehe bspw. ULRICH 1995). An dieser Stelle werden unter Abhängigkeiten ebenfalls diese Schnittstellen verstanden.

- Mechanische Abhängigkeiten

Mechanische Abhängigkeiten stellen Kontakte zwischen Bauteilen dar. Es ist bspw. ein loser Kontakt durch Berühren oder eine feste Verbindung durch Fügeverfahren nach DIN 8593-0 (z. B. Schraubverbindungen, Klebverbindungen, Pressverbindungen, Schweißverbindungen).

- Informationstechnische Abhängigkeiten

Der kontinuierliche Austausch von Informationen sowie Daten wird über informationstechnische Abhängigkeiten hergestellt. Der Datenaustausch kann sowohl über Kabelverbindungen als auch ohne physische Verbindung (z. B. WLAN) erfolgen. Oftmals ist die informationstechnische mit der elektrischen Verbindung verknüpft (MEYER 2002). Steuersignale können auch informationstechnische Abhängigkeiten sein.

- Elektrische Abhängigkeiten

Elektrische Abhängigkeiten sichern die Stromversorgung durch Übertragung von elektrischer Energie über Kabel oder kontaktlos (z. B. durch elektromagnetische Felder).

- Fluide Abhängigkeiten

In diese Kategorie fallen sowohl pneumatische als auch hydraulische Abhängigkeiten. Über pneumatische Verbindungen werden gasförmige Medien (z. B. Druckluft) zwischen Bauteilen transportiert. Damit können bspw. Zustände erfasst, Informationen verarbeitet oder Arbeitselemente geschaltet bzw. Arbeit verrichtet werden (CROSER & EBEL 2003). Darüber hinaus kann über pneumatische Abhängigkeiten die Distribution von Prozessgasen erfolgen. Im Gegensatz zu pneumatischen werden in hydraulischen Verbindungen flüssige Medien herangezogen, um zwischen Bauteilen Kräfte über Druck sowie Signale zu übertragen oder die Schmierung sowie Kühlung sicherzustellen (MERKLE ET AL. 2004). Fluide Abhängigkeiten werden üblicherweise über Schläuche oder Rohre realisiert.

- Thermische Abhängigkeiten

Auf Grund von Temperaturdifferenzen kann zwischen Bauteilen eine Wärmeübertragung stattfinden, die über thermische Abhängigkeit dargestellt wird. Dabei kann es sich bspw. um einen ungewollten Temperatureinfluss, z. B. während Schweißprozessen, oder auch um die gezielte Kühlung von Bauteilen handeln.

- Logische Abhängigkeiten

Diese Kategorie beinhaltet Wechselwirkungen zwischen Bauteilen durch den initialen Austausch von Informationen. Dies überstützt u. a. das automatische Konfigurieren von Betriebsmitteln, wie bspw. von Robotersystemen (REINHART ET AL. 2011A, KRUG 2013). Durch z. B. das automatische Einmessen von Werkzeugen oder Finden von Nullpunkten lässt sich der Einrichtungs-, Kalibrierungs- oder Initialisierungsaufwand reduzieren.

- Funktionale Abhängigkeiten

Funktionale Abhängigkeiten beschreiben ein über die bisher beschriebenen Abhängigkeitskategorien hinausgehendes Interagieren zwischen Bauteilen. Hierunter fallen u. a. optische Anhängigkeiten zwischen Bauteilen, wie bspw. das Auslesen eines Barcodes oder auch die Prozessüberwachung durch ein Kamerasystem zur Qualitätssicherung.

Für jede Abhängigkeitskategorie wird eine eigene DSM erstellt. Innerhalb dieser existieren wiederum unterschiedliche Abhängigkeitsarten (z. B. Klebverbindung oder elektrische 230 V Verbindung durch ein gestecktes Kabel in der Kategorie mechanische Abhängigkeiten). Der Aufwand zum Lösen und Wiederherstellen von Abhängigkeiten der gleichen Art ist nahezu identisch, wohingegen er von Art zu Art stark variieren kann. Diese Abhängigkeitsarten werden ebenfalls im zweiten Schritt erhoben. Dies bildet die Grundlage zur Gewichtung der Abhängigkeiten. Abschließend sind die Abhängigkeiten ungewichtet in das Betriebsmittelstrukturmodell einzutragen. Die zur Ermittlung der Abhängigkeiten benötigten Informationen können bspw. CAD-Modellen, PDM-Systemen, Schnittstellenspezifikationen oder weiteren Datenmodellen entnommen werden (KIEFER 2007, LINDEMANN ET AL. 2009, EPPINGER & BROWNING 2012).

Der Aufwand, um Abhängigkeiten zu lösen und wiederherzustellen, ist nicht nur von Kategorie zu Kategorie unterschiedlich, sondern variiert auch innerhalb einer Kategorie von Abhängigkeitsart zu Abhängigkeitsart (z. B. eine Schweißverbindung im Vergleich zu einer Schraubverbindung in der Kategorie mechanische Abhängigkeit). Diese Aufwände sind zu berücksichtigen, da sie u. a. die Dauern und Kosten von Rekonfigurationen beeinflussen. Aus diesem Grund sind im dritten Schritt der Betriebsmittelstrukturerstellung die einzelnen Abhängigkeitsarten zu gewichten, wofür auf die Methode des paarweisen Vergleichs zurückgegriffen wird.⁴⁴ Eine allgemeingültige Gewichtung von unterschiedlichen Abhängigkeits-

⁴⁴ Näheres zur Methode des paarweisen Vergleichs ist LINDEMANN (2009) zu entnehmen.

arten ist nicht möglich (z. B. unterschiedliche Aufwände beim Lösen und Wiederherstellen einer Druckluftrohleitung im Vergleich zu einem Rohr, das explosive Gase transportiert). Daher ist die Gewichtung stets betriebsmittel- oder unternehmensspezifisch vorzunehmen. Durch die Gewichtungsfaktoren ergeben sich numerische DSMs (siehe Abschnitt 3.3.1). Abschließend werden die Gewichtungen im Betriebsmittelstrukturmodell eingetragen (siehe Abbildung 18).

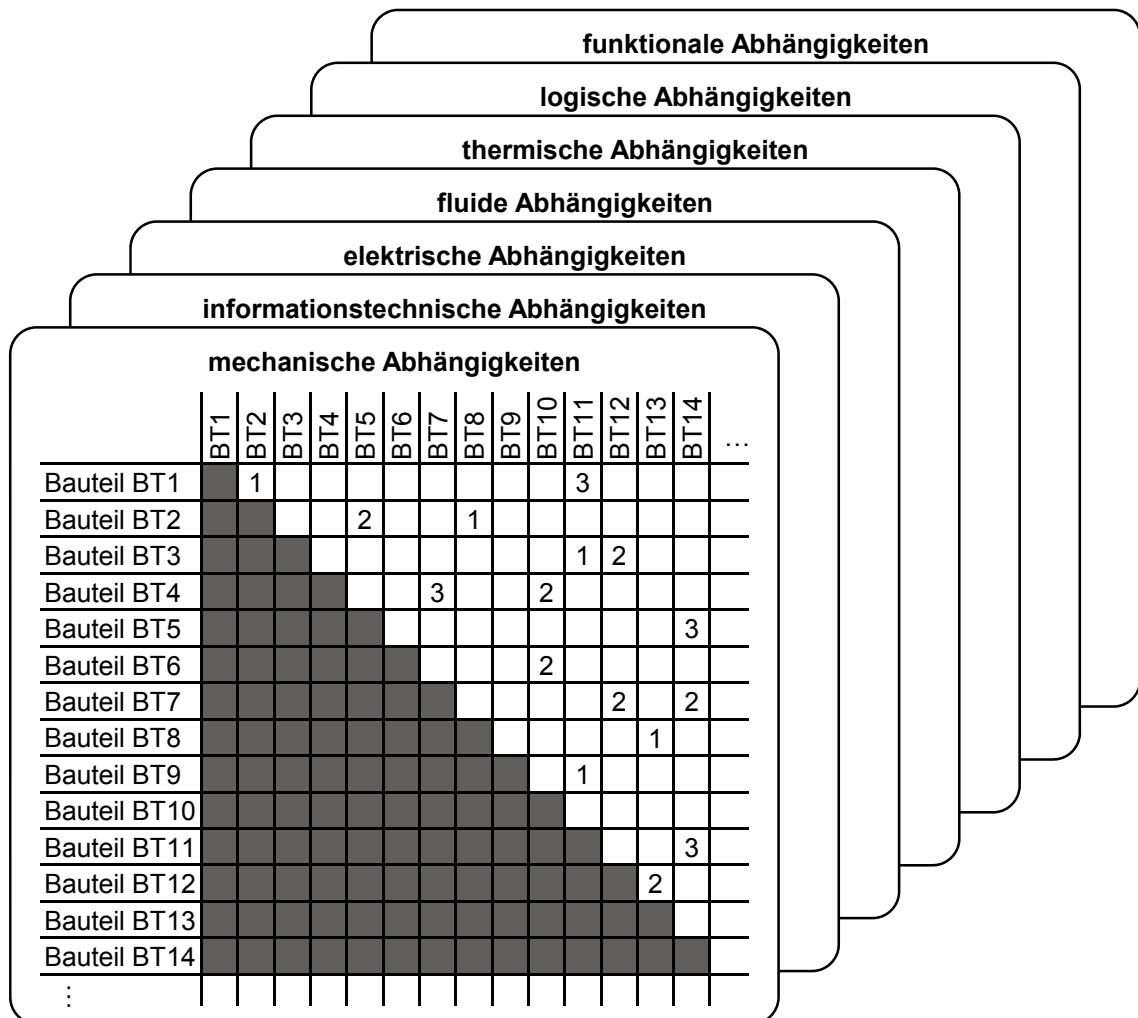


Abbildung 18: Betriebsmittelstrukturmodell eines beispielhaften Betriebsmittels (1: geringer, 2: mittlerer, 3: hoher Aufwand zum Lösen und Wiederherstellen der Abhängigkeit)

Abbildung 18 zeigt ein Betriebsmittelstrukturmodell mit einer dreistufigen Gewichtung. Das Betriebsmittelstrukturmodell ist offen gestaltet, so dass neue Abhängigkeitsarten bzw. -kategorien problemlos hinzugefügt werden können. Die DSMs zur Modellierung der Betriebsmittelstruktur sind symmetrisch, da bei den Abhängigkeiten keine Wirkrichtungen bestehen (z. B. Schraubverbindung zwischen zwei Bauteilen). Daher ist lediglich eine Hälfte der Matrix auszufüllen.

Zwischen zwei Bauteilen können auch mehrere Abhängigkeiten bestehen. So kann ein Bauteil in ein anderes eingepresst sein und diese Pressung durch ein zusätzliches Verkleben noch gesichert werden. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird zur Berechnung von Kennzahlen (z. B. zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit) ausschließlich die höher gewichtete Abhängigkeit verwendet.

Zur Minimierung des Modellierungsaufwands sollten die Modelle bereits während der Betriebsmittelkonstruktion erstellt werden. Eine nachträgliche Erstellung ist aufwändiger, da bspw. nicht alle Abhängigkeiten unmittelbar erkennbar sind. Wird das Betriebsmittel von einem Lieferanten bereitgestellt, sind die Modelle in den Lastenheften zu fordern.

5.3 Modell zur Darstellung von Rekonfigurationen

Im Rahmen der Methodik sind die Auswirkungen von Bauteiladaptionen aufzuzeigen (siehe Abschnitt 4.2). Folglich wird ein Modell zur Darstellung von Rekonfigurationen mit den erforderlichen Adaptionen benötigt. Die darzustellenden Rekonfigurationen werden in von Form Graphen modelliert (siehe Abschnitte 3.3.2 und 3.2), wobei für jede Rekonfigurationsalternative ein eigener Rekonfigurationsgraph zu erstellen ist.

Im Rekonfigurationsgraphen werden alle Bauteile abgebildet, die auf Grund einer geänderten Anforderung zu adaptieren sind (siehe Abbildung 19). Der erste Knoten stellt die geänderte Anforderung dar, die die weiteren Knoten hervorruft. Bei diesen handelt es sich um zu adaptierende Bauteile. Adaptionen an Betriebsmittelbauteilen können auf zwei Arten hervorgerufen werden. Erstens werden sie direkt auf Grund geänderter Anforderungen ausgelöst. So kann bspw. ein neu zu fertigendes Produkt größere Abmessungen als der Vorgänger aufweisen und somit den Tausch eines Greifers bewirken. Zweitens können sie indirekt verursacht sein. Überschreitet bspw. durch den Tausch des Greifers die Masse die durch einen Roboter handhabbare Masse, wird durch das neue Produkt über die Anpassung des Greifers indirekt auch der Austausch des Roboters hervorgerufen.

Da die Adaption an einem Bauteil eine Adaption an dem anderen Bauteil auslöst, bestehen hier zwischen den adjazenten bzw. verbundenen Knoten im Rekonfigurationsgraphen gerichtete Anhängigkeiten. Somit handelt es sich um gerichtete Graphen, für die ein Anfangs- und Endpunkt existiert (siehe Abschnitt 3.3.2).

Ferner können zwei unterschiedliche Adaptionen Auswirkungen auf ein Bauteil haben. Daher sind die Rekonfigurationsgraphen keine Wurzelbäume. Außerdem sind sie zusammenhängend, da alle Knoten miteinander verbunden sind.

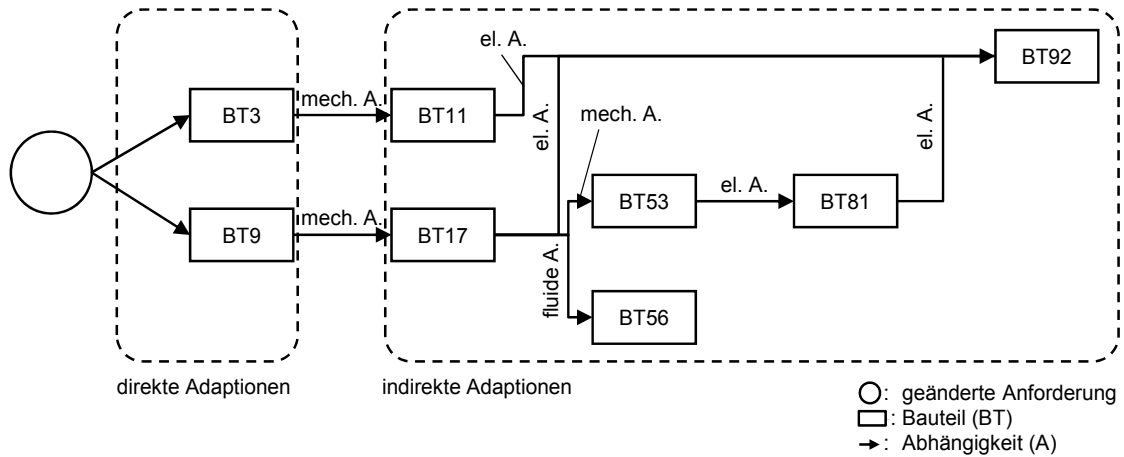


Abbildung 19: Grobe Struktur eines beispielhaften Rekonfigurationsgraphen

Es ist nicht möglich Zyklen wie in Abbildung 7 darzustellen, da die Wege im Rekonfigurationsgraphen immer von links nach rechts verlaufen. Dennoch können die gleichen Bauteilfolgen wiederholt im Rekonfigurationsgraph auftauchen. Daher können Zyklen in Form von gleichen Bauteilfolgen vorkommen (siehe Abbildung 20).⁴⁵ Solche Zyklen werden hier als Kreisschlüsse bezeichnet.

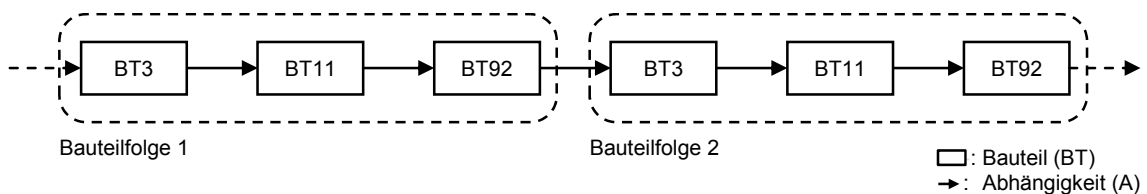


Abbildung 20: Kreisschluss in Form sich wiederholender, identischer Bauteilfolgen

Die Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen werden dem Betriebsmittelstrukturmodell (siehe Abbildung 18) entnommen. Dabei werden im Rekonfigurationsgraph nur zu adaptierende Bauteile aufgeführt und nicht alle Bauteile, mit denen Abhängigkeiten bestehen.

Abbildung 21 skizziert einen beispielhaften Knoten in einem Rekonfigurationsgraphen. Es wird die Nummer sowie die Art der Adaption (Austauschen, Entfernen, Anpassen oder Hinzufügen, siehe Abschnitt 1.3.1) angegeben und

⁴⁵ Der Umgang mit Kreisschlüssen wird bei der Erläuterung der Methodik behandelt (siehe Abschnitt 6.5.2).

beschrieben. Sofern ein Bauteil wiederholt anzupassen ist, wird es in dem Graphen mehrmals aufgeführt. Um dies zu erkennen, wird neben einer Bauteilnummer auch eine Versionsnummer angeführt. Die Bauteilnummer ändert sich nicht, wohingegen die Versionsnummer bei jedem Anpassen des Bauteils erhöht wird. Sie wird dabei graphübergreifend fortgeschrieben, also über unterschiedliche Rekonfigurationen hinweg, die zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt werden. Dies ermöglicht das Erkennen, ob das Bauteil bei vorangegangenen Rekonfigurationen bereits anzupassen war. Unternehmensspezifisch lässt sich für die Bauteilnummer auch eine schon bestehende Nummer heranziehen (bspw. in BOM-Systemen (Stückliste, engl. Bill-of-Materials), siehe bspw. GAUSEMEIER ET AL. 2006), um für das gleiche Bauteil in unterschiedlichen Systemen nicht jeweils eine eigene Nummerierung zu führen.

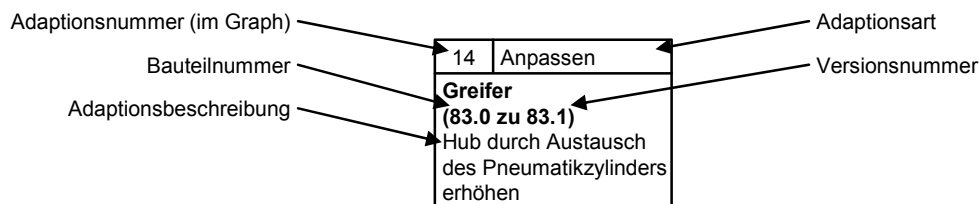


Abbildung 21: Beispielhafter Knoten im Rekonfigurationsgraph

5.4 Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit

Abbildung 22 stellt die unterschiedlichen Bewertungen dar, die in dieser Arbeit ausgeführt werden. Bei der Bewertung von alternativen Rekonfigurationen liegen spezifische Änderungen von Anforderungen und somit konkrete Rekonfigurationsbedarfe vor (siehe Abschnitt 5.5). Daher ist eine strukturelle und betriebswirtschaftliche Evaluation möglich.



Abbildung 22: Bewertungen im Rahmen dieser Arbeit

Die Rekonfigurationsfähigkeit ist unabhängig von spezifischen Rekonfigurationen. Daher kann sie jedoch nicht auf Kosten- oder Zeitbasis ausgedrückt werden. Sie ist aber abhängig von der Betriebsmittelstruktur, die den Aufbau und somit die Aufwände für Rekonfigurationen bestimmt (siehe Abschnitte 1.3.1 und 3.2).

Somit erfolgt die Bewertung basierend auf dem Betriebsmittelstrukturmodell.⁴⁶ Dabei sind die Gewichtungen der Abhängigkeitsarten einzubeziehen, da der Aufwand, Abhängigkeiten zwischen Bauteilen zu lösen und wiederherzustellen, die Rekonfigurationsfähigkeit determiniert (siehe Abschnitt 5.2).

Die Rekonfigurationsfähigkeit eines Betriebsmittels hängt insbesondere von der Komplexität seines Aufbaus ab. ULRICH & PROBST (2001) definieren Komplexität als Kompliziertheit und Dynamik eines Systems (siehe Abbildung 23). Die Dynamik bezieht sich auf die Veränderlichkeit. Kompliziertheit wird von der Anzahl der Elemente und Beziehungen sowie deren Verschiedenheit festgelegt.⁴⁷

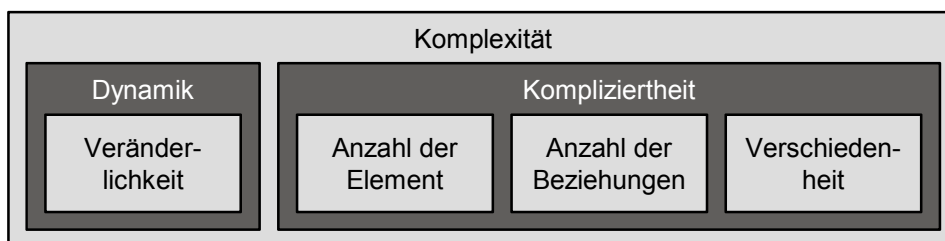


Abbildung 23: Komplexität (in Anlehnung an ULRICH & PROBST 2001)

Zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit wird daher dieser Definition von Komplexität Rechnung getragen, wozu basierend auf dem Betriebsmittelstrukturmodell die Berechnung von vier Kennzahlen erfolgt. Die Beschreibung sowie die Berechnung der Kennzahlen ist im Anhang dargestellt (siehe Abschnitt A6). Die vier Kennzahlen zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit sind

- die Anzahl der Bauteile (AnzBT),
- die Abhängigkeiten pro Bauteil (Anz(A/BT)),
- die Anzahl der Kreise (AnzKR) sowie
- die Modularität (Mod).

⁴⁶ Zur Bewertung von DSMs und somit Strukturmodellen existiert eine Vielzahl von Kennzahlen (siehe bspw. KREIMEYER 2010). Diese wurden hinsichtlich ihrer Eignung untersucht, Aussagen bzgl. der Rekonfigurationsfähigkeit zu treffen. Zahlreiche Kennzahlen lassen sich auf Grund ihrer Aussagekraft nicht direkt heranziehen. Darüber hinaus resultieren viele dieser Kennzahlen bei ungerichteten Graphen, wie sie im Betriebsmittelstrukturmodell hinterlegt sind, in dem Wert Null oder in gleichen Werten (BIEDERMANN & LINDEMANN 2011). Sie geben also deckungsgleiche Informationen wider, wodurch keine differenzierte Beurteilung möglich ist.

⁴⁷ Diese Definition für Komplexität wurde auf Grund ihrer weiten Verbreitung sowie hohen Akzeptanz gewählt. Sie wird von vielen Autoren bestärkt, nach deren Auffassung die Komplexität eines Systems mit der Anzahl der Elemente, der Anzahl der Beziehungen zwischen den Elemente, der Verschiedenartigkeit von Elementen und Beziehungen sowie der Veränderlichkeit im Zeitverlauf steigt (vgl. LINDEMANN 2009, LINDEMANN ET AL. 2009, AHLEMEYER & KÖNIGSWIESER 1998, WAGNER & PATZAK 2007).

Zur Darstellung der Anzahl der Elemente sowie der Anzahl der Beziehungen (siehe Abbildung 23) werden die *Anzahl der Bauteile* (AnzBT) und die *Abhängigkeiten pro Bauteil* (Anz(A/BT)) berechnet. Die Veränderlichkeit bzw. Dynamik kann nicht in die Bewertung einbezogen werden, da die Bewertung unabhängig von spezifischen Rekonfigurationen und somit Veränderungen durchgeführt wird. Ferner wird die Verschiedenheit bei der Bewertung nicht als eigene Kennzahl beachtet, da die Verschiedenheit der Abhängigkeiten bereits über die Gewichtungen in die Abhängigkeiten pro Bauteil (Anz(A/BT)) einfließt. Bei dieser Kennzahl werden unterschiedliche Abhängigkeiten verschieden gewichtet.

Neben diesen beiden Kennzahlen wird die *Anzahl der Kreise* (AnzKR) im Betriebsmittelstrukturmodell als weitere Kennzahl für die Rekonfigurationsfähigkeit berechnet. Ein Kreis besteht aus drei oder mehr Bauteilen, die über Abhängigkeiten mit sich selbst in Verbindung stehen (siehe Abschnitt 3.3.2). Adaptionen an Bauteilen in den von LINDEMANN ET AL. (2009, S. 67) als „Feedback-Loops“ bezeichneten Kreisen können sich reflexiv auf das anfänglich anzupassende Bauteil auswirken und somit zu selbstverstärkenden Effekten führen (RANGANATH & RODRIGUES 2008, LINDEMANN ET AL. 2009). Kreise erhöhen die Komplexität von Rekonfigurationen und reduzieren somit die Rekonfigurationsfähigkeit, da die durch sie hervorgerufenen Effekte möglicherweise nicht auflösbar sind (siehe auch Abschnitt 6.5.2).

Ferner unterstützt eine hohe Modularität die Rekonfigurationsfähigkeit von Betriebsmitteln (WIENDAHL ET AL. 2007). DRABOW (2006) und NOFEN (2006) bezeichnen sie als grundlegenden Wandlungsbefähiger.⁴⁸ Daher stellt die Kennzahl zur Beschreibung der *Modularität* (Mod) die vierte Kennzahl dar.

Auf Grund der Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit können tendenzielle Aussagen getroffen werden, mit welchem Aufwand ein Betriebsmittel an neue Anforderungen angepasst werden kann. Damit können bspw. im Rahmen eines Investitionsentscheidungsprozesses unterschiedliche Betriebsmittel verglichen und in Kombination mit weiteren Kenngrößen (z. B. Invest) ausgewählt werden.

⁴⁸ Näheres zu Wandlungsbefähigern siehe Fußnote 7, S. 9.

5.5 Bewertung von alternativen Rekonfigurationen

Im Rahmen der Methodik ist aus unterschiedlichen alternativen Rekonfigurationen die beste Alternative auszuwählen. Hierfür sind die Alternativen hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien zu bewerten. Dies erfolgt einerseits durch eine strukturelle Betrachtung. Da konkrete Rekonfigurationen evaluiert werden, wird andererseits eine betriebswirtschaftliche Betrachtung vorgenommen. Die folgenden Abschnitte stellen die strukturelle sowie die betriebswirtschaftliche Betrachtung vor. Die Spezifizierung der nachfolgend vorgestellten Kennzahlen (siehe Abschnitte A3 und A5) sowie der zu Grunde gelegten Kostengruppen (siehe Abschnitt A4) kann dem Anhang entnommen werden.

5.5.1 Strukturelle Betrachtung

Die strukturelle Bewertung der Alternativen erfolgt unter Beachtung der identifizierten Rekonfigurationsbedarfe. Daher werden hierfür die Rekonfigurationsgraphen (siehe Abbildung 19) sowie das Betriebsmittelstrukturmodell (siehe Abbildung 18) herangezogen. Diese Bewertung ist gegenüber der betriebswirtschaftlichen Bewertung dahingehend vorteilhaft, als dass sie ohne Abschätzung von unsicheren Kosten, Durchführungsdauern etc. vorgenommen werden kann.

Der strukturell bewertbare Aufwand für Rekonfigurationen hängt von dem Aufbau des Rekonfigurationsgraphen bzw. seiner Komplexität ab (siehe Abbildung 23). Die Kompliziertheit wird entsprechend der Definition anhand von drei Kennzahlen beschrieben. Die Anzahl der Elemente wird über die *Anzahl der Adaptionen* (Anz_{Adapt}) sowie die Anzahl der Beziehungen über die *Anzahl der Abhängigkeiten* (Anz_A) gewichtet dargestellt. Bei der Kennzahl Anz_{Adapt} kann es vorkommen, dass ein Bauteil mehrmals gezählt wird, da es im Rekonfigurationsgraphen an unterschiedlichen Stellen vorkommt und somit mehrmals zu adaptieren ist. Um die Verschiedenheit von Rekonfigurationsalternativen auszudrücken, sind die von Adaptionen betroffenen Bauteile anzugeben und somit solche Mehrfachzählungen zu vernachlässigen. Dazu wird die *Anzahl der zu adaptierenden Bauteile* ($Anz_{BT_{adapt}}$) berechnet. Hierbei werden Bauteile, die mehrfach anzupassen sind, lediglich ein Mal gezählt und somit die Anzahl der verschiedenen betroffenen Bauteile skizziert.

Die Charakterisierung der Veränderlichkeit des Betriebsmittels erfolgt durch die Angabe der *Reichweite* ($Reichw$). Mit dieser Kennzahl wird der Anteil von Bauteilen an den gesamten Betriebsmittelbauteilen beschrieben, der im Zeitverlauf

von Adaptionen betroffenen ist. Damit wird dargelegt, wie stark sich die alternativen Rekonfigurationen unterscheiden und wie stark der Einfluss der Rekonfiguration auf das Betriebsmittel bzw. der Umfang der Veränderung ist. Somit wird der Dynamik Rechnung getragen (siehe Abbildung 23).

Zusammenfassend sind die Kennzahlen zur strukturellen Bewertung unterschiedlicher Rekonfigurationsalternativen

- die Anzahl der Adaptionen ($AnzAdapt$),
- die Anzahl der Abhängigkeiten ($AnzA$),
- die Anzahl der zu adaptierenden Bauteile ($AnzBT_{adapt}$) sowie
- die Reichweite ($Reichw$).

Es wird lediglich der Intensität unterschiedlicher Abhängigkeiten zwischen Bauteilen anhand der Gewichtungen Rechnung getragen. Eine Differenzierung zwischen unterschiedlichen Adaptionen an Bauteilen mit zusätzlichen Gewichtungsfaktoren erfolgt hier nicht. Diese Unterschiede werden im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Betrachtung durch Ermittlung der Aufwände berücksichtigt.

5.5.2 Betriebswirtschaftliche Betrachtung

In Investitionsentscheidungsprozessen, wie der Betriebsmittelrekonfigurationsplanung, spielen monetäre Aspekte eine wichtige Rolle, um die Vorteilhaftigkeit zu bewerten. Dies hat auch die in Abschnitt 3.1 dargestellte Studie gezeigt, bei der die Produktionskosten als wichtigster Einflussfaktor genannt wurden (siehe Tabelle 2). Daher wird neben einer strukturellen auch eine betriebswirtschaftliche Bewertung der Rekonfigurationsalternativen durchgeführt. Hierfür werden die Rekonfigurationskosten ermittelt. Da der Nutzen nicht quantifiziert wird, handelt es sich um ein Partialmodell und nicht um ein Gesamtmodell der Wirtschaftlichkeit. Jedoch ist eine Betrachtung der Kostenseite ausreichend zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit (siehe VDI 2225).

Nachfolgend werden die zu Grunde gelegten Kostenarten und die daraus resultierenden Kennzahlen erläutert. Die gesamten Rekonfigurationskosten stellen die übergeordnete Kennzahl dar. Zunächst werden die Kennzahlen ohne Unsicherheiten abgebildet. Da jedoch die Kosten sowie die Rekonfigurationen zu antizipieren sind, werden aus diesen Unschärfen resultierende Unsicherheiten in Form einer Risikoanalyse (siehe Abschnitt 3.6.1) berücksichtigt. Dies erfolgt im letzten Teil dieses Abschnitts.

Zu Grunde gelegte Kosten

Der betriebswirtschaftlichen Bewertung der Alternativen werden in Anlehnung an REDEKER (1969), ZHANG ET AL. (2006), RASCH (2000), VDMA 34160, DIN 60300-3-3 sowie der Untersuchung von durchgeführten Rekonfigurationen sechs Kostengruppen, die im Rahmen von Rekonfigurationsprozessen auftreten können, zu Grunde gelegt. Die Beschreibung diese Kostengruppen kann dem Anhang entnommen werden (siehe Abschnitt A4). Dabei handelt es sich um

- Mitarbeiterkosten (K_{Ma}),
- Entwicklungskosten (K_{Ent}),
- Materialkosten (K_{Mat}),
- Maschinenkosten (K_{Masch}),
- Stillstandkosten (K_{Still}) und
- sonstige Kosten (K_{sonst}).

Bewertung der Alternativen

Als betriebswirtschaftliche Kennzahl werden für jede Alternative die anfallenden Rekonfigurationskosten zusammengefasst, abgezinst und somit die *gesamten Rekonfigurationskosten* berechnet ($K_{Rekonfig}$). Diese Kosten setzen sich aus den zuvor genannten Kostengruppen zusammen. Da die Kosten erst zukünftig anfallen, werden sie, wie bei der Kapitalwertmethode (siehe Abschnitt 3.4.1), auf den Zeitpunkt der Bewertung abgezinst. Hiermit ergeben sich die gesamten Rekonfigurationskosten (siehe Formel (12), Abschnitt A5), deren Zahlenwert auf Grund der ausschließlichen Kostenbetrachtung negativ ist. Daher unterscheidet sich diese Kennzahl von der üblichen Kapitalwertmethode dahingehend, dass lediglich Auszahlungen und keine Einzahlungen betrachtet werden.

Integration von Unsicherheiten

Im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Bewertung werden Annahmen über zukünftige Kostengrößen getroffen, die auf den Bewertungszeitpunkt abgezinst werden. Auf Grund von Unschärfen bei der Prognose dieser Werte (z. B. schwankende zukünftige Materialpreise) oder auch auf Grund von Prozesskenntnissen (z. B. Dauern von zuvor noch nicht durchgeführten Adaptionen), sind Unsicherheiten zu berücksichtigen. Wegen der in Abschnitt 3.2 genannten Vorteile werden Unsicherheiten in Form einer Risikoanalyse einbezogen.

Die gesamten Rekonfigurationskosten der jeweiligen Alternative stellen hier den Zielwert dar. Der erste Schritt der in Abschnitt 3.6.1 vorgestellten Risikoanalyse, die Erstellung des Entscheidungsmodells, wurde durch die vorangehende Erläuterung der gesamten Rekonfigurationskosten (K_{Rekonfig}) bereits dargelegt. Daraufhin sind im zweiten Schritt die unsicheren Eingangsparameter zu modellieren. Die quantitativen Unsicherheiten, also die unsicheren Kosten bzw. deren Bestandteile (siehe Abschnitt A4), werden als Wahrscheinlichkeitsverteilungen (siehe Abschnitt 3.6.1) modelliert (vgl. Fußnote 29, S. 44), bevor sie zu den gesamten Rekonfigurationskosten (K_{Rekonfig}) zusammengefasst und abgezinst werden. Der Zinssatz ist hierbei üblicherweise auch unsicher. Qualitative Unsicherheiten können darüber hinaus in Form von Fuzzy-Sets integriert werden (siehe Abschnitt 3.6.1).

Die Festlegung der unsicheren Werte sowie deren Modellierung sind anwendungsfallabhängig bzw. unternehmensspezifisch durchzuführen. So können bspw. Mitarbeiterstundensätze (siehe Formel (6)) sicher sein, wenn der Zeitpunkt der Rekonfiguration noch innerhalb der Laufzeit des Tarifvertrags liegt. Sind allerdings zwischenzeitlich Tarifverhandlungen zu führen, können sie nicht als fix angenommen werden.

Daraufhin sind im dritten Schritt Abhängigkeiten zwischen den unsicheren Eingangsparametern abzubilden. Für quantitative Unsicherheiten wird auf Korrelationskoeffizienten und bei qualitativen Unsicherheiten auf rekurrente Fuzzy-Systeme zurückgegriffen (siehe Abschnitt 3.6.1).

Durch die Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zielwerts im vierten Schritt resultieren dann die als Unsicherheiten modellierten Eingangsgrößen durch eine Monte-Carlo-Simulation in einer diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilung für die gesamten Rekonfigurationskosten. Dabei wird für jede alternative Rekonfiguration eine Verteilung berechnet. Diese Verteilungen stellen das Ergebnis der betriebswirtschaftlichen Bewertung dar (siehe Abbildung 24). Diese werden mit dem Erwartungswert (μ_x) sowie der Streuung (σ_x) der gesamten Rekonfigurationskosten abgebildet. Um die Chance bzw. das Risiko explizit aufzuzeigen, werden das 5 %-Perzentil (Chance geringerer Kosten) sowie das 95 %-Perzentil (Risiko erhöhter Kosten) aufgezeigt. Damit Ausreißer bzw. Extremwerte bei der Simulation nicht übergewichtet werden, wird nicht das Minimum bzw. das Maximum herangezogen.

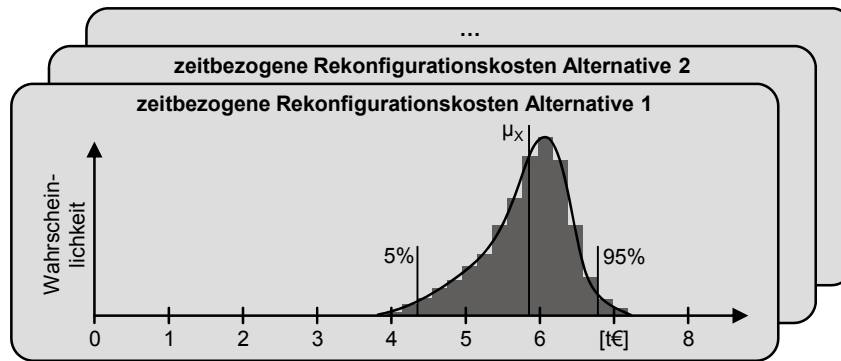


Abbildung 24: Betriebswirtschaftliche Bewertung beispielhafter Alternativen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten

Zusammenfassend sind die Kennzahlen zur betriebswirtschaftlichen Bewertung unterschiedlicher Rekonfigurationsalternativen die gesamten Rekonfigurationskosten (K_{Rekonfig}), die sich zusammensetzen aus

- dem Erwartungswert (μ_x),
- der Chance bzw. dem 5 %-Perzentil (5 %) sowie
- dem Risiko bzw. dem 95 %-Perzentil (95 %).

6 Methodik zur Ermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen

6.1 Übersicht über die Methodik

Die Methodik dient der Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen sowie der Planung von Rekonfigurationen mit der Identifikation von Rekonfigurationsalternativen und der Auswahl der besten Alternative. Sie besteht aus vier Schritten, wobei eine Datenbasis die Grundlage bildet (siehe Abbildung 25). Diese Datenbasis beinhaltet Informationen über das Betriebsmittel. Einerseits ist hier das Betriebsmitteleigenschaftsmodell hinterlegt (siehe Abschnitt 5.1). Andererseits wird zur Abschätzung der Auswirkungen von Rekonfigurationen auf das Betriebsmittel das Betriebsmittelstrukturmodell erstellt (siehe Abschnitt 5.2). Hiermit werden die Einflüsse von Bauteiladaptionen auf weitere Bauteile ermittelt.

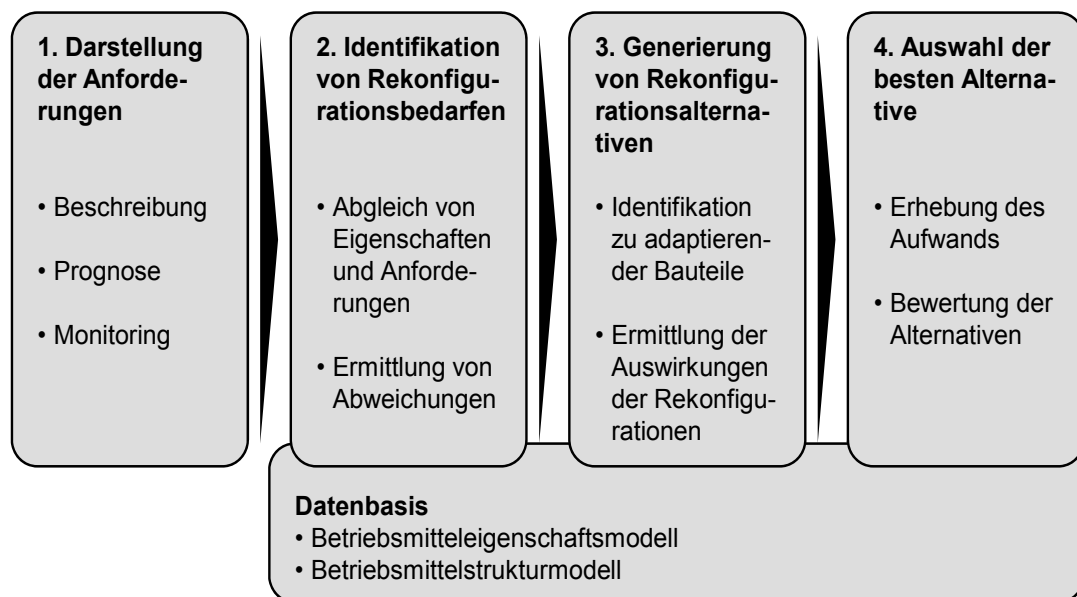


Abbildung 25: Überblick über die Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen

In Schritt 1 sind die Anforderungen an das Betriebsmittel anhand des Betriebsmittelanforderungsmodells (siehe Abschnitt 5.1) darzustellen, die sich aus den Einflussfaktoren ableiten. Sie sind eindeutig zu beschreiben und um Rekonfigurationsbedarfe frühzeitig zu erkennen, sind sie darüber hinaus zu antizipieren. Auf Grund von Prognoseunsicherheiten sind die ursprünglich getroffenen Annahmen bzw. die Anforderungen zu überwachen.

Der Abgleich von Anforderungen und Eigenschaften ermöglicht in Schritt 2 die Ermittlung von Abweichungen und somit die Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen.

Schritt 3 beinhaltet die Generierung von Rekonfigurationsalternativen. Hierfür sind zunächst die Bauteile zu identifizieren, die infolge der Abweichungen direkt zu adaptieren sind, um die geänderten Anforderungen an das Betriebsmittel wieder zu erfüllen. Diese Adaptionen können Folgemaßnahmen an weiteren Bauteilen hervorrufen. Daher sind diese Effekte zu erkennen, um die gesamten Auswirkungen der Rekonfiguration zu ermitteln. Rekonfigurationsbedarfe können unterschiedlich erfüllt werden. Diese unterschiedlichen Alternativen werden mit ihren jeweiligen Auswirkungen ebenfalls in Schritt 3 aufgezeigt.

In Schritt 4 erfolgt die Auswahl der besten Alternative. Dazu wird der Aufwand erhoben, um die jeweilige Alternative durchzuführen (z. B. Materialkosten, Adaptiondauer), und sowohl eine strukturelle als auch betriebswirtschaftliche Bewertung vorgenommen (siehe Abschnitt 5.5). Basierend hierauf wird die beste Alternative ausgewählt, wobei noch weitere Randbedingungen zu beachten sind, wie bspw. das sich ergebende Betriebsmitteleigenschaftsmodell der jeweiligen Alternative oder auch das Alter des Betriebsmittels. Unterschiedliche Rekonfigurationsalternativen können darüber hinaus zu anderen Eigenschaften des Betriebsmittels führen. Da durch diese Eigenschaften nachfolgende Rekonfigurationsbedarfe determiniert werden, sind die sich ergebenden Eigenschaften der einzelnen Alternativen bei der Auswahl zwingend zu beachten. Nach der Auswahl ist die Rekonfiguration rechtzeitig anzustoßen sowie die Datenbasis entsprechend der neuen Eigenschaften und der neuen Struktur anzupassen.

Schritt 1 läuft kontinuierlich und sobald Anforderungsänderungen festgestellt werden, wird Schritt 2 ausgelöst. Werden durch die geänderten Anforderungen Rekonfigurationen notwendig, sind Schritt 3 und Schritt 4 durchzuführen. Schritt 2, Schritt 3 und Schritt 4 greifen auf die Datenbasis zurück, wobei in Schritt 4 entsprechend der Auswahl Änderungen an den Modellen vorzunehmen sind, um hier die Aktualität der Daten zu gewährleisten. Nachfolgend wird die Methodik detailliert beschrieben.

6.2 Datenbasis

Die Methodik basiert auf zwei Modellen, die das betrachtete Betriebsmittel beschreiben (Betriebsmitteleigenschaftsmodell und Betriebsmittelstrukturmodell, siehe Abschnitte 5.1 und 5.2). Sie stellen die Datenbasis dar, da aus ihnen während der Methodikanwendung benötigte Informationen gewonnen werden. Sie sind bei der erstmaligen Anwendung zu erstellen und zu aktualisieren, wenn Änderungen am Betriebsmittel durchgeführt werden.

In den Anlagen- bzw. Betriebsmittelstammdaten sind unterschiedliche Informationen über das Betriebsmittel angegeben. In den dort enthaltenen Strukturdaten sind die Baugruppen und Bauteile des Betriebsmittels hinterlegt. Darüber hinaus geben weitere Angaben technische (z. B. Abmessungen, Gewicht, Leistungsdaten) und wirtschaftliche Informationen (z. B. Anschaffungswert) des Betriebsmittels (RASCH 2000, NEBL 2006). Diese Informationen werden zum Erstellen der Modelle herangezogen. Außerdem sind die Modelle den Stammdaten hinzuzufügen, damit sie einfach wiederauffindbar sind. Die folgenden Abschnitte beschreiben die beiden Modelle sowie die Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit basierend auf dem Betriebsmittelstrukturmodell.

6.2.1 Betriebsmitteleigenschaftsmodell

Die Erstellung des Betriebsmitteleigenschaftsmodells ist in Abschnitt 5.1 erläutert. Dieses ist bei der erstmaligen Methodikanwendung zu erstellen und bei Rekonfigurationen anzupassen, um das Modell stets aktuell zu halten. Die benötigten Kriterien sowie jeweiligen Ausprägungen sind individuell auszuwählen und zu quantifizieren bzw. zu beschreiben. So sind bspw. mitarbeiterbezogene Kriterien zu vernachlässigen, wenn das Betriebsmittel vollautomatisiert betrieben wird. Abbildung 26 zeigt ein beispielhaftes Betriebsmitteleigenschaftsmodell.

Die zum Aufbau des Modells benötigten Daten können unterschiedlichen Quellen stammen. Es bieten sich hierfür bspw. in Unternehmen vorhandene Betriebsmitteldatenblätter, Pflichtenhefte und Anlagenstammdaten oder auch weitere betriebswirtschaftliche und technische Daten an (RASCH 2000, NEBL 2006, KIEFER 2007). Sind die vorhandenen Daten nicht ausreichend, sind die notwendigen Informationen zu ermitteln (z. B. durch Analysen der Betriebsmittel). Die Beschreibung der Kriterien mit Ausprägungen, Einheiten, Datenquellen etc. ist im Anhang dargestellt (siehe Abschnitt A1).

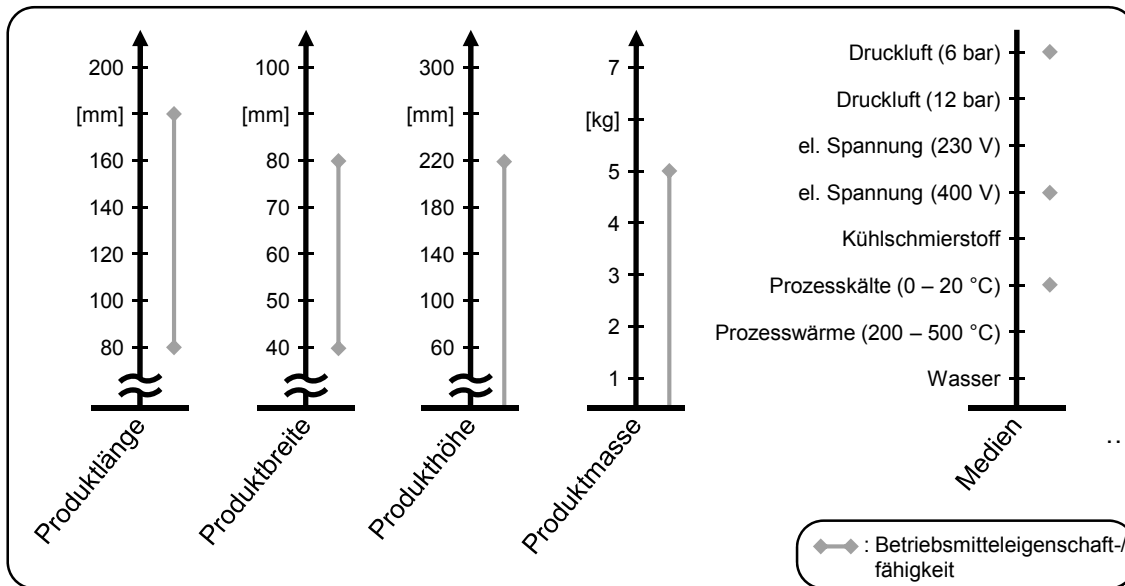


Abbildung 26: Ausschnitt eines beispielhaften Betriebsmitteleigenschaftsmodells

6.2.2 Betriebsmittelstrukturmodell

Die Darstellung des Betriebsmittelstrukturmodells erfolgte bereits in Abschnitt 5.2. Das Betriebsmittelstrukturmodell ist wie das Betriebsmitteleigenschaftsmodell bei erstmaliger Durchführung der Methodik zu erstellen und bei Rekonfigurationen zu aktualisieren. Hierfür benötigte Daten können bspw. aus CAD-Modellen entnommen werden. Die Modelle sollten bereits während der Betriebsmittelkonstruktion, da dann die Aufwände niedriger als zu späteren Zeitpunkten sind, erstellt bzw. in Lastenheften von Lieferanten gefordert werden.

6.2.3 Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit

Entsprechend der Erläuterungen in Abschnitt 5.3 kann die Rekonfigurationsfähigkeit des Betriebsmittels basierend auf dem Betriebsmittelstrukturmodell erhoben werden. Dieser Schritt ist zur Ermittlung bzw. Planung der Rekonfigurationen jedoch nicht zwingend erforderlich, kann aber bspw. im Rahmen eines Investitionsentscheidungsprozesses zur Entscheidungsunterstützung dienen.

6.3 Schritt 1: Darstellung der Anforderungen

Im ersten Schritt der Methodik sind die Anforderungen an das Betriebsmittel darzustellen. Diese werden anhand definierter Kriterien im Betriebsmittelanfor-

derungsmodell beschrieben. Da diese Kriterien auf Grund dynamischer Änderungen nicht statisch sind, sind sie zu prognostizieren und kontinuierlich zu überwachen, um Änderungen und somit potenzielle Rekonfigurationsbedarfe frühzeitig zu erkennen.

6.3.1 Betriebsmittelanforderungsmodell

Abschnitt 5.1 erläuterte bereits das Betriebsmittelanforderungsmodell (siehe Abbildung 27), das u. a. aus Einflussfaktoren und Qualitätskriterien für Anforderungen abgeleitet wurde. Neben seiner Erstellung bei der erstmaligen Methodikanwendung ist es im Gegensatz zum Betriebsmitteleigenschafts- und zum Betriebsmittelstrukturmodell nicht nur bei Rekonfigurationen anzupassen. Hierfür sind die Kriterien (siehe Abschnitt A2) kontinuierlich zu prognostizieren und das Modell bei identifizierten Änderungen anzugleichen.

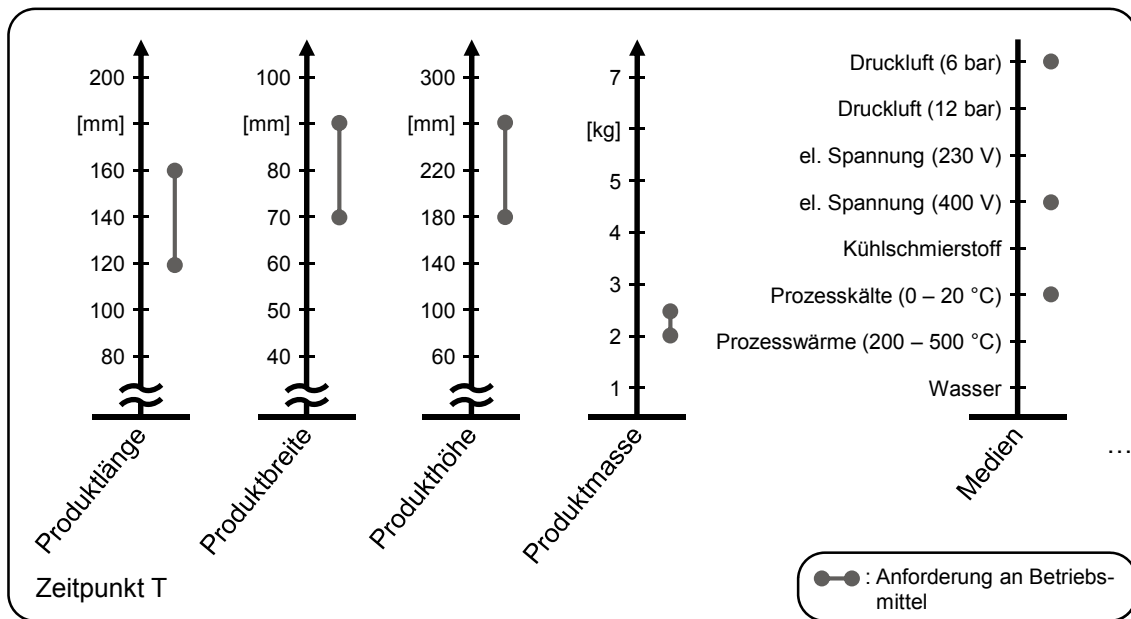


Abbildung 27: Ausschnitt eines beispielhaften Betriebsmittelanforderungsmodells zum Zeitpunkt T

6.3.2 Prognose der Anforderungen

Zur Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen sind die Anforderungen zu prognostizieren, um somit Anforderungsänderungen frühzeitig zu erkennen, die zu den Bedarfen führen können. Dabei ruft nicht jede Änderung einen Bedarf hervor. Lediglich wenn hierdurch eine Eigenschaft des Betriebsmittels nicht mehr ausreicht wird eine Rekonfiguration notwendig.

Der Prognosezeitraum ist hierbei nicht fest definierbar. Idealerweise ist der gesamte Lebenszyklus des Betriebsmittels zu betrachten. Dieser ist abhängig von Betriebsmitteltyp und Branche und liegt üblicherweise zwischen 10 und 20 Jahren (KARL ET AL. 2012A). Allerdings ist eine exakte Vorhersage von Anforderungen über diesen Zeitraum auf Grund von Prognoseunschärfen nicht realistisch. Der Prognosezeitraum sollte jedoch mindestens den Zeitraum umfassen, den es dauert auf Anforderungsänderungen zu reagieren, also Rekonfigurationen durchzuführen. Dies ist bspw. abhängig von dem Rekonfigurationsumfang oder auch dem Unternehmen (z. B. ob das Unternehmen selbstständig die Rekonfiguration durchführen kann oder ob externe Fachkräfte benötigt werden). Die Rekonfigurationsdauer umfasst dabei neben der eigentlichen Durchführung an der Anlage auch die Vorbereitung (z. B. Teilebeschaffung, Durchführungsplanung) sowie die Nachbereitung (z. B. Hochlaufphase der Anlage).

Darüber hinaus ist der Prognosezeitraum ebenfalls davon abhängig, wie schnell sich Anforderungen ändern können. Dabei ist zu berücksichtigen, ob die Anforderungen aus Einflussfaktoren resultieren, die eher für eine strategische oder eine operative Planung heranzuziehen sind (siehe Abschnitte 3.1 und A2). Operative Faktoren ändern sich kurzfristiger als strategische. Somit sind diese häufiger und in kürzeren Abständen zu betrachten. Die zur Prognose benötigten Daten stellen für diese Methodik Input-Werte dar, die von unterschiedlichen Quellen zur Verfügung gestellt werden (siehe Abschnitt A2). Zur Prognose können abhängig von den zur Verfügung stehenden Daten und zu prognostizierenden Faktoren verschiedene Verfahren herangezogen werden (siehe Abschnitte 3.5, 3.2 und 5.1).

Die prognostizierten Anforderungen werden im Betriebsmittelanforderungsmodell abgebildet. Eine einmalige Prognose der Anforderungen an Betriebsmittel vor der Inbetriebnahme ist dabei nicht zielführend. Sich dynamisch verändernde Einflussfaktoren sowie Unsicherheiten bei der Prognose von Anforderungen führen zu Änderungen der initial getroffenen Annahmen. Daher ist durch regelmäßiges Überwachen, Prognostizieren (abhängig von der Dynamik des Umfeldes z. B. monatlich, quartalsweise oder auch jährlich) und folglich Adaptieren des Betriebsmittelanforderungsmodells die Aktualität der Daten sicherzustellen. Nur somit können Rekonfigurationsbedarfe, die bei der initialen Betrachtung noch nicht bekannt waren oder Abweichungen von initial getroffenen Annahmen, frühzeitig erkannt werden.

6.4 Schritt 2: Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen

Dieser Schritt dient der Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen. Er wird ausgeführt bei der erstmaligen Anwendung der Methodik sowie nach der Änderung von Anforderungen in Schritt 1. Zur Identifikation von Bedarfen sind die Eigenschaften des Betriebsmittels mit den geänderten Anforderungen zu vergleichen. Sind die Anforderungen zu einem Zeitpunkt nicht erfüllt, entsteht ein Rekonfigurationsbedarf (siehe bspw. Kriterium „Produkthöhe“ in Abbildung 28). Dabei ist auch der Zeitpunkt des Rekonfigurationsbedarfs anzugeben.

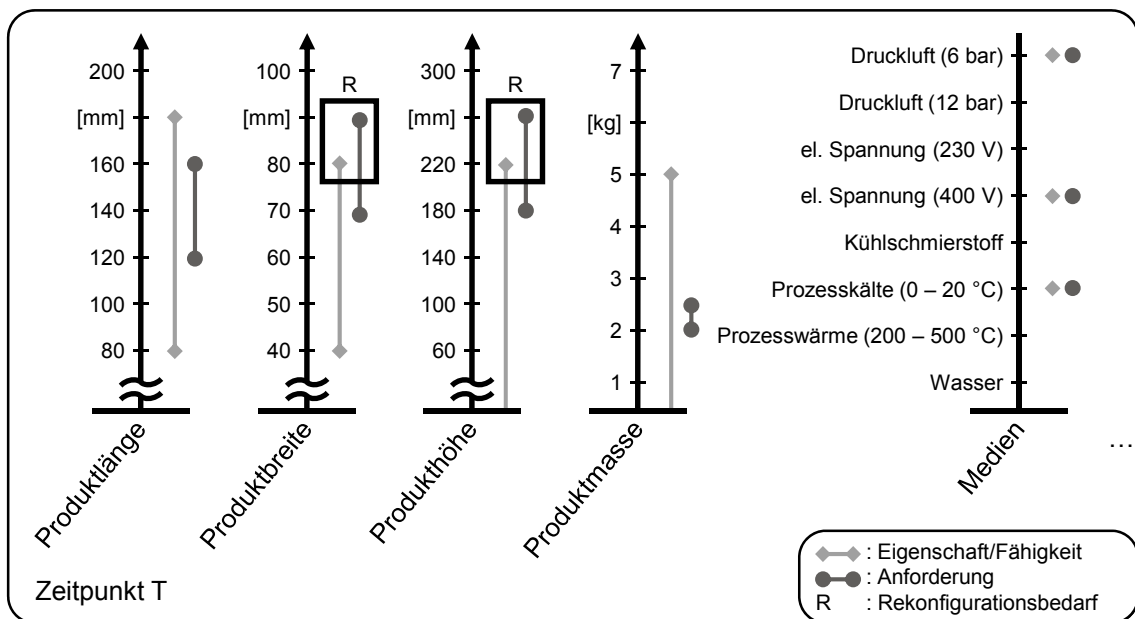


Abbildung 28: Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen durch Abgleich von Anforderungen und Eigenschaften

6.5 Schritt 3: Generierung von alternativen Rekonfigurationen

Dieser Schritt wird nach dem Erkennen von Rekonfigurationsbedarfen in Schritt 2 ausgelöst (siehe Abschnitt 6.4). Werden eine oder mehrere Anforderungen durch die Eigenschaften nicht mehr erfüllt, ist das Betriebsmittel zu rekonfigurieren. Dabei bestehen zumeist unterschiedliche Alternativen, um die notwendigen Rekonfigurationen durchzuführen. Diese werden in diesem Schritt der Methodik ermittelt. Sie werden in Form von Graphen dargestellt, wobei für jede Alternative ein Graph aufgebaut wird (siehe Abschnitt 5.3). Dieser Abschnitt beschreibt zunächst den ersten Schritt zur Generierung von Alternativen, die Identi-

fikation direkt zu adaptierender Bauteile. Diese sind anzupassen, um die Anforderungen wieder zu erfüllen. Diese Anpassungen haben jedoch Auswirkungen auf weitere Bauteile, die im zweiten Schritt zu erfassen und darzustellen sind.

6.5.1 Identifikation direkt zu adaptierender Bauteile

Zwischen den direkt anzupassenden Bauteilen kann es unterschiedliche Beziehungen geben. Einerseits kann die Adaption von mehreren Bauteilen notwendig sein. So könnten auf Grund einer gesteigerten Produktbreite ein Greifer und eine Spannvorrichtung zu adaptieren sein (siehe Abbildung 29). Andererseits könnten unterschiedliche Möglichkeiten bestehen, um eine geänderte Anforderung zu erfüllen. So könnte bspw. ein breiteres Produkt durch neue Greiferbacken oder durch einen neuen Pneumatikzylinder im Greifer, der einen größeren Hub ermöglicht, realisiert werden. Diese Beziehungen werden durch Junktoren dargestellt (siehe RÄDE ET AL. 2000), wodurch die Zusammenhänge einfach visualisierbar und somit leichter erfassbar sind. Eine Konjunktion bzw. ein Und wird durch „ \wedge “ und eine Kontravalenz bzw. ein exklusives Oder durch „ $\bar{\vee}$ “ ausgedrückt.

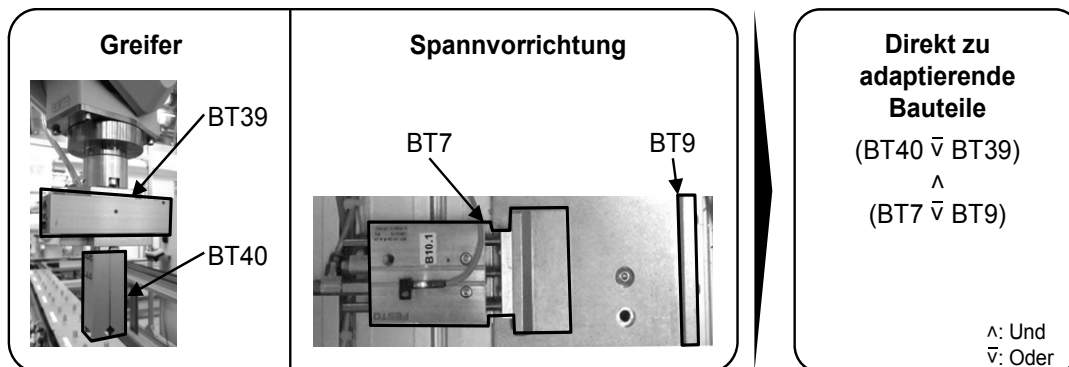


Abbildung 29: Nötige Adaptionen zur Handhabung eines breiteren Produkts

Eine allgemeingültige Zuweisung von Eigenschaften auf Bauteile bzw. Bauteilarten ist nicht möglich, da Eigenschaften bei unterschiedlichen Betriebsmitteln zumeist von anderen Bauteilen bestimmt werden. Dies ist bspw. abhängig von dem spezifischen Betriebsmittel, der Branche, dem Unternehmen oder auch der Ausprägung bzw. der Höhe der Ausprägungsänderung. Daher sind bei jeder Anwendung der Methodik die direkt zu adaptierenden Bauteile erneut zu identifizieren. Nachfolgend werden drei Beispiele gegeben, bei welcher Art von Anforderungsänderung welche Bauteile direkt betroffen sein können.

Durch neue Umweltauflagen auf Grund der Unternehmensentwicklung oder auch politischen Restriktionen kann bspw. die Anforderung aufkommen, dass keine Druckluft mehr verwendet werden darf, da diese Energieform auf Grund des schlechten Wirkungsgrads bei der Energiewandlung sehr ineffizient ist (DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2012). Dazu wäre alle Bauteile, die Druckluft benötigen, durch Bauteile zu ersetzen, die ohne Druckluft betrieben werden können. Diese direkt betroffenen Bauteile können der Matrix „fluide Abhängigkeiten“ im Betriebsmittelstrukturmodell entnommen werden (siehe Abbildung 18).

Als weiteres Beispiel bietet sich die Einführung eines neuen Produkts in ein Betriebsmittel an. Auf Grund geänderter Abmaße ändern sich die Anforderungen an die zu fertigende und zu handhabende Länge, Breite und Höhe, so dass das Betriebsmittel zu rekonfigurieren ist. Daher sind die Bauteile zu adaptieren, die die fertig- und handhabbaren Abmaße beschränken. Dabei kann es sich bspw. um die Bauteile handeln, die in direktem Kontakt mit dem Produkt stehen.

Darüber hinaus kann eine steigende Nachfrage dazu führen, dass eine größere Stückzahl an Produkten zu produzieren ist. Dies kann zur Folge haben, dass manuell bediente durch automatisierte Bauteile zu ersetzen sind und sich somit der Automatisierungsgrad erhöht. Alternativ könnte das komplette Betriebsmittel auch dupliziert werden.

Zusammenfassend lässt sich erkennen, dass geänderte Anforderungen unterschiedlichste Bauteile tangieren können. Daher bleibt festzuhalten, dass bei der Identifikation direkt zu adaptierender Bauteile Kenntnisse bzgl. des betrachteten Betriebsmittels essenziell sind. Dabei ist zu überprüfen, ob die direkten Adaptationen durchführbar sind. Sollte dies nicht der Fall sein, so wäre die umfassendste Rekonfiguration durchzuführen. Das wäre der Austausch des kompletten Betriebsmittels. Da hiervon die komplette Produktionsstruktur betroffen sein kann, ist dies mit der Produktionsstrukturplanung abzustimmen (siehe REINHART & POHL 2011, ZAEH ET AL. 2010A, BEHNCKE ET AL. 2011).

6.5.2 Ermittlung alternativer Rekonfigurationen

Die in Abschnitt 6.5.1 beschriebenen Bauteiladaptation rufen Adaptionen an weiteren Bauteilen hervor, also indirekte Adaptionen. Daher stellt dieser Abschnitt den Algorithmus zur Identifikation der indirekten Adaptionen sowie zur Generierung alternativer Rekonfigurationen vor (siehe Abbildung 31). Der Algorithmus wird ausgeführt, wenn ein Rekonfigurationsbedarf erkannt wurde. Als

Ergebnis liefert er Alternativen für Rekonfigurationen, die in Form von Rekonfigurationsgraphen dargestellt werden (siehe Abschnitt 5.3). Darüber hinaus bildet er in Adaptionlisten, die zu den jeweiligen Alternativen gehören, die an einzelnen Bauteilen durchzuführenden Adaptionen mit deren Aufwänden ab und gibt die angepassten Betriebsmittelstrukturmodelle aus (siehe Abbildung 30).

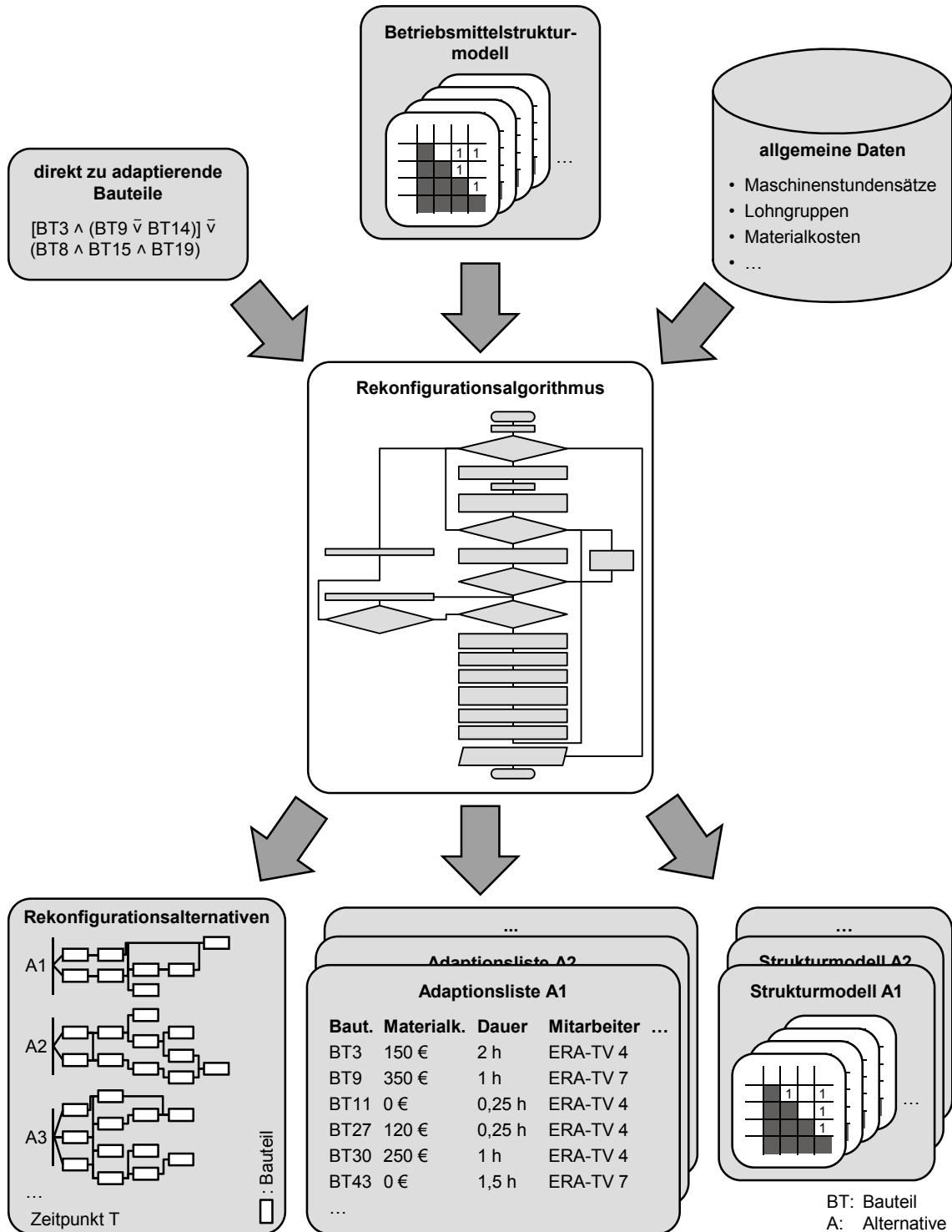


Abbildung 30: Ablauf zur Generierung alternativer Rekonfigurationen

Als Input-Daten werden die direkt zu adaptierenden Bauteile, deren Abhängigkeiten mit Junktoren beschrieben werden (siehe Abschnitt 6.5.1), sowie das Betriebsmittelstrukturmodell (siehe Abschnitt 5.2) benötigt, um die indirekten Adaptionen zu ermitteln. Außerdem werden allgemeine Daten (z. B. Maschinenstundensätze, Lohngruppen, Materialkosten) herangezogen, um die Adaptionen zu beschreiben. Diese Daten lassen sich bspw. aus ERP-Systemen gewinnen. Basierend auf den ermittelten Daten und Modellen erfolgt im nächsten Schritt 4 die Bewertung der Alternativen (siehe Abschnitt 6.6). Während des Ablaufs des Algorithmus sind Eingaben des Anwenders sowie dessen Expertenwissen vonnöten, um einzelne Schritte durchzuführen.

Abbildung 31 bildet den Rekonfigurationsalgorithmus ab. Die bei jeder Durchführung zu betrachtenden Bauteile werden in eine Bauteilliste geschrieben. Diese beinhaltet alle Bauteile, die hinsichtlich Adaptionsbedarfen zu prüfen sind. In diese werden die direkt zu adaptierenden Bauteile aufgenommen sowie Bauteile, die Abhängigkeiten mit zu adaptierenden Bauteilen aufweisen. Die Bauteilliste wird sukzessiv abgearbeitet. y stellt die Zählvariable für die jeweils gewählte Kombination an direkt anzupassenden Bauteilen dar. Damit ist es möglich, der jeweiligen Alternative den Rekonfigurationsgraphen, die Adaptionsliste sowie das angepasste Betriebsmittelstrukturmodell eindeutig zuzuordnen. Nachfolgend wird der Algorithmus mit den einzelnen Elementen beschrieben.

Zu Beginn des Rekonfigurationsalgorithmus ist zu eruieren, ob eine noch ungeprüfte, zulässige Kombination an direkt zu adaptierenden Bauteilen existiert. Ist dies der Fall, ist das Strukturmodell in den Ausgangszustand zurückzusetzen und die Zählvariable y um Eins zu erhöhen. Die direkt zu adaptierenden Bauteile dieser noch nicht geprüften Kombination werden in die Bauteilliste geschrieben. Aus dieser Liste wird immer das oberste Bauteil genommen und betrachtet, bis sie leer ist. Da in der Liste nicht ausschließlich Bauteile enthalten sind, die zu adaptieren sind, ist dies bei der Betrachtung einzelner Bauteile zu prüfen. Ist es nicht zu adaptieren, wird es aus der Bauteilliste gelöscht. Sofern es zu adaptieren ist, ist zu prüfen, ob die Adaption durchführbar ist. In Tabelle 6 sind die Kriterien zum Prüfen angegeben, ob eine Adaption durchführbar oder integrierbar ist, wobei auf die Integrierbarkeit später in diesem Abschnitt eingegangen wird.

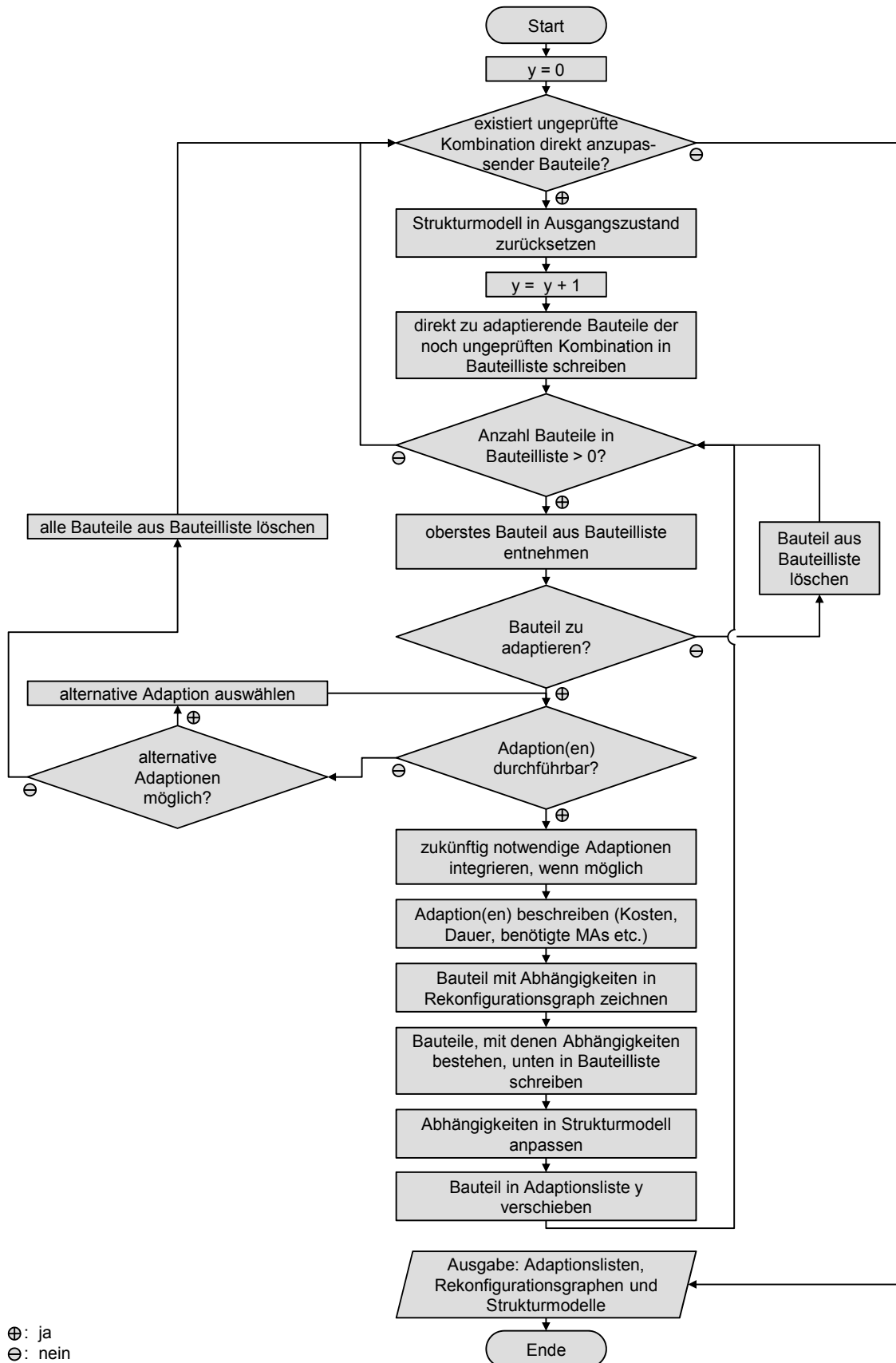


Abbildung 31: Rekonfigurationsalgorithmus

	Kriterien zur Durchführbarkeit einer Adaption	Kriterien zur Integrierbarkeit einer Adaption
1. technische Machbarkeit	x	x
2. Adaptionkosten	x	x
3. Sicherheitsaspekte	x	x
4. Prozesssicherheit	x	x
5. Kreisschlüsse	x	x
6. Wirtschaftlichkeit		x
7. Unsicherheiten		x

Tabelle 6: Kriterien zum Prüfen der Durchführbarkeit bzw. Integrierbarkeit von Adaptionen

Erstens ist für die Durchführbarkeit einer Adaption die technische Machbarkeit zu prüfen. So kann es bspw. vorkommen, dass unzureichend Bauraum zur Verfügung steht, um ein Bauteil auszutauschen bzw. ein neues hinzuzufügen.

Zweitens können die Adaptionkosten über die Durchführbarkeit entscheiden. Die Rekonfiguration sollte bspw. in dem Extremfall nicht durchgeführt werden, wenn die Kosten für die Adaption eines Bauteils über den Kosten für ein neues Betriebsmittel liegen.

Drittens darf durch die Adaption auch nicht die Sicherheit gefährdet werden. So ist bspw. eine Gefährdung der Mitarbeiter, z. B. durch bewegte Anlagenteile oder entstehende Prozessgase, in jedem Fall auszuschließen.

Das vierte Kriterium betrifft die zu beachtende Prozesssicherheit. Wird bei einer Werkzeugmaschine bspw. zur Reduktion des Energieverbrauchs eine Standardspindel aus Metall durch eine CFK-Spindel ersetzt, die eine geringere Masse aufweist, kann sich bspw. das Schwingungsverhalten oder auch das thermische Verhalten verändern. Beides hat einen hohen Einfluss auf die Prozesssicherheit, die insbesondere bei Werkzeugmaschinen auf Grund von Fertigungstoleranzen sehr wichtig und somit genauestens zu untersuchen ist (z. B. mit Hilfe von Simulationsmodellen).

Ein fünftes Kriterium, das über die Durchführbarkeit entscheidet, sind Kreisschlüsse innerhalb der Rekonfigurationsgraphen. Das bedeutet, dass eine Bauteiladaption über mehrere Abhängigkeiten auf sich selber wirkt, letztendlich also Adaptionen an sich selber hervorruft (siehe Abschnitt 5.3). Somit sollte die Anzahl an Kreisschlüssen möglichst gering sein. Diese werden im Rekonfigurationsgraphen als widerkehrend auftretende gleiche Folgen von identischen Bauteilen dargestellt (siehe Abbildung 20).

Kreisschlüsse sind kritisch, da sich unendlich fortsetzen können und die Rekonfiguration somit nicht durchführbar ist. Aus diesem Grund sind sie zu identifizieren. Durch Betrachtung der Versionsnummer (siehe Abbildung 21) kann erkannt werden, ob das Bauteil bereits adaptiert war und sich die daraus ergebende Bauteilfolge identisch ist bzw. die gleiche Sequenz aufweist. Eine andere Möglichkeit stellen die Algorithmen der Breiten- oder der Tiefensuche dar (siehe DOM ET AL. 2008, KREBS 2012).

Nach deren Identifikation ist zu prüfen, ob die Kreisschlüsse auflösbar sind. Hierfür existieren unterschiedliche Möglichkeiten. Erstens können dominante Bauteile festgelegt werden. Damit wird innerhalb des Kreises eine Hierarchie gebildet, wobei untergeordnete Bauteile keine Adaptionen an übergeordneten Bauteilen hervorrufen können. Zweitens kann ein ganzheitlicher Lösungsansatz gewählt werden. Dabei werden vom Anwender alle Bauteile des Kreises ganzheitlich betrachtet und die Adaptionen unter Berücksichtigung der Beziehungen konstruktiv so beeinflusst, dass der Kreis aufgelöst wird (FIEGE 2009). Hierfür lassen sich unterschiedliche Konstruktionsvorgehen heranziehen (siehe bspw. VDI 2221, GROTHE ET AL. 2008). Drittens lässt sich eine strukturelle Pareto-Analyse durchführen (LINDEMANN ET AL. 2009). Ist ein sich unendlich fortsetzender Kreisschluss nicht auflösbar, ist die Adaption nicht zu verwirklichen.

Es können zu diesem Zeitpunkt bereits zukünftig notwendige Adaptionen bekannt sein. Wird daher festgestellt, dass eine Adaption durchführbar ist, ist abzugleichen, ob an dem Bauteil zu späteren Zeitpunkten weitere Adaptionen notwendig sind. Sind zu einem späteren Zeitpunkt weitere Adaptionen vonnöten, ist zu eruieren, ob diese integriert werden können. Hierbei sind wiederum die fünf bereits beschriebenen genannten Kriterien zu prüfen. Darüber hinaus sind noch die Wirtschaftlichkeit und Unsicherheiten zu beurteilen (siehe Tabelle 6).

Einerseits können auf Grund von Skaleneffekten durch die Integration Einsparungen erzielt werden (z. B. reduzierte Stillstandzeiten, keine wiederholte Bearbeitung des Bauteils in einer Maschine). Andererseits entstehen Kosten zu einem früheren Zeitpunkt, so dass erhöhte Zinskosten auftreten (siehe Abschnitt 3.4.1). Diese können jedoch wiederum durch zukünftige Kostensteigerungen aufgehoben werden. Daher ist als sechstens Kriterium zur Entscheidungsfindung die Wirtschaftlichkeit durch Vergleichen dieser Einsparungen mit den zusätzlich entstehenden Kosten zu bewerten (z. B. mit Hilfe der Kapitalwertmethode, siehe Abschnitt 3.4.1).

Als siebtes Kriterium sind bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Unsicherheiten einzubeziehen, da auf Grund von Prognoseunschärfen künftige Adaptionen möglicherweise nicht mit absoluter Sicherheit eintreten. Somit würden bei der Integration zusätzliche Kosten entstehen, die später eventuell nicht notwendig sein werden. Zur Berücksichtigung solcher Unsicherheiten bietet sich eine Risikoanalyse an (siehe Abschnitt 3.6.1).

Im nächsten Schritt des Rekonfigurationsalgorithmus ist die Adaption bzw. sind die Adaptionen an dem Bauteil zu beschreiben. Hierfür ist neben den Materialkosten bspw. aufzunehmen, wie lange die Adaption dauert und welche Mitarbeiter mit welchen Qualifikationen für wie lange benötigt werden. Um die Zahlenwerte zu ermitteln, können bspw. Erfahrungswissen aus vergangenen Rekonfigurationen oder Datenbanken (z. B. ERP-Systeme) einbezogen werden. Zur Darstellung der geforderten Mitarbeiterqualifikationen lassen sich die Qualifikationsbeschreibungen aus Rahmentarifverträgen heranziehen (z. B. Tarifvertrag über das Entgelt-Rahmenabkommen, ERA-TV, für die bayerische Metall- und Elektroindustrie siehe IG METALL BEZIRK BAYERN 2008). Ferner sind die erforderlichen Maschinen mit der Einsatzdauer aufzunehmen. Über die Entwicklungskosten und die Adaptionsart (siehe Seite 7) hinaus ist noch eine Tätigkeitsbeschreibung zur Durchführung der Adaption anzugeben. Die Beschreibung wird zur späteren operativen Durchführung der Rekonfigurationen benötigt. Zur Erstellung der Adaptionsliste (siehe Tabelle 7) finden die allgemeinen Daten (siehe Abbildung 30) Verwendung.

Adaptionsliste A1								
Baut.	Materialk.	Dauer	MA-Qualifika.	Anz. MA	Maschinen (Dauer)	Entwicklungsk.	Adaptionsart	Beschr.
BT3	150 €	2 h	ERA-TV 4	1	BAZ 1 (0,5 h)	50 €	Anpassen	...
BT9	350 €	1 h	ERA-TV 7	1	-	0 €	Austauschen	...
BT11	0 €	0,25 h	ERA-TV 4	1	-	0 €	Entfernen	...
...

A: Alternative
BAZ: Bearbeitungszentrum

Tabelle 7: Beispielhafte Adaptionsliste

Das Bauteil wird anschließend mit seinen Abhängigkeiten in den Rekonfigurationsgraphen eingezeichnet (siehe Abbildung 19), wobei auf die exakte Darstellung der Knoten zu achten ist (siehe Abbildung 21). Alle Bauteile, mit denen das zu adaptierende Bauteil Abhängigkeiten aufweist, werden danach an unterster Stelle in die Bauteilliste geschrieben. Die Ermittlung dieser erfolgt anhand des Betriebsmittelstrukturmodells (siehe Abbildung 26). Da durch eine Abhängigkeit nicht zwangsläufig eine Adaption hervorgerufen wird, ist zu Beginn des Algorithmus stets zu eruieren, ob das Bauteil zu adaptieren ist. In dem Betriebsmittelstrukturmodell sind auch Änderungen von Anhängigkeiten und Bauteilen einzupflegen, die sich auf Grund der Adaptionen ergeben. So entstehen bspw. durch die Integration von neuen Bauteilen neue Abhängigkeiten mit Bauteilen oder es entfallen Abhängigkeiten, wenn Bauteile entfernt werden. Danach wird das Bauteil mit den Beschreibungen in die Adaptionsliste verschoben. Falls noch Bauteile in der Bauteilliste enthalten sind, wird diese weiter abgearbeitet, indem das oberste Bauteil entnommen und betrachtet wird.

Sofern die Adaption nicht durchführbar ist, ist zu ermitteln, ob Alternativen bestehen. Es kann sein, dass die Adaption durch die Anpassung eines anderen Bauteils obsolet wird (siehe Abschnitt 6.5.1). Dieses Bauteil ist alternativ zu dem ursprünglichen in die Bauteilliste aufzunehmen und abzuarbeiten. Existiert keine Alternative, so sind alle Bauteile aus der Bauteilliste zu löschen. Diese Kombination an direkt zu adaptierenden Bauteilen ist mit dem bis zu diesem Zeitpunkt erstellten Rekonfigurationsgraphen und der Adaptionsliste zu verwerfen.

Wenn in der Bauteilliste keine Bauteile mehr enthalten sind, entweder auf Grund einer nicht möglichen Adaption oder weil alle Bauteile abgearbeitet wurden, wird erneut geprüft, ob noch ungeprüfte Kombinationen an direkt anzupassenden Bauteilen existieren, die noch nicht geprüft wurden. Gibt es noch eine solche Kombination, ist das Betriebsmittelstrukturmodell in seine Ausgangsform zurückzusetzen und der Algorithmus mit der neuen Kombination erneut zu durchlaufen.

Wurden alle Kombinationen an direkt anzupassenden Bauteilen betrachtet, werden abschließend für jede mögliche Rekonfiguration die Adaptionlisten mit den zugehörigen alternativen Rekonfigurationsgraphen und geänderten Betriebsmittelstrukturmodellen ausgegeben. Diese bilden die Grundlage für die anschließende Bewertung der Alternativen. Wird keine Rekonfigurationsmöglichkeit gefunden, kann die geänderte Anforderung lediglich durch die Anschaffung eines neuen Betriebsmittels erfüllt werden. Somit entfällt der vierte Schritt der Methodik.

6.6 Schritt 4: Auswahl der besten Alternativen

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Bewertung der Alternativen vorgestellt, um die beste Alternative auswählen zu können. Dazu sind die in Abbildung 32 gezeigten Schritte zu vollziehen. Im ersten Schritt sind die in den Abschnitten 5.5.1 und 5.5.2 vorgestellten Bewertungen durchzuführen.

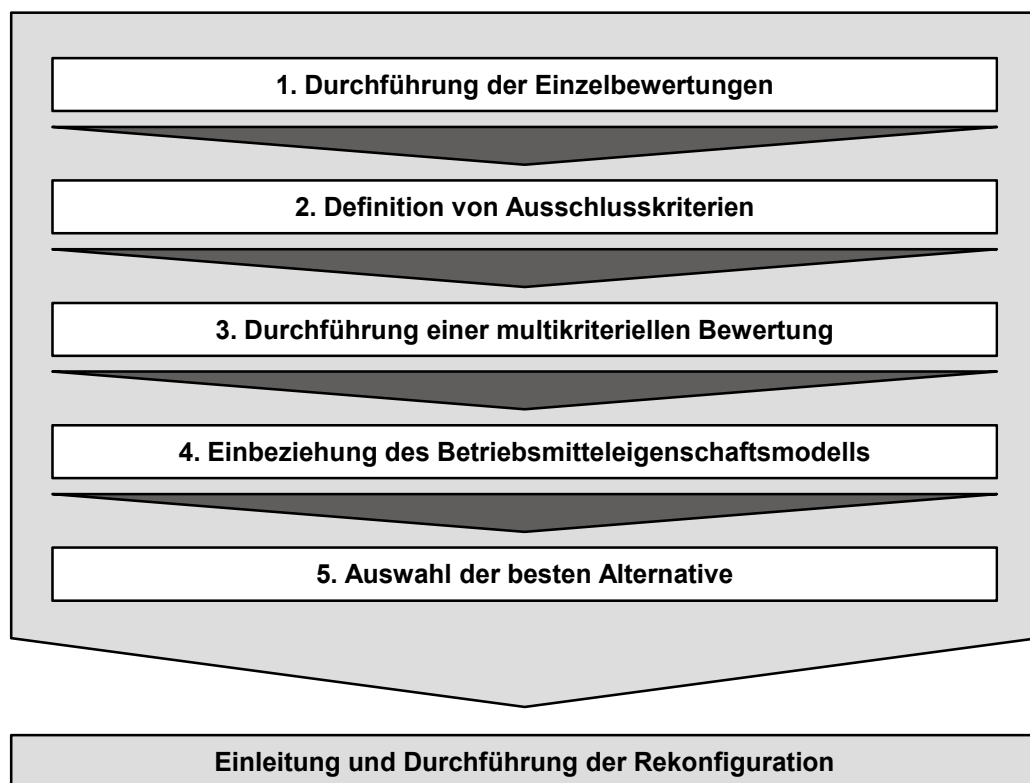


Abbildung 32: Vorgehen zur Auswahl der besten Alternative

Die sieben strukturellen und betriebswirtschaftlichen Kennzahlen werden im ersten Schritt zunächst in einem Ordnungssystem⁴⁹ dargestellt (siehe Abbildung 33). Die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird mit einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt (siehe Abschnitte 3.6.1 und 5.5.2). Die Erhebung der strukturellen Kennzahlen erfolgt basierend auf den Rekonfigurationsgraphen (siehe Abbildung 19) sowie dem Betriebsmittelstrukturmodell (siehe Abbildung 18). Die zur betriebswirtschaftlichen Bewertung benötigten Informationen werden primär während der Generierung der alternativen Rekonfigurationen (siehe Abschnitt 6.5) aufgenommen. Sie werden den Adaptionlisten (siehe Abbildung 30) entnommen.

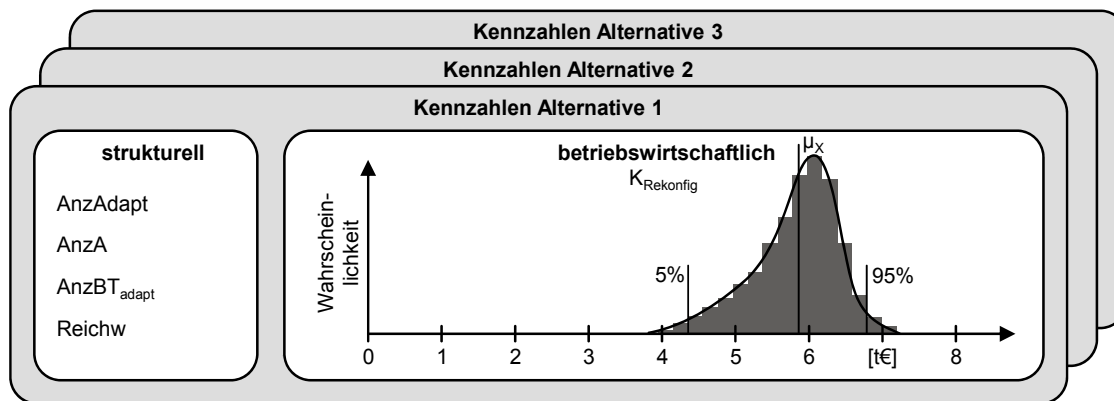


Abbildung 33: Beispielfhafte strukturelle und betriebswirtschaftliche Kennzahlen

Zusammenfassend sind die Kennzahlen zur Auswahl der besten Alternative

- die Anzahl der Adaptionen (AnzAdapt),
- die Anzahl der Abhängigkeiten (AnzA),
- die Anzahl der zu adaptierenden Bauteile (AnzBT_{adapt}),
- die Reichweite (Reichw) und die gesamten Rekonfigurationskosten (K_{Rekonfig}), die sich zusammensetzen aus
- dem Erwartungswert (μ_x),
- der Chance bzw. dem 5 %-Perzentil (5 %) sowie
- dem Risiko bzw. dem 95 %-Perzentil (95 %)⁵⁰.

⁴⁹ Kennzahlensysteme können Art der Verknüpfung der Elemente in Rechen- bzw. Ordnungssysteme eingeteilt werden (MENSCH 2008). Bei Rechensystemen handelt es sich um mathematische Kennzahlensysteme, die den Sachverhalt auf eine Spitzenkennzahl verdichten (z. B. Du-Pont-System, siehe PERRIDON ET AL. 2009). Ordnungssysteme hingegen sind sachlogisch strukturierte Kennzahlensysteme, deren Elemente nicht alle durch Rechenoperationen dargestellt bzw. zusammengefasst werden (z. B. Balanced Scorecard, siehe WÖHE & DÖRING 2010).

⁵⁰ Alternativ zu den Perzentilen lässt auch die Standardabweichung (σ_x) heranziehen. Hierbei wird allerdings nicht zwischen Chancen und Risiken differenziert.

Im zweiten Schritt sind daraufhin Ausschlusskriterien zu definieren, ab deren Über- bzw. Unterschreiten eine Alternative nicht mehr in Frage kommt. Dadurch werden unrealistische bzw. unattraktive Alternativen ausgeschlossen und kein Aufwand in deren weitere Betrachtung investiert. Als Ausschlusskriterien können

- absolute Werte,
- prozentuale, statische Werte sowie
- prozentuale, dynamische Werte der sieben Kennzahlen herangezogen werden.

Es können maximal zulässige Rekonfigurationskosten, z. B. anhand des 95 %-Perzentils, absolut definiert und Alternativen ausgeschlossen werden, die diese Grenze über- bzw. unterschreiten. Darüber hinaus können auch die erwarteten Rekonfigurationskosten (μ_x) ein Ausschlusskriterium darstellen. So müssen die Alternativen gegenüber einem Neukauf verglichen werden, sodass sicher gestellt ist, dass eine Rekonfiguration nicht teurer als ein neues Betriebsmittel ist.

Alternativ zu fixen können auch prozentuale Grenzwerte definiert werden (z. B. eine Rekonfiguration darf immer maximal 50 % einer Neuanschaffung kosten). Da der Betriebsmittellebenszyklus einen wichtigen strategischen Einflussfaktor darstellt (siehe Abschnitt 3.1), können diese Grenzwerte auch dynamisch an das Alter des Betriebsmittels gekoppelt werden, sodass eine Rekonfiguration immer weniger kosten darf, je älter das Betriebsmittel ist (z. B. eine Rekonfiguration darf für ein fünfjähriges Betriebsmittel maximal 50 % einer Neuanschaffung, für ein sechsjähriges maximal 40 % etc. kosten). Das ist damit begründet, dass das Betriebsmittel mit zunehmendem Alter immer weniger dem Stand der Technik entspricht oder aus wirtschaftlichen Gründen ausgetauscht werden sollte, da es sich am Ende seiner Nutzungsphase befindet (z. B. Betriebskosten und Ausfallrate steigen) (SIHN & SPECHT 1996). Damit wird auch sichergestellt, dass nicht ausschließlich inkrementelle Innovationen durchgeführt und somit radikale Innovationen verpasst werden (HÖFT 1992, HAUSCHILDT 2004, AHSEN ET AL. 2010).

Eine eindeutige Entscheidung basierend auf den einzelnen Kennzahlen ist nicht in jedem Fall möglich, da nicht immer alle einzelnen Kennzahlen einer Alternative über den korrespondierenden Kennzahlen einer anderen Alternative liegen. Somit kann nicht direkt eine Rangordnung der Alternativen erstellt werden. Daher ist in einem solchen Fall im dritten Schritt eine multikriterielle Bewertung zur Verdichtung der einzelnen Kennzahlen durchzuführen (siehe Abschnitt 3.4.2), um eine Rangordnung zu bilden und somit die beste Alternative zu identifizieren.

Hierbei wird in der Regel eine anwenderspezifische Gewichtung der Kennzahlen vorgenommen, wodurch die Präferenz des Entscheiders mit einfließt. Üblicherweise werden die Kosten am stärksten gewichtet, da diese in Investitionsentscheidungsprozessen die maßgebliche Kenngröße darstellen (siehe Tabelle 2). Darüber hinaus kann der Risikofreude bzw. -aversion des Anwenders durch eine entsprechende Gewichtung des 5 %-Perzentils bzw. 95 %-Perzentils Rechnung getragen werden. Risikoaverse Anwender gewichten das Risiko (95 %-Perzentil) höher als die Chance (5 %-Perzentil).

Als Verfahren für die multikriterielle Bewertung bietet sich der AHP an, da lediglich sieben Kriterien zu beachten sind, er ein strukturiertes Vorgehen bietet und er die Präferenzen des Entscheidungsträgers relativ exakt berücksichtigt. Auf Grund des höheren Rechenaufwands des AHPs im Vergleich zur Nutzwertanalyse hoch ist, kann auch eine Nutzwertanalyse durchgeführt werden.⁵¹ Hierbei ist jedoch unsicher, ob die Präferenz des Entscheiders immer richtig wiedergegeben wird (siehe Abschnitt 3.4.2).

Durch die multikriterielle Bewertung wird eine Rangordnung gebildet. Jedoch können sich die Alternativen auch hinsichtlich ihres Leistungspotenzials und somit Betriebsmitteleigenschaftsmodells unterscheiden. Daher sollte die Auswahl der besten Alternative nicht ausschließlich auf der multikriteriellen Bewertung basieren. Zumal durch das Leistungspotenzial zukünftige Rekonfigurationsbedarfe determiniert werden, ist im vierten Schritt das Betriebsmitteleigenschaftsmodell der jeweiligen Rekonfigurationsalternative zu betrachten und grob abzuschätzen, welche potenziellen Rekonfigurationen sich hierdurch ergeben könnten oder vermieden werden könnten. Somit können höhere Kosten für ein größeres Leistungspotenzials des Betriebsmittels gerechtfertigt werden, wenn hierdurch zukünftig notwendige Rekonfigurationen entfallen. Wenn an dieser Stelle eine genauere Einschätzung gefordert wird, ist wiederum eine Risikoanalyse durchzuführen (siehe Abschnitt 3.6.1). Dabei wären zukünftig mögliche Rekonfigurationsbedarfe mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit abzuschätzen und den Mehrkosten zur Entscheidungsfindung gegenüberzustellen.

Nach Auswahl der passenden Alternative im fünften Schritt ist die operative Betriebsmittelplanung (siehe Fußnote 4, S. 3) rechtzeitig von der Rekonfiguration in Kenntnis zu setzen. Diese Abteilung (z. B. Instandhaltung) ist dann für die Steue-

⁵¹ Der Aufwand zur Durchführung einer Nutzwertanalyse oder des AHP unterscheiden sich relativ zueinander stark, im jeweiligen Verhältnis zur Durchführung der Gesamtmethodik jedoch nicht.

rung der Maßnahmendurchführung, also die operative bzw. physische Umsetzung der Rekonfiguration (NEBL 2006) verantwortlich. Sie kann auf die entsprechende Adaptionliste zurückgreifen (siehe Abbildung 30) und muss über den geforderten Rekonfigurationszeitpunkt (siehe Abschnitt 6.4) informiert werden.

Da die operative Durchführung der Rekonfiguration kein Bestandteil dieser Arbeit ist, wird an dieser Stelle hierauf nur grob eingegangen. Zu Beginn der Rekonfiguration ist sicherzustellen, dass alle notwendigen Bauteile und Ressourcen (Mitarbeiter, Fremdfirmen, Maschinen etc.) vorhanden bzw. verfügbar sind, um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten (RASCH 2000). Damit reduzieren sich die Stillstandzeit des Betriebsmittels und somit auch Produktionsausfälle. In der Praxis wurde oftmals beobachtet, dass Betriebsmittelrekonfigurationen eingeleitet wurden, ohne genaue Kenntnis der durchzuführenden Tätigkeiten. Aus diesem Grund verlängerte sich die Stillstandzeit, weil benötigte Bauteile oder Ressourcen nicht zur Verfügung standen und zunächst beschafft werden mussten (siehe industrielles Anwendungsbeispiel in Abschnitt 8.1).

Die Reduktion der Stillstandzeit wird durch die Transparenz ermöglicht, die sich durch die Anwendung der Methodik ergibt, da über die Adaptionliste bekannt ist welche Bauteile wie zu adaptieren sind und welche Kapazitäten (z. B. Mitarbeiter, Maschinen) sowie Materialien benötigt werden. Somit können neu benötigte Bauteile beschafft bzw. gefertigt und die Kapazitäten vorgehalten werden. Hierbei wird eine übliche Produktionsplanung mit Produktionsprogrammplanung, Produktionsbedarfsplanung, Eigenfertigungsplanung und -steuerung sowie Fremdbezugsplanung und -steuerung durchlaufen (HACKSTEIN 1989, LUCZAK & EVERSHEIM 1999, SCHUH & GIERTH 2006). Nach der erfolgreichen Durchführung der Rekonfiguration sind sowohl das Betriebsmitteleigenschafts- als auch das Betriebsmittelstrukturmodell des Betriebsmittels entsprechend der neuen Betriebsmitteleigenschaften sowie der -struktur anzupassen und die Kennzahlen zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit erneut zu berechnen. Darüber hinaus sind weitere unternehmensinterne Datenbasen (z. B. ERP-Systeme, Stammdaten der PPS, siehe SCHUH & ROESGEN 2006) zu aktualisieren.

Gibt die Bewertung die Empfehlung ein neues Betriebsmittel anzuschaffen oder existiert keine Möglichkeit zur Rekonfiguration, kann der Einkauf die Beschaffung eines neuen Betriebsmittels auslösen. Wie bereits beschrieben, sollte hier die Produktionsstrukturplanung hinzugezogen werden (siehe Abschnitt 6.5.1). Für die üblicherweise durchgeführte Ausschreibung kann der Einkauf direkt auf die bereits formulierten Anforderungen (siehe Abschnitt 6.3) zurückgreifen.

6.7 Anwendungsbereiche der Methodik

Originäres Ziel der Methodik ist die Identifikation von notwendigen Rekonfigurationsbedarfen mit deren Eintrittszeitpunkten, die Ermittlung von Möglichkeiten zur Rekonfiguration von Betriebsmitteln sowie die Auswahl der besten Alternative. Somit können produzierende Unternehmen, die einem hohen Veränderungsdruck unterworfen sind, die Methodik heranziehen, um Rekonfigurationen zu planen und dadurch den Lebenszyklus von Betriebsmitteln zu verlängern sowie Kosten zu sparen. Darüber hinaus bietet sich die Methodik für weitere Anwendungen an, wie bspw.

- zur Unterstützung bei der Betriebsmittelauswahl im Rahmen eines Investitionsentscheidungsprozesses,
- bei der konstruktiven Veränderung von Betriebsmitteln zur Anpassung der Rekonfigurationsfähigkeit sowie
- zur Erhöhung der Genauigkeit von Lebenszykluskostenrechnungen.

Erstens kann die Methodik im Rahmen eines Investitionsentscheidungsprozesses bei der Betriebsmittelauswahl unterstützen. So können unterschiedliche Alternativen hinsichtlich ihrer Rekonfigurationsfähigkeit (siehe Abschnitt 6.2.3) bewertet und die passende Alternative unter Berücksichtigung weiterer Kennzahlen (z. B. Investitionskosten, Lebenszykluskosten) ausgewählt werden. Die Auswahl lässt sich sowohl bei der Fremdbeschaffung des Betriebsmittels bei einem Lieferanten durchführen als auch bei Konstruktion und Fertigung des Betriebsmittels im eigenen Unternehmen. Hierfür sind im Lastenheft Kennzahlen zu fixieren, um die Umsetzung der Anforderungen an die benötigte Rekonfigurationsfähigkeit sicherzustellen.

Ist die Rekonfigurationsfähigkeit nicht passend, ist es zweitens möglich konstruktive Veränderungen am Betriebsmittel zur Anpassung der Rekonfigurationsfähigkeit vorzunehmen. Die Methodik ermöglicht die Identifikation kostenverursachende Bauteile, um im Rahmen der Planung auf konstruktive Verbesserungen zu schließen. Zur Ermittlung solcher kostenverursachender bzw. kritischer Bauteile ist das Betriebsmittel in seine Struktur aufzubrechen (ABELE ET AL. 2009). Dementsprechend ist die entwickelte Methodik insbesondere geeignet, da die Betriebsmittelstruktur durch das Betriebsmittelstrukturmodell detailliert dargestellt wird. Um diese kritischen bzw. rekonfigurationshemmenden Bauteile zu identifizieren, sind sie einzeln zu bewerten. Strukturelle und betriebswirtschaftliche Kennzahlen hierfür sind im Anhang angegeben (siehe Abschnitte A7, A8

und A9). Diese Bauteile und somit das Betriebsmittel können nach deren Identifikation zur Anpassung der Rekonfigurationsfähigkeit entweder bei der Konzeption des Betriebsmittels (NEBL 2006) oder der Durchführung von Rekonfigurationen umkonstruiert werden. Schweißverbindungen zwischen Bauteilen können bspw. durch Schraubverbindungen ersetzt, die einen einfacheren Austausch von Bauteilen zulassen (siehe Abschnitt 5.2), oder die Modularität erhöht werden.

Darüber hinaus eignet sich eine Sensitivitätsanalyse (siehe Abschnitt 3.6.2) zur Ermittlung von Kostentreibern, die ein hohes Risiko darstellen. Diese Risiken können dann wiederum durch konstruktive Änderungen des Betriebsmittels reduziert werden. Der Einsatz einer Sensitivitätsanalyse ist möglich, da bei der Berechnung von K_{Rekonfig} Unsicherheiten in Form einer Risikoanalyse einbezogen sind. Risiken können bspw. einzelne Bauteile oder auch Kostenelemente (z. B. Materialkosten, Mitarbeiterkosten) sein. In Abhängigkeit ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit sind diese Kostentreiber bzw. deren Auswirkungen zu reduzieren. Verursachen Rekonfigurationen, z. B. auf Grund von Materialkosten, ein hohes Risiko, da die zukünftige Preisentwicklung von speziellen Materialien sehr volatil ist, sollte durch konstruktive Maßnahmen sichergestellt, dass sich auch andere Materialien verwenden lassen.

Durch die Maßnahmen zur Erhöhung der Rekonfigurationsfähigkeit steigen üblicherweise die Investitionskosten (HEGER 2007). Diese lassen sich jedoch über Einsparungen rechtfertigen, die im Lebenszyklus des Betriebsmittels durch reduzierte Rekonfigurationskosten oder die Verlängerung des Lebenszyklus realisiert werden.

Drittens lassen sich mit dem strukturierten Vorgehen der Methodik Rekonfigurationskosten exakter erfassen als mit bestehenden Verfahren der Lebenszykluskostenrechnung. Daher verbessert die Methodik bestehende Verfahren, die aktuell Rekonfigurationskosten lediglich abschätzen (siehe Abschnitt 2.2).

7 Umsetzung der Methodik

Zur praktischen Umsetzung der Methodik werden unterschiedliche Software-Werkzeuge herangezogen. Um den Anwender der Methodik beim Generieren der Rekonfigurationsgraphen und Adaptionenlisten (siehe Abbildung 30) sowie der Kennzahlenberechnung bei der Auswahl der besten Alternative (siehe Abschnitt 6.6) zu unterstützen, wurde ein Werkzeug prototypisch entwickelt. Es ist Microsoft Excel[®]- sowie Visio[®]-basiert und in Schritt 3 und Schritt 4 der Methodik (siehe Abbildung 25) eingebunden. Es bildet den Rekonfigurationsalgorithmus (siehe Abbildung 31) ab, wobei noch Eingaben des Anwenders notwendig sind (z. B. für einzelne Adaptionen benötigte Kapazitäten). Abbildung 34 zeigt die Einbindung des Software-Werkzeugs in die Methodik. Es reduziert den Aufwand zur Durchführung der Methodik erheblich. Auf die praktische Anwendung wird auch bei Anwendungsbeispielen eingegangen (siehe Abschnitt 8.2).

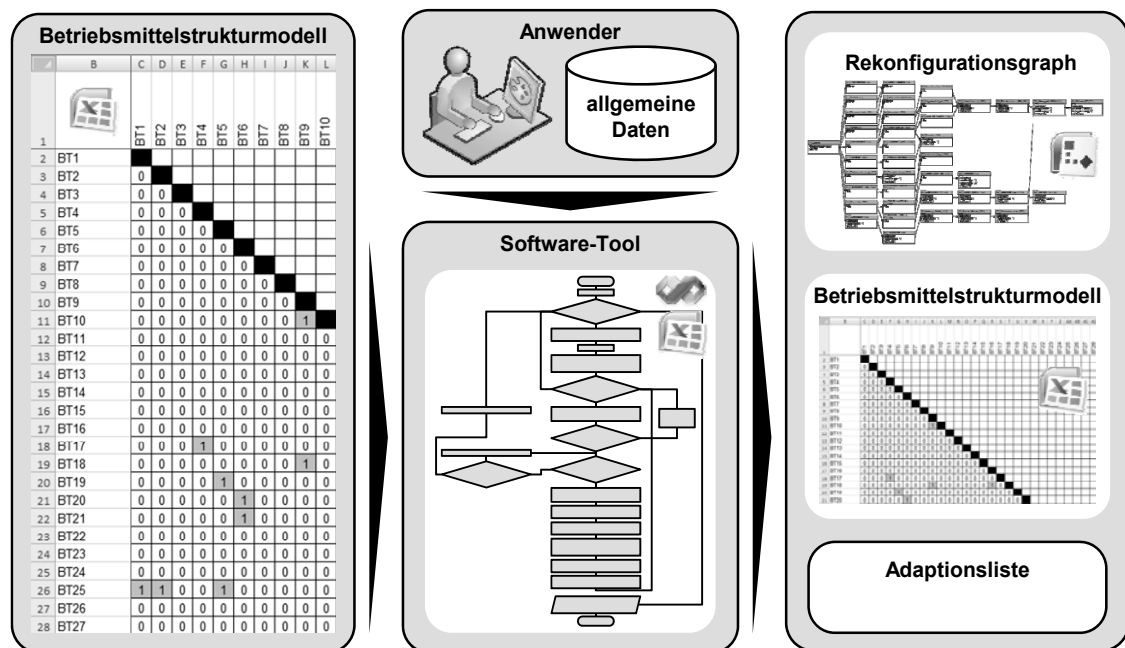


Abbildung 34: Einbindung des Software-Werkzeugs in die Methodik (Icons: Microsoft[®] Corporation)

Als Entwicklungsumgebung für das Software-Werkzeug wurde Visual Studio^{®52} der Microsoft Corporation gewählt, da es einen großen Funktionsumfang bietet. Das Werkzeug wurde als Microsoft Office[®] Plug-In für Excel[®] konzipiert. Somit lässt es sich aufwandsarm in bestehende Unternehmensstrukturen integrieren, sofern Excel[®] vorhanden ist.

Bei Gebrauch des Werkzeugs sind die einzelnen Matrizen des Betriebsmittelstrukturmodells als Arbeitsblätter in einer Excel[®]-Datei anzulegen und die Rekonfiguration bzw. der Auslöser textuell zu beschreiben. Im Anschluss daran erfolgt die Auswahl der initial betroffenen Bauteile sowie die Beschreibung der einzelnen Adaptionen an dem jeweiligen Bauteil (z. B. Dauer, Materialkosten, benötigte Mitarbeiter, Tätigkeitsbeschreibung). Nach der Charakterisierung der initialen Adaptionen, wird durch das Programm, basierend auf dem Betriebsmittelstrukturmodell, abgefragt, welche der mit diesen Bauteilen verbundenen Bauteile indirekten Adaptionen unterliegen. Diese sind dann wiederum zu beschreiben.

Während des Programmablaufs können stets sowohl der aktuelle Stand des Rekonfigurationsgraphen als auch der Adaptionsliste angezeigt werden. Darüber hinaus überprüfen zahlreiche Funktionen, ob die initialen Daten (z. B. Betriebsmittelstrukturmodell) sowie die während der Anwendung durchgeführten Eingaben korrekt sind. So erfolgt bspw. die Kontrolle, ob alle Matrizen symmetrisch sind, die Ordinate und die Abszisse die gleiche Anzahl an Bauteilen aufweisen oder die eingetragenen Werte in den Matrizen im zulässigen Wertebereich liegen.

Indirekte Adaptionen werden so lange ermittelt und beschrieben, bis alle Bauteile abgearbeitet sind. Abschließend werden der Rekonfigurationsgraph im Visualisierungsprogramm Visio[®] der Microsoft[®] Corporation sowie die Adaptionsliste und das sich auf Grund der Adaptionen ergebende Betriebsmittelstrukturmodell als Excel[®]-Arbeitsblätter ausgegeben.

Mit dem Software-Werkzeug erfolgt die Kalkulation der Kennzahlen Anzahl der Adaptionen ($AnzAdapt$), Anzahl der Abhängigkeiten ($AnzA$), Anzahl der zu adaptierenden Bauteile ($AnzBT_{adapt}$), Reichweite ($Reichw$) sowie Rekonfigura-

⁵² Visual Studio[®] bietet unterschiedliche Programmiersprachen, wobei für die Bearbeitung von Microsoft Office[®] Dokumenten Visual Basic und C# sehr gut geeignet sind, da diese hierfür verwendbare Befehlsbibliotheken anbieten. Es wurde Visual Basic verwendet, da hiermit Makros von zu automatisierenden Bearbeitungsvorgängen in Microsoft Office[®]-Dokumenten aufgezeichnet werden können. Der mit diesen Makros erstellte Code ist dem Visual-Basic-Code sehr ähnlich und kann somit einfach übernommen werden (WALKENBACH 2007, EVJEN ET AL. 2008).

tionskosten (K_{Rekonfig}). Die weiteren Kennzahlen zur Auswahl einer Rekonfigurationsalternative (siehe Abschnitt 6.6) sind unsicherheitsbehaftet. Daher wird zur Berechnung des Erwartungswerts (μ_x) und der Standardabweichung (σ_x) bzw. der Chance (5 %-Perzentil) sowie des Risikos (95 %-Perzentil) die Software Crystal Ball[®] der Oracle[®] Corporation herangezogen und eine Risikoanalyse durchgeführt. Unsicherheiten werden hierbei in Form von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen einbezogen und mit ihren Korrelationen untereinander abgebildet. Crystal Ball[®] ermöglicht die Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation basierend auf den eingegebenen Informationen (siehe Abschnitt 3.6.1). Mit dem entwickelten Werkzeug werden durch die Ermittlung von K_{Rekonfig} sowie der Erstellung der Adaptionenlisten der erste Schritt der Risikoanalyse ausgeführt (siehe Abschnitt 3.6.1). Da Crystal Ball[®] ein Excel[®] Plug-in ist, können die von dem im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Software-Werkzeug erstellten Dateien direkt verwendet und die weiteren Schritte der Risikoanalyse in diesen Dateien durchgeführt werden.

Die Charakterisierung der Rekonfigurationsfähigkeit (siehe Abschnitt 6.2.3) wird basierend auf dem Betriebsmittelstrukturmodell durchgeführt. Das entwickelte Werkzeug berechnet dazu die Anzahl der Bauteile (AnzBT), die Abhängigkeiten pro Bauteil (Anz(A/BT)) sowie die Modularität (Mod) nach Definition der Module durch den Anwender. Zur Kalkulation der Anzahl der Kreise (AnzKR) sind weitere Werkzeuge, wie bspw. MATLAB[®] von The MathWorks Corporation[®] heranzuziehen oder es ist auf kommerziell erwerbliche Software-Werkzeuge zur Analyse von Matrizen zurückzugreifen, wie bspw. LOOME[®] der TESEON[®] GmbH (TESEON 2012).

8 Anwendungsbeispiele

Die Anwendung der Methodik wird anhand von zwei Beispielen beschrieben. Das Erste stellt ein reales Anwendungsbeispiel bei einem Industrieunternehmen dar. Da bei dieser Anwendung aus Gründen der Geheimhaltung keine Daten angegeben werden können, erfolgt anschließend die ausführlichere Erläuterung anhand eines zweiten Beispiels. Dabei handelt es sich um eine reale Anlage, die in den Versuchshallen des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) steht.

8.1 Industrielles Anwendungsbeispiel

Das betrachtete Unternehmen ist im Bereich der Halbleitertechnik tätig. Bei dem Betriebsmittel handelt es sich um eine verfahrenstechnische Anlage zur Beschichtung von Produkten. Dieses Betriebsmittel wurde bereits mehrmals an neue Anforderungen angepasst (z. B. Erhöhung der Ausbringungsmenge durch Steigerung des Automatisierungsgrads sowie Veränderung der Materialbereitstellung, Vergrößerung des Produkts). Hierbei wurde nicht auf die in dieser Arbeit beschriebene Methodik zurückgegriffen. Da es bei einer Rekonfiguration zu Komplikationen kam, wurde untersucht, ob diese Komplikationen mit der Methodik hätten verhindert werden können. Auf Grund der Geheimhaltung werden in diesem Abschnitt nur stark abstrahierte und gekürzte Erkenntnisse dargestellt.

Bei Anpassung des Betriebsmittels an ein größeres Produkt, wurde vor der real im Unternehmen durchgeführten Rekonfiguration zunächst angenommen, dass sie nur wenige Wochen dauert. Im Voraus wurden allerdings notwendigen Adaptionen nicht erkannt, sodass während der Rekonfiguration einige benötigte Teile nicht vorhanden und Kapazitäten nicht bereitgestellt worden waren. Dadurch verlängerte sich die Durchführung um ein Mehrfaches der anfänglich geplanten Zeit. Dies führte zu stark gesteigerten Stillstandkosten. Daher wurde nachträglich untersucht, ob mit der Methodik alle notwendigen Adaptionen hätten erkannt und die Rekonfiguration somit ohne Verzögerungen durchgeführt werden können.

Die vier Schritte der Methodik (siehe Abbildung 25) wurden dazu ausgeführt. Dabei wurden zunächst die Eigenschaften sowie die Struktur des aus 41 Bauteilen bestehenden Betriebsmittels modelliert. Auf Grund der Betriebsmittelgröße erfolgte hier die Definition von Funktionsgruppen als Bauteile (siehe hierarchisches Betriebsmittelmodell, S. 5), da der Aufwand bei einer Modellierung auf

Komponenten-Ebene durch die Komplexität zu groß gewesen wäre. Daraufhin erfolgten die Darstellung der Anforderungen (geänderte Produktabmaße sowie Prozessparameter) und die Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen. Die Generierung von Rekonfigurationsbedarfen führte letztendlich zu einer zielführenden Alternative. Diese wurde mit dem Software-Werkzeug als Graph dargestellt, wobei alle 20 zu adaptierenden Bauteile ermittelt werden konnten. Die notwendigen Adaptionen wurden entsprechend beschrieben.

Der Vergleich des Ergebnisses der Methodik mit der real durchgeführten Rekonfiguration zeigte nur geringe Abweichungen. Wäre das Ergebnis vor der Rekonfiguration bekannt gewesen hätten alle benötigten Teile beschafft und Kapazitäten bereitgestellt werden können. Dadurch hätten die geplante Stillstandzeit eingehalten und somit die Stillstand- bzw. die Rekonfigurationskosten um 67 % reduziert werden können.

Um den Ablauf der Methodik detailliert und nachvollziehbar zu darzustellen, erfolgt in Abschnitt 8.1 die Erläuterung einer exemplarischen Anwendung

8.2 Exemplarische Anwendung

8.2.1 Ausgangssituation und Beschreibung des Betriebsmittels

Das in diesem Abschnitt betrachtete Betriebsmittel ist eine Montagezelle (siehe Abbildung 35) zur Produktion von Tischsets (siehe Abbildung 36). Hierbei handelt es sich um einen Bestandteil der Schulungsanlage iCIM 3000 der Festo Didactic GmbH & Co.KG[®]. Die Anlage dient u. a. der Vermittlung von SPS-Technik sowie dem Erlernen von Zellensteuerung, industrieller Kommunikation und Pneumatik-Technik. Sie besteht prinzipiell aus einem Schwenkarmroboter mit einem Greifer, einer Arbeitsstation, Materialbereitstellungseinrichtungen, einem Zwischenlager, einem Gestell, unterschiedlichen Materialspeichern, einer Steuerung sowie einem Kamerasystem zur Produktüberwachung.

Die Materialbereitstellung erfolgt über manuell zu befüllende Materialspeicher sowie automatisiert über ein Förderband. Die gesamte Montagezelle besteht aus 14 Modulen sowie 87 Bauteilen, die über mechanische, fluide (ausschließlich pneumatisch), elektrische und informationstechnische Abhängigkeiten in Verbindung stehen. Als Modellierungsebene für Bauteile wurde hier die Komponenten-Ebene (siehe hierarchisches Betriebsmittelmodell, S. 5) gewählt. In der Mon-

tagezelle wird ein Produkt montiert (siehe Abbildung 36). Das Tischset besteht aus einer Grundplatte sowie einem Stifthalter, einem Thermometer, einem Hygrometer und einem Kugelschreiber, die in die Grundplatte eingelegt werden.

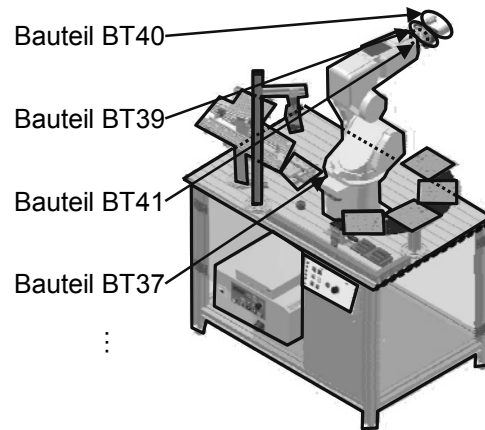


Abbildung 35: Montagezelle des Tischsets mit beispielhaft eingezeichneten Bauteilen (Bild: Festo Didactic GmbH & Co.KG®)

Nach Anlieferung der Grundplatte sowie des Stifthalters auf einer Palette über das Förderband greift der Schwenkarmroboter die Palette und legt sie auf dem Zwischenlager ab. Daraufhin stellt er die Grundplatte auf das Arbeitssystem, wo sie mit zwei Pneumatikzylindern fixiert wird. Im Anschluss daran erfolgt das Einsetzen des Stifthalters in die Grundplatte. Danach werden das Thermometer sowie das Hygrometer den Materialspeichern entnommen und in die Grundplatte eingelegt. Abschließend wird der Kugelschreiber aus dem entsprechenden Speicher gegriffen und in den Stifthalter gesteckt sowie das fertige Tischset über das Förderband abtransportiert. Unterschiedliche Sensoren sowie ein Kamerasystem überwachen den gesamten Produktionsprozess.



altes Produkt: Tischset



neues Produkt: Labyrinth

Abbildung 36: Altes und neues Produkt der Montagezelle (Bild links: Festo Didactic GmbH & Co.KG®)

8.2.2 Bedarfsermittlung und Planung der Rekonfiguration

Datenbasis

Zum Aufbau der Datenbasis wurde zunächst das Betriebsmitteleigenschaftsmodell in Microsoft Excel[®] erstellt. Es umfasst 22 Kriterien (siehe Abbildung 37). Bei den Produktabmaßen wurde weiter zwischen bearbeitbaren, handhabbaren sowie speicherbaren Abmaßen differenziert. Dabei wurden die drei Materialspeicher anhand der zu speichernden Hygrometer, Thermometer sowie Kugelschreiber beschrieben. Da die Anlage vollautomatisiert betrieben wird, beinhaltet das Modell keine mitarbeiterbezogenen Kategorien.

Eigenschaftsmodell																
	Produktbezogen						Produktbezogen									
	Bearbeiten			Handhaben			Speichern			Speichern						
	Produktabmaße (Länge) [mm]	Produktabmaße (Breite) [mm]	Produktabmaße (Höhe) [mm]	Produktabmaße (Länge) [mm]	Produktabmaße (Breite) [mm]	Produktabmaße (Höhe) [mm]	Produktabmaße (Länge) [mm]	Produktabmaße (Breite) [mm]	Produktabmaße (Höhe) [mm]	Produktabmaße (Länge) [mm]	Produktabmaße (Breite) [mm]	Produktabmaße (Höhe) [mm]	Produktmasse [kg]			
Betriebsmitteleigenschaften/ -fähigkeiten							1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Max.	190	75	200	500	75	200	40	40	137	40	40	8	12	12	8	3
Min.	90	45	4	10		8	40	40	137	40	40	8	12	12	8	0
Kategorie/Beschreibung																

Abbildung 37: Ausschnitt des Betriebsmitteleigenschaftsmodells der Montagezelle

Daraufhin wurde das Betriebsmittelstrukturmodell in Microsoft Excel[®] erstellt (siehe Abbildung 38). Es umfasst 4 Matrizen, wobei jede eine Abhängigkeitskategorie enthält. In dem Betriebsmittel existieren 111 mechanische, 47 informationstechnische, 46 elektrische und 10 fluide Abhängigkeiten. Die Abhängigkeiten sind einfach zu lösen und wiederherzustellen (z. B. Steck- und Schraubverbindungen). Daher wurden sie mit „1“ gewichtet. Die meisten der informationstechnischen Abhängigkeiten stellen auch die elektrische Versorgung sicher.

Adaptionslisten

Alternative 6

Alternative 5

Alternative 4

Alternative 3

Alternative 2

Alternative 1

Bauteilnummer	Version	Bauteilname	Materialkosten [€]	Adaptionsdauer [h]	Mitarbeiterstundensatz [€/h]
88	0	Anschlag längs neu	8,40	0,5	23,61
89	0	Greifvorrichtung neu (Greifer)	4,20	0,25	23,61
90	0	Coverhalter	126,00	1	23,61
3	0	Hydrometherhalter (Magazine)	0,00	0,25	23,61
4	0	Stifthalter (Magazine)	0,00	0,25	23,61
6	0	Kamera (Vision System)	0,00	0,25	23,61
91	0	Nagelträger	168,00	0	0,00
92	0	Kugelvorschieber	21,00	1	23,61
16	1	optoelektronischer Sensor (Arbeitsstation)	0,00	0,25	23,61
39	1	Parallelgreifer (Greifer)	0,00	0	0,00
93	0	optoelektrischer Sensor	10,50	0,25	23,61
5	0	Gerüst (Vision System)	0,00	0,25	23,61
70	1	Software (PC)	0,00	1	32,16
94	0	Palette für Nagelträger	210,00	0,5	23,61
95	0	Normzylinder	157,50	1	23,61
96	0	Kugelhalter (Greifer)	5,25	0,5	23,61
97	0	Ständer Kugelvorschieber	26,25	1	23,61
41	1	Halterung (Greifer)	0,00	0	0,00
72	1	Lösterklemmenblock rechts (vorn)	0,00	0	0,00
98	0	Positionierstifte Nagelträger	21,00	2	23,61
99	0	Halteeinheit Palette Nagelträger	52,50	1,5	23,61
100	0	Magnetventil Kugeln	52,50	1	23,61
38	1	Spindel (Roboter)	0,00	0	0,00
45	1	Roboter Anschaltbox rechts (RIA BOX)	0,00	0	0,00

Abbildung 38: Ausschnitt des Betriebsmittelstrukturmodells der Montagezelle

Darauf aufbauend erfolgte die Berechnung der vier Kennzahlen zur Beschreibung der Rekonfigurationsfähigkeit (siehe Tabelle 8). Jedes Bauteil steht durchschnittlich in Abhängigkeit mit zwei Bauteilen. Die Kennzahl AnzKR umfasst Kreise mit drei bis sechs Elementen. Größere Kreise wurden vernachlässigt, da hier eine Selbstbeeinflussung der Elemente unwahrscheinlich ist (siehe Abschnitt A6). Die Modularität ist niedrig, da der Wert unter 1 liegt (siehe Abschnitt A6).

Rekonfigurationsfähigkeit	
Anzahl Bauteile, AnzBT [Stk.]	87
Abhängigkeiten pro Bauteil, Anz(A/BT) [Stk.]	1,91
Anzahl Kreise, AnzKR [Stk.]	1.046
Modularität, Mod [-]	0,67

Tabelle 8: Kennzahlen zur Beschreibung der Rekonfigurationsfähigkeit der Montagezelle

Schritt 1: Darstellung der Anforderungen

Es wurden neue Anforderungen an das Betriebsmittel gestellt, da das alte Produkt einzustellen und ein neues zu produzieren ist. Dabei handelt es sich um ein Labyrinth, das aus einer Grundplatte, einer Kugel und einem Cover besteht, das mit vier Nägeln fixiert wird (siehe Abbildung 36). Die Nägel sowie die Grundplatte sollen über das Förderband angeliefert werden. Sowohl das Cover als auch die Kugel sind dagegen in einem Magazin in der Montagezelle bereitzustellen.

Durch das neue Produkt ändern sich die zu bearbeitenden, handzuhabenden und zu speichernden Produktabmaße sowie das Montageverfahren (siehe Abbildung 36). Zum Fügen durch Einlegen kommt Fügen durch Verstiften hinzu (vgl. DIN 8580).

Anforderungsmodell																
	Bearbeiten						Handhaben			Produktbezogen			Speichern			
	Produktabmaße (Länge) [mm]	Produktabmaße (Breite) [mm]	Produktabmaße (Höhe) [mm]	Produktabmaße (Länge) [mm]	Produktabmaße (Breite) [mm]	Produktabmaße (Höhe) [mm]	Produktabmaße (Länge) [mm]	Produktabmaße (Breite) [mm]	Produktabmaße (Höhe) [mm]	Produktabmaße (Länge) [mm]	Produktabmaße (Breite) [mm]	Produktabmaße (Höhe) [mm]		Produktmasse [kg]		
Anforderungen (Labyrinth)							1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Max.	80	60	19	80	60	15	3	80	3	80	3	60	3	4	0,15	
Min.	80	60	19	3	3	3	3	80	3	80	3	60	3	4	0	
Kategorie, Beschreibung																

Abbildung 39: Ausschnitt des Betriebsmittelanforderungsmodellmodells an die Montagezelle durch das neue Produkt

Schritt 2: Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen

Durch den Vergleich der Eigenschaften (siehe Abbildung 37) mit den neuen Anforderungen (siehe Abbildung 39) wurden Rekonfigurationsbedarfe erkannt. So können nicht mehr alle Bestandteile des Labyrinths in dem Betriebsmittel gespeichert, das Labyrinth nicht in die Arbeitsstation eingespannt, die Nägel nicht über das Förderband angeliefert und Teile des Labyrinths (Kugeln) nicht gegriffen werden.

Schritt 3: Generierung von Rekonfigurationsalternativen

Nach der Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen erfolgte die Identifikation direkt anzupassender Bauteile. Bei diesen Bauteilen handelt es sich um diejenigen, die die einschränkenden Eigenschaften bestimmen (siehe Abbildung 40). Die Bauteilfixierung in der Arbeitsstation ist zu adaptieren (BT12 oder BT14), da das Labyrinth andere Abmaße aufweist. Außerdem sind die Greiferbacken anzupassen oder auszutauschen (BT40), da andere Geometrien zu greifen sind. Ferner ist der Thermometerhalter durch ein anderes Magazin zu ersetzen (BT2), da neue Teile des Produkts zu speichern sind (Labyrinthcover). Darüber hinaus werden der Hygrometerhalter (BT3), der Stifthalter (BT4) sowie die Kamera (BT6) nicht mehr benötigt. Dafür sind neue Bauteile in das Betriebsmittel zu integrieren (Nagelträger zur Anlieferung der Nägel und Kugelhalter zum Speichern der Kugeln).

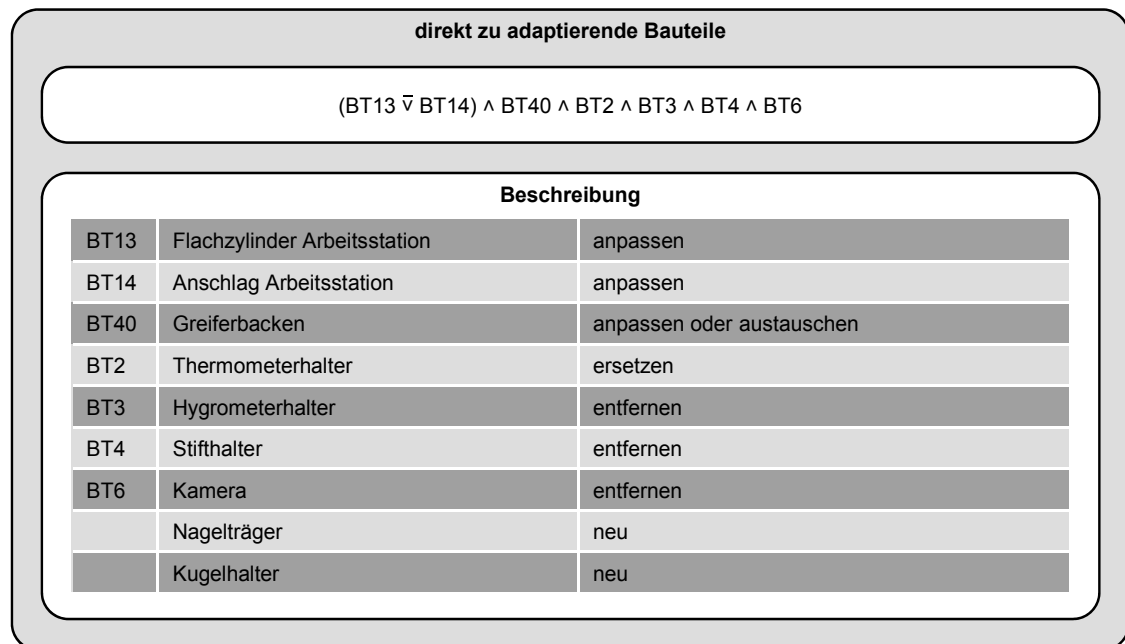


Abbildung 40: Direkt durch Produktneueinführung in Montagezelle zu adaptierende Bauteile

Anhand der Kombinatorik in Abbildung 40 ist ersichtlich, dass eine alternative Rekonfiguration besteht. So kann entweder der Flachzylinder oder der Anschlag der Arbeitsstation verschoben werden, um das neue Produkt zur Bearbeitung einzuspannen. Darüber hinaus kann die Adaption der Greiferbacken unterschiedlich erfolgen. Die Möglichkeiten wurden in einem Brainstorming mit Experten ermittelt. Da nun auch Kugeln (Durchmesser: 3 mm) zu greifen sind, sind entweder neue Greiferbacken oder ein Wechselgreifer zu konstruieren. Alternativ wäre es möglich einen magnetischen Kugelhalter zu verwenden.

Rekonfigurationsalternativen	
Beschreibung	
Alternative 1	Anschlag verschieben, neue Greiferbacken
Alternative 2	Anschlag verschieben, Wechselgreifer
Alternative 3	Anschlag verschieben, magnetischer Kugelhalter
Alternative 4	Flachzylinder verschieben, neue Greiferbacken
Alternative 5	Flachzylinder verschieben, Wechselgreifer
Alternative 6	Flachzylinder verschieben, magnetischer Kugelhalter

Abbildung 41: Unterschiedliche Rekonfigurationsalternativen

Die Kombination der im vorangehenden Absatz beschriebenen Möglichkeiten resultiert in den sechs in Abbildung 41 dargestellten alternativen Rekonfigurationen. Darüber hinaus sind bei jeder Alternative Bauteile zu entfernen (Hygrometerhalter, Stifthalter, Kamera), zu ersetzen (Thermometerhalter durch Coverhalter) und neu hinzuzufügen (Nagelträger und Kugelhalter).

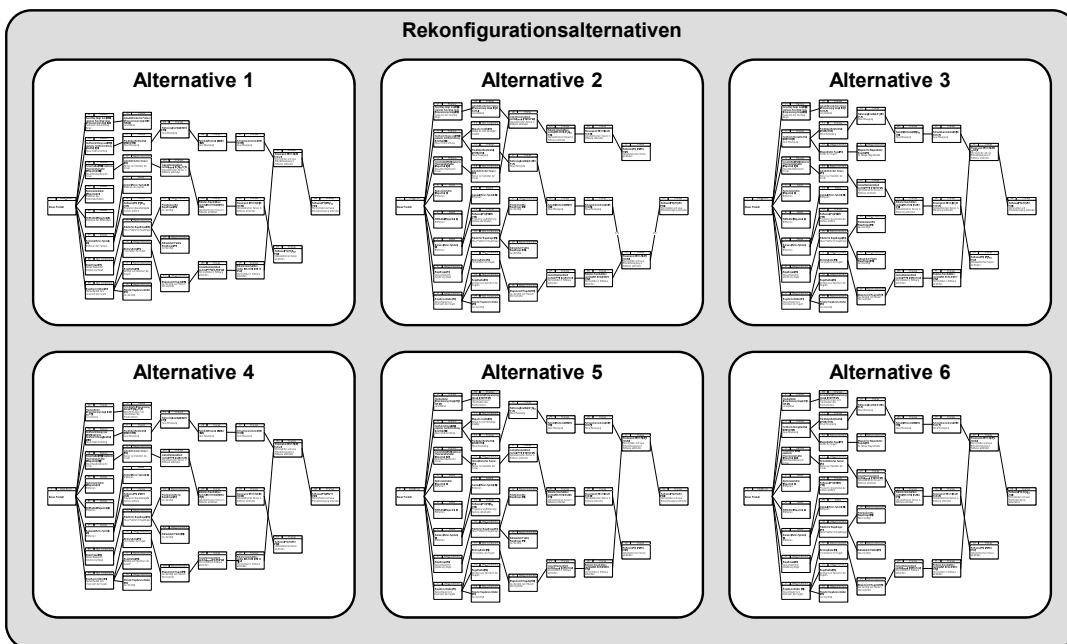


Abbildung 42: Rekonfigurationsgraphen der unterschiedlichen Alternativen

Nach Identifikation der direkt zu adaptierenden Bauteile, wurden die Auswirkungen dieser Adaptionen ermittelt. Hierfür erfolgte die Ermittlung indirekter Adaptionen mit Hilfe des in Kapitel 7 vorgestellten Software-Werkzeugs. Die dabei generierten Rekonfigurationsgraphen sind in Abbildung 42 dargestellt. Da die Alternativen zu anderen Adaptionen führen, resultieren die Rekonfigurationen in unterschiedlichen Betriebsmittelstrukturmodellen. Diese wurden ebenfalls mit dem Software-Werkzeug erstellt und für spätere Schritte gespeichert.

Während der Generierung der Rekonfigurationsalternativen wurden die Aufwände (z. B. Materialkosten, Adaptionen) für die einzelnen Adaptionen abgeschätzt. Diese sind in Adaptionslisten zusammengefasst (siehe Abbildung 43). Die Adaptionsliste von Alternative 1 ist exemplarisch in Anhang A10 gezeigt.

Adaptionslisten

Alternative 6

Alternative 5

Alternative 4

Alternative 3

Alternative 2

Alternative 1

Bauzellnummer	Version	Bauzellname	Materialkosten [€]	Adaptionsdauer [h]	Mitarbeiterstundensatz [€/h]
88	0	Anschlag längs neu	8,40	0,5	23,61
89	0	Greifvorrichtung neu (Greifer)	4,20	0,25	23,61
90	0	Coverhalter	126,00	1	23,61
3	0	Hydrometerhalter (Magazine)	0,00	0,25	23,61
4	0	Stifthalter (Magazine)	0,00	0,25	23,61
6	0	Kamera (Vision System)	0,00	0,25	23,61
91	0	Nagelträger	168,00	0	0,00
92	0	Kugelvorschleber	21,00	1	23,61
16	1	optoelektronischer Sensor (Arbeitsstation)	0,00	0,25	23,61
39	1	Parallelgreifer (Greifer)	0,00	0	0,00
93	0	optoelektrischer Sensor	10,50	0,25	23,61
5	0	Gerüst (Vision System)	0,00	0,25	23,61
70	1	Software (PC)	0,00	1	32,16
94	0	Palette für Nagelträger	210,00	0,5	23,61
95	0	Normzylinder	157,50	1	23,61
96	0	Kugelhalter (Greifer)	5,25	0,5	23,61
97	0	Ständer Kugelvorschleber	26,25	1	23,61
41	1	Halterung (Greifer)	0,00	0	0,00
72	1	Lüsterklemmenblock rechts (vorn)	0,00	0	0,00
98	0	Positionierstifte Nagelträger	21,00	2	23,61
99	0	Halteeinheit Palette Nagelträger	52,50	1,5	23,61
100	0	Magnetventil Kugeln	52,50	1	23,61
38	1	Spindel (Roboter)	0,00	0,00	0,00
45	1	Roboter Anschaltbox rechts (RIA BOX)	0,00	0,00	0,00

Abbildung 43: Adaptionslisten der Rekonfigurationsalternativen

Schritt 4: Auswahl der besten Alternative

Zur Auswahl der besten Alternative wurden die in Abbildung 32 skizzierten Schritte durchgeführt. Im ersten Schritt wurden im Rahmen der Einzelbewertungen die strukturellen und die betriebswirtschaftlichen Kennzahlen berechnet (siehe Abbildung 33), wobei von einem Einschichtbetrieb ausgegangen wurde. Die Erfassung der strukturellen Kennzahlen erfolgte basierend auf den Rekonfigurationsgraphen (siehe Abbildung 42). Die betriebswirtschaftlichen Kennzahlen wurden zunächst ohne Berücksichtigung von Unsicherheiten berechnet. Hierfür wurden aufbauend auf den Adaptionslisten die Rekonfigurationskosten der einzelnen Alternativen ermittelt. Dabei wurde angenommen, dass zwei Mitarbeiter die physischen Adaptionen am Betriebsmittel durchführen werden und es daran anschließend von einem Fachinformatiker wieder in Betrieb genommen wird. Daraufhin wurden die unsicheren Größen (z. B. Bearbeitungsdauern, Materialkosten) mit Hilfe der Software Crystal Ball[®] modelliert. Das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation mit 20.000 Ziehungen ist in Abbildung 44 gezeigt.

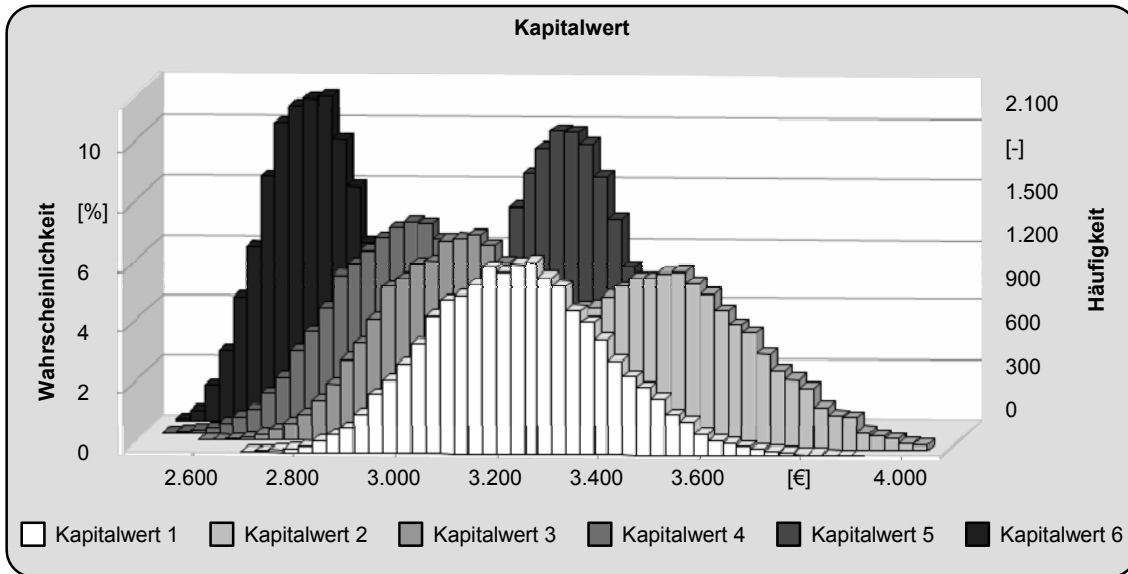


Abbildung 44: Kapitalwerte der einzelnen Alternativen

Die Kennzahlen sind in Tabelle 9 zusammengefasst, wobei die Berechnung der betriebswirtschaftlichen Kennzahlen für Alternative 1 beispielhaft in Anhang A10 beschrieben ist. Zur Darstellung der Unsicherheit wurde auf die Standardabweichung zurückgegriffen. Im zweiten Schritt wurde das maximal verfügbare Budget auf 5.000 € festgelegt. Da dies durch keine Alternative überschritten wurde, erfolgte kein Ausschluss von Alternativen. Im dritten Schritt hätte zur Auswahl einer Alternative eine multikriterielle Bewertung durchgeführt werden können. Die strukturellen Kennzahlen weisen jedoch keine großen Unterschiede auf und die Rekonfigurationskosten stellen die maßgebliche Entscheidungsgröße dar. Daher ist die Auswahl einer Alternative eindeutig belegbar (Alternative 6 weist die niedrigsten Kosten sowie die kleinste Streuung auf) und musste nicht durch ein multikriterielles Bewertungsverfahren abgesichert werden. Der Vergleich der Betriebsmittelstrukturmodelle der Alternativen im vierten Schritt erfolgte nicht, da sie lediglich marginale Unterschiede aufweisen. Im fünften Schritt fiel aus den dargestellten Gründen die Wahl auf Alternative 6.

	strukturell				betriebswirtschaftlich		
	AnzAdapt [#]	AnzA [#]	AnzBT _{adapt} [#]	Reichw [-]	K _{Rekonfig} [€]	μ _x [€]	σ _x [€]
Alternative 1	31	24	22	0,22	3.236	3.266	173
Alternative 2	32	26	23	0,23	3.516	3.549	188
Alternative 3	33	26	24	0,24	3.110	3.137	162
Alternative 4	31	24	22	0,22	2.992	3.020	157
Alternative 5	32	25	23	0,23	3.305	3.326	110
Alternative 6	33	27	24	0,24	2.779	2.798	103

Tabelle 9: Kennzahlen zur Auswahl der besten Alternative

9 Kritische Beurteilung der entwickelten Methodik

9.1 Abschätzung des Erfüllungsgrads der Anforderungen

In die Beurteilung des Erfüllungsgrads der in Abschnitt 4 an die Methodik gestellten Anforderungen (siehe Tabelle 10) fließen die Erkenntnisse aus den in Kapitel 8 erläuterten Anwendungsbeispielen ein.

Legende		vorliegende Arbeit
●	: nahezu vollständig erfüllt	
◐	: größtenteils erfüllt	
◑	: teilweise erfüllt	
◒	: kaum erfüllt	
○	: nahezu gar nicht erfüllt	
Allgemeine Anforderungen		
Transparenz		◐
Übertragbarkeit		●
Erweiterbarkeit		●
Integrationsfähigkeit		◐
Spezielle Anforderungen		
Betriebsmittel auf Zellen-Ebene		●
ex-ante und lebenszyklusbegleitende Anwendung		●
operative und strategische Aspekte		◐
Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit von Betriebsmitteln		◐
Beschreibung von Betriebsmitteleigenschaften und -anforderungen		●
Aufzeigen der Auswirkungen von Bauteiladaptionen		●
betriebswirtschaftliche und strukturelle Bewertung von (alternativen) Rekonfigurationen		◐
Einbeziehung von Unsicherheiten		●

Tabelle 10: Beurteilung des Erfüllungsgrads bzgl. der gestellten Anforderungen

Durch den strukturierten und nachvollziehbaren Ablauf der Methodik ist im Bereich der allgemeinen Anforderungen die *Transparenz* der Ergebnisse gegeben. Bei den ersten Anwendungen im Unternehmen ist jedoch die Aussagekraft der Kennzahlen zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit eingeschränkt, da die Höhe der Ausprägungen noch nicht einordbar ist. Daher ist im Unternehmen zunächst eine entsprechende Erfahrung mit Vergleichswerten aufzubauen.

Die *Übertragbarkeit* ist sowohl bei der Methodik als auch bei den zu Grunde gelegten Modellen gegeben. Dies ist durch die berücksichtigte Allgemeingültigkeit bei der Erstellung gewährleistet. Somit kann sie in unterschiedlichen Unternehmen sowie für verschiedene Betriebsmittel und Anwendungsfälle herangezogen werden.

Das Vorgehen sowie die Modelle sind offen gestaltet worden, um zusätzliche Aspekte einbeziehen zu können. Daher können bspw. weitere Kennzahlen definiert oder zusätzliche Eigenschaftskriterien für Betriebsmittel hinzugefügt werden. Somit ist die *Erweiterbarkeit* sichergestellt.

Die *Integrationsfähigkeit* ist durch die Verwendung von Standardsoftware (z. B. Microsoft Excel[®]) und weit verbreiteten Methoden (z. B. Kapitalwertmethode) ermöglicht. Jedoch werden zur Reduktion des Aufwands bei der Methodikanwendung weitere Software-Werkzeuge benötigt (z. B. Crystal Ball[®] oder das in dieser Arbeit erstellte Software-Werkzeug).

Im Bereich der speziellen Anforderungen ist die Anwendbarkeit auf *Betriebsmittel auf Zellen-Ebene* durch die gewählte matrizenbasierte Modellierung gegeben. Die Granularität kann dabei durch die Definition der Bauteile individuell gewählt werden.

Darüber hinaus sind die *ex-ante* und die *lebenszyklusbegleitende Anwendung* gewährleistet. Durch das Betriebsmittelanforderungsmodell mit den Prognoseverfahren können Rekonfigurationsbedarfe frühzeitig erkannt werden. Nichtsdestotrotz ist auch die lebenszyklusbegleitende Anwendung zur Berücksichtigung der im Zeitverlauf abnehmenden Unschärfe sowie kurzfristigen Änderungen sichergestellt.

Die Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit sowie das Betriebsmitteleigenenschaftsmodell lassen sich bspw. als Auswahlkriterien im Rahmen eines Betriebsmittelbeschaffungsprozesses heranziehen. Außerdem wird durch das Aufzeigen von zu adaptierenden Bauteilen mit den jeweiligen Beschreibungen in den Adaptionlisten die operative Rekonfigurationsplanung und -durchführung vereinfacht. Dadurch reduziert sich die Stillstandzeit, da die benötigten Bauteile und Ressourcen sowie durchzuführenden Tätigkeiten vor Durchführung der Rekonfiguration bekannt sind. Da die Methodik durch die Rekonfigurationen ferner den langfristig verfügbaren Maschinenpark beeinflusst, behandelt sie sowohl *strategische* als auch *operative Planungsaspekte*. Durch diese Verknüpfung lassen sich Synergien nutzen und der Aufwand zum Anwenden der Methodik rechtfertigen.

Basierend auf der Betriebsmittelstruktur erfolgt die *Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit* unabhängig von spezifischen Rekonfigurationen anhand von vier Kennzahlen. Um im Unternehmen allerdings die Höhe der jeweiligen Ausprägung und somit die Rekonfigurationsfähigkeit korrekt zu deuten, sind mehrere Betriebsmittel im Laufe ihres Lebenszyklus mit den anfallenden Rekonfigurationsaufwänden zu betrachten und zu vergleichen.

Durch das Betriebsmittelanforderungs- und das Betriebsmitteleigenschaftsmodell werden sowohl die *Betriebsmitteleigenschaften* als auch die *Anforderungen an Betriebsmittel* abgebildet. Damit sind Rekonfigurationsbedarfe direkt erkennbar.

Mit der Methodik können auf Grund der graphenbasierten Modellierung von Rekonfigurationsalternativen und dem Rekonfigurationsalgorithmus *Auswirkungen von Bauteiladaptionen* unmittelbar *aufgezeigt* werden. Dies erfolgt basierend auf dem Betriebsmittelstrukturmodell.

Die Bewertung der alternativen Rekonfigurationen erfolgt multikriteriell anhand mehrerer Kennzahlen, die sowohl *betriebswirtschaftliche* als auch *strukturelle Aspekte* einbeziehen. Die Höhe der Ausprägungen der strukturellen Kennzahlen ist anhängig von der Größe der definierten Betriebsmittelbauteile. Darüber hinaus werden bei der Bewertung *Unsicherheiten* berücksichtigt.

Durch die Erfüllung dieser Anforderungen konnte das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, die Entwicklung einer Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen, mit den drei Teilzielen erreicht werden (siehe Abschnitt 1.2). Es wurden Vorgehensweisen erarbeitet, um Rekonfigurationsbedarfe frühzeitig zu erkennen (Teilziel 1), Verfahren zur Generierung und Darstellung von alternativen Rekonfigurationen definiert (Teilziel 2) sowie Bewertungsvorschriften festgelegt, um die beste Alternative auszuwählen (Teilziel 3).

9.2 Technisch-wirtschaftliche Bewertung der Methodik

Der Aufwand zum erstmaligen Anwenden der Methodik ist nicht unerheblich, insbesondere die benötigten Personalkapazitäten zur Anfertigung der Betriebsmittelstruktur- und Betriebsmitteleigenschaftsmodelle. Diese Einschätzung wurde auch von dem Industriepartner des in Abschnitt 8.1 dargestellten Beispiels geteilt. Um diese Aufwände gering zu halten, sollten die Modelle bereits in Lastenheften gefordert werden, da der Aufwand zur Erstellung während der Betriebsmittelkonstruktion am geringsten ist.

Die Aufwände zur Durchführung der Methodik wurden während der Erstellung der exemplarischen Anwendung (siehe Montagezelle in Abschnitt 8.1) anhand der Dauer in Personentagen aufgenommen und sind in Tabelle 11 gezeigt. Die Kosten für einen Personentag wurden auf Grund der benötigten Qualifikation auf 500 € geschätzt. Da Software-Werkzeuge (Excel[®], Crystal Ball[®], MATLAB[®]) nicht ausschließlich für die einmalige Anwendung der Methodik, sondern auch für weitere Applikationen zur Verfügung stehen, wurden hierfür anteilige Kosten von 500 € berücksichtigt. Die Methodik würde zusätzlich zu einem üblichen Rekonfigurationsprozess (z. B. Konstruktion von neuen Bauteilen und Planung der Anpassung) ausgeführt. Daher werden die Aufwände in die Bewertung nicht einbezogen, die im Rahmen einer üblichen Rekonfiguration anfallen. Die zusätzlichen Aufwände für die Methodik betragen hier somit 5.250 €.

Aufwand zur Anwendung der Methodik	
Erstellung des Eigenschaftsmodells	2 PT
Erstellung des Strukturmodells	5 PT
Erstellung des Anforderungsmodells	0,5 PT
Generierung der Alternativen	1 PT
Bewertung der Alternativen	1 PT
	9,5 PT

Tabelle 11: Abschätzung des Aufwands zur Anwendung der Methodik anhand der exemplarischen Anwendung in Abschnitt 8.1 (PT: Personentag)

Diesen Aufwänden steht ein großer Nutzen gegenüber. Erstens kann die günstigste alternative Rekonfiguration ausgewählt werden. Im Fall der exemplarischen Anwendung beträgt der Unterschied zwischen teuerster und günstigster Rekonfigurationsalternative 751 €. Dies beträgt jedoch nur einen Teil des Nutzens. Der zweite Nutzen besteht darin, dass die Rekonfigurationspotenziale des Betriebsmittels identifiziert und genutzt wurden und es somit rekonfiguriert und nicht durch ein neues ersetzt wurde. Die Anschaffungskosten für die Montagezelle betragen 48.000 €. Daher besteht der Nutzen darin, dass (ggf. auch schon abgeschriebene) Betriebsmittel rekonfiguriert und nicht verschrottet werden. Dadurch können Unternehmen Ausgaben einsparen, da die Kosten für eine Rekonfiguration unter den Kosten für einen Neuinvest liegen.

Darüber hinaus stehen die Modelle nach der erstmaligen Durchführung zur Verfügung und können für weitere Rekonfigurationen herangezogen werden. Der Aufwand zur erneuten Anwendung der Methodik ist daher stark reduziert, da die Erstellung der drei Modelle entfällt. Dies entspricht 7,5 Personentage im Anwen-

dungsbeispiel (vgl. Tabelle 11).⁵³ Dann ist der Aufwand auch für KMU akzeptabel, da hier üblicherweise geringere Planungskapazitäten als in Großunternehmen vorhanden sind. Somit lässt sich der initiale Investitionsaufwand auch für KMUs rechtfertigen; insbesondere wenn die Modelle von Lieferanten in Lastenheften gefordert werden können.

Den dritten großen Nutzen stellt die reduzierte Stillstandzeit auf Grund der Kenntnis der anzupassenden Bauteile sowie der durchzuführenden Tätigkeiten dar. Im Fall des industriellen Anwendungsbeispiels (siehe Abschnitt 8.1) liegt das Kosten-Nutzen-Verhältnis für die Anwendung der Methodik bei alleiniger Betrachtung der Kosteneinsparung durch die verringerte Stillstandzeit bei ca. 1:3.

Im Rahmen der exemplarischen Anwendung (siehe Abschnitt 8.2) beträgt das direkte Kosten-Nutzen-Verhältnis ca. 7:1. Da die Durchführung der Rekonfiguration mit und ohne Anwendung der Methodik nicht verglichen werden konnte, konnte dabei die reduzierte Stillstandzeit nicht einbezogen werden. Es ist aber erkennbar, dass der Nutzen der Methodikanwendung mit der Größe der Betriebsmittel steigt, da hier die Rekonfigurationskosten und Stillstandkosten höher sind. Somit geht mit der Methodik ein großer operativer Nutzen einher. Diese Meinung vertrat auch der Industriepartner des Beispiels in Abschnitt 8.1.

Darüber hinaus können noch weitere Vorteile durch die Methodik entstehen, wie bspw. reduzierter Ausschuss, ein stabilerer Produktionsanlauf oder eine höhere Verfügbarkeit des Betriebsmittels. Solche Faktoren wurden an dieser Stelle bei der technisch-wirtschaftlichen Bewertung jedoch nicht einbezogen.

9.3 Fazit

Zusammenfassend bietet die Methodik einen Mehrwert bei der Ermittlung sowie der Umsetzungsplanung von Betriebsmittelrekonfigurationen. Industrieunternehmen können die Methodik heranziehen, um Rekonfigurationen an Betriebsmitteln kostengünstiger und somit wirtschaftlicher durchzuführen. Sie führt zu reduzierten Stillstandzeiten bei Rekonfigurationen bzw. verkürzten Serienanläufen. Insbesondere in Zeiten zunehmender Serienanläufe (z. B. im Automobilbau, KIEFER 2007) sind kurze Stillstandzeiten von hohem wirtschaftlichem Vorteil. Dabei kann zudem die beste Rekonfigurationsalternative gewählt werden. Au-

⁵³ Die Erstellung der Modelle erfolgte nach der Betriebsmittelkonstruktion. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Aufwände bei einer zeitgleichen Modellerstellung geringer ausgefallen wären.

ßerdem erhöht sich durch die Methodik die Anzahl der Betriebsmittelrekonfigurationen, da sie sich mit Hilfe der Methodik einfacher erkennen, planen und durchführen lassen. Die Betriebsmittel werden somit länger im Unternehmen eingesetzt, wodurch sich die Abschreibungszeiträume verlängern⁵⁴ und folglich die Abschreibungskosten pro Produkt reduzieren. Der gesellschaftliche Mehrwert liegt in der mit der Anwendung der Methodik einhergehenden Ressourcenschonung, die insbesondere heutzutage in der gesellschaftspolitischen Diskussion gefordert wird (ABELE & REINHART 2011). Zur Erfüllung dieser Forderung wird u. a. dahingehend ein Beitrag geleistet, da die zur Durchführung von Rekonfigurationen benötigte Ressourcen (u. a. Material, Mitarbeiter, Kapital) gezielt und somit verschwendungsarm eingesetzt werden. Durch die Rekonfiguration von Anlagen wird darüber hinaus zu einer langfristigen Nutzung der Anlagen und somit zur Ressourcenschonung beigetragen. Der Nutzen aus wissenschaftlicher Sicht besteht ferner in der Beantwortung der Fragen wie sich strategische mit operativen Planungsaspekten verknüpfen lassen. Außerdem existiert nun ein Ansatz zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit auf Produktionsebene und es können strukturelle Eigenschaften in die Bewertung einbezogen werden.

⁵⁴ Anm.: Bezogen auf das interne Rechnungswesen

10 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Produzierende Unternehmen tragen signifikant zur deutschen Wirtschaftsleistung bei, stehen jedoch einem zunehmenden Innovationsdruck gegenüber. Betriebsmittel in der Produktion sind immer häufiger an neue Anforderungen anzupassen. Oftmals werden sie jedoch nicht rekonfiguriert, sondern ausgetauscht. Somit kann die Wirtschaftlichkeit durch die Rekonfiguration von Betriebsmitteln erhöht werden. Dazu sind Rekonfigurationsbedarfe zu ermitteln und Rekonfigurationen zu planen.

Bestehende betriebsmittelrelevante Forschungsarbeiten erfüllen nicht die an eine Methodik zur Bedarfsermittlung und Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen gestellten Anforderungen. Daher wurde in dieser Arbeit eine Methodik zur Unterstützung von Unternehmen bei der Rekonfiguration ihrer Betriebsmittel entwickelt. Mit ihr werden Rekonfigurationsbedarfe identifiziert, alternative Möglichkeiten für Rekonfigurationen generiert und diese Alternativen bewertet.

Die entwickelte Methodik basiert auf fünf erarbeiteten Modellen sowie Bewertungen. Sie besteht aus vier Schritten. Im ersten Schritt sind die Anforderungen an das Betriebsmittel zu modellieren. Durch den Abgleich von Betriebsmittelanforderungs- und Betriebsmitteleigenschaftsmodell erfolgt im zweiten Schritt die Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen. Daraufhin werden im dritten Schritt alternative Rekonfigurationen anhand eines Rekonfigurationsalgorithmus mit ihren Aufwänden (z. B. Materialkosten, Adaptiondauer) ermittelt, wofür die zu adaptierenden Bauteile erhoben werden. Der vierte Schritt umfasst die Auswahl der besten Rekonfigurationsalternative. Hierfür werden die einzelnen Rekonfigurationen mit sieben strukturellen und betriebswirtschaftlichen Kennzahlen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten bewertet.

Zur aufwandsarmen Anwendung der Methodik wurde ein Software-Werkzeug entwickelt und die Anwendung der Methodik anhand von zwei Beispielen gezeigt. Basierend hierauf erfolgte die technisch-wirtschaftliche Bewertung der Methodik. Die Vorteile liegen in reduzierten Kosten auf Grund von reduzierten Stillstandzeiten bei der Durchführung von Rekonfigurationen, da notwendige Bauteiladaptionen bekannt sind und benötigte Ressourcen somit rechtzeitig bereitgestellt werden, der Auswahl der wirtschaftlichsten Rekonfigurationsalternative sowie der Verlängerung des Betriebsmittellebenszyklus.

Ausblick

In dieser Arbeit wurden Kennzahlen zur Beschreibung der Rekonfigurationsfähigkeit von Betriebsmitteln entwickelt. In weiteren Untersuchungen ist eine Studie zur empirischen Deutung der Kennzahlen durchzuführen. Hiermit wären allgemeingültige Aussagen bzgl. der Rekonfigurationsfähigkeit von Betriebsmitteln auf Grund der Kennzahlausprägungen möglich.

Ferner liegt der Fokus der vorliegenden Methodik insbesondere auf Rekonfigurationen zu einzelnen Zeitpunkten, wobei Hinweise zur Einbeziehung folgender Rekonfigurationen gegeben werden. Diese folgenden Rekonfigurationen sind in aufbauenden Arbeiten zu integrieren, um die Rekonfigurationen über den gesamten Betriebsmittellebenszyklus zu verbessern. Hierbei sind Wechselwirkungen zwischen einzelnen Rekonfigurationen mit den ihnen zu Grunde liegenden Bauteiladaptionen sowie deren Auftretenswahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen. Bei diesem Bereich könnte bspw. die Dynamische Programmierung (siehe KAUFMANN & CRUON 1967) unterstützen.

In dieser Arbeit wurde die Rekonfiguration eines einzelnen Betriebsmittels fokussiert. Zukünftige Arbeiten haben daher das Rekonfigurationsmanagement in Unternehmen zu umfassen und somit Lösungen erarbeiten, wie Wechselwirkungen zwischen einzelnen Betriebsmittelrekonfigurationen zu behandeln, abzubilden und zu lösen sind. Solche Wechselwirkungen können bspw. entlang der Wertschöpfungskette entstehen.

11 Literaturverzeichnis

ABDI 2009

Abdi, M.: Fuzzy multi-criteria decision model for evaluating reconfigurable machines. *International Journal of Production Economics* 117 (2009), S. 1-15.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion*. München: Hanser 2011. ISBN: 978-344-642595-8.

ABELE ET AL. 2006A

Abele, E.; Elzenheimer, J.; Liebeck, T.; Meyer, T.: Globalization and Decentralization of Manufacturing. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): *Reconfigurable manufacturing systems*. Berlin: Springer 2006, S. 3-13. ISBN: 3-540-29391-4.

ABELE ET AL. 2006B

Abele, E.; Liebeck, T.; Wörn, A.: Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP* 55 (2006) 1, S. 3-13.

ABELE ET AL. 2009

Abele, E.; Dervisopoulos, M.; Kuhrke, B.: Bedeutung und Anwendung von Lebenszyklusanalysen bei Werkzeugmaschinen. In: Schweiger, S. (Hrsg.): *Lebenszykluskosten optimieren*. Wiesbaden: Gabler 2009, S. 51-80. ISBN: 978-3-8349-0989-3.

ADAMS & RUDOLF 2009

Adams, M.; Rudolf, M.: Unternehmensbewertung auf Basis von Realloptionen. In: Schacht, U. et al. (Hrsg.): *Praxishandbuch Unternehmensbewertung*. Wiesbaden: Gabler 2009, S. 359-382. ISBN: 978-3-8349-0633-5.

ADAMY & KEMPF 2004

Adamy, J.; Kempf, R.: Fuzzy-Systeme mit inhärenter Dynamik: ein Überblick. *Automatisierungstechnik* 52 (2004), S. 459-469.

AHLEMEYER & KÖNIGSWIESER 1998

Ahlemeyer, H. W.; Königswieser, R.: *Komplexität managen*. Frankfurt: Gabler 1998. ISBN: 978-3-4091-9316-0.

AHSEN ET AL. 2010

Ahsen, A. von; Heesen, M.; Kuchenbuch, A.: Grundlagen der Bewertung von Innovationen im Mittelstand. In: Ahsen, A. von (Hrsg.): *Bewertung von Innovationen im Mittelstand*. Berlin: Springer 2010, S. 1-35. ISBN: 978-3-642-01699-8.

ALEXOPOULOS ET AL. 2007

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

AMICO ET AL. 2006

Amico, M.; Asl, F.; Pasek, Z.; Perrone, G.: Real Options: an Application to
RMS Investment Evaluation. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable
manufacturing systems. Berlin: Springer 2006, S. 675-693. ISBN: 3-540-
29391-4.

ANDRESEN & GRONAU 2004

Andresen, K.; Gronau, N.: Der Faktor Wandlungsfähigkeit bei der Planung
neuer Fabriken. Industrie Management 20 (2004) 4, S. 60-61.

ASCHHOFF ET AL. 2007

Aschhoff, B.; Doherr, T.; Köhler, C.; Peters, B.; Rammer, C.; Schubert, T.;
Schwiebacher, F.: Innovationsverhalten der deutschen Wirtschaft. Mann-
heim: Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (ZEW) 2007.

BAMBERG ET AL. 2012

Bamberg, G.; Baur, F.; Krapp, M.: Statistik. 17. Aufl. München: Oldenbourg
2012. ISBN: 978-348-671651-1.

BAQAI 2010

Baqai, A.: Co-conception des processus d'usinage et des configurations
cinématiques d'un système de production reconfigurable. Diss. l'École Nati-
onale Supérieure d'Arts et Métiers, ParisTech (2010). <http://pastel.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/14/58/PDF/These_Aamer_Baqai_co-conception_des_processus_d_usinage_et_des_configuration_cinematiques_d_un_RMS.pdf> - 08.08.2013. (École doctorale n°432 : SMI-Sciences des Métiers de l'Ingénieur).

BECKER 2007

Becker, H. P.: Investition und Finanzierung. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler
2007. ISBN: 978-3-8349-0279-5.

BEHNCKE ET AL. 2011

Behncke, F. G. H.; Gabriel, F.; Langer, S.; Hepperle, C.; Lindemann, U.;
Karl, F.; Pohl, J.; Schindler, S.; Reinhart, G.; Zaeh, M. F.: Analysis of infor-
mation flows at interfaces between strategic product planning, product deve-
lopment and production planning to support process management. In: IEEE
(Hrsg.): Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man, and
Cybernetics (SMC). Anchorage, 9.-12. Oktober 2011, S. 72-79. ISBN: 978-
1-4577-0651-6.

BERGER & KLOOS 2007

Berger, C.; Kloos, K.: Werkstoffprüfung. In: Grote, K.-H. et al. (Hrsg.):
Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin: Springer 2007, S. E23-
E31. ISBN: 978-3-540-49714-1.

BIEDERMANN & LINDEMANN 2011

Biedermann, W.; Lindemann, U.: On the Applicability of Structural Criteria in Complexity Management. In: Culley, S. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design, ICED11. Kopenhagen: 15.-18. August 2011, S. 11-20.

BLEICHER 2004

Bleicher, K.: Das Konzept integriertes Management. 7. Aufl. Frankfurt: Campus 2004. ISBN: 3-593-37634-2.

BRANKAMP 1996

Brankamp, K.: Produktplanung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Hütte. Berlin: Springer 1996, S. 7-1-7-16. ISBN: 3-540-59360-8.

BRAS & EMBLEMSVÅG 1996

Bras, B.; Emblemståg, J.: Design optimisation for product life cycle. In: Huang, G. Q. (Hrsg.): Design for X. London: Chapman & Hall 1996, S. 398-423. ISBN: 0-412-78750-4.

BRIEL 2002

Briel, R. von: Ein skalierbares Modell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Anpassungsinvestitionen in ergebnisverantwortlichen Fertigungssystemen. Diss. Universität Stuttgart (2002). Heimsheim: Jost-Jetter 2002. ISBN: 3-931388-81-6. (IPA-IAO – Forschung und Praxis Nr. 352).

BROWNING 2001

Browning, T. R.: Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions. IEEE Transactions on Engineering Management 48 (2001) 3, S. 292-306.

BULLINGER & AMMER 1986

Bullinger, H.-J.; Ammer, D.: Systematische Montageplanung. München: Hanser 1986. ISBN: 3-446-14606-7.

BÜNTING 2009

Bünting, F.: Lebenszykluskostenbetrachtungen bei Investitionsgütern. In: Schweiger, S. (Hrsg.): Lebenszykluskosten optimieren. Wiesbaden: Gabler 2009, S. 35-50. ISBN: 978-3-8349-0989-3.

BURMAN 1979

Burman, P. J.: Seasonal adjustment - a survey. In: Makridakis, S. et al. (Hrsg.): Forecasting. Amsterdam: North-Holland 1979, S. 45-57. ISBN: 0-444-85294-8.

CHRISTIANSEN 2009

Christiansen, S.-K.: Methode zur Klassifikation und Entwicklung reifegrad-basierter Leistungsbewertungs- und Leistungssteigerungsmodelle. Diss. Universität Paderborn (2009). Münster: Monsenstein und Vannerdat 2009. ISBN: 978-3-939350-83-5. (HNI-Verlagsschriftenreihe Band 264).

CISEK 2005

Cisek, R.: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. Diss. Technische Universität München (2005). München: Herbert Utz 2005. ISBN: 3-8316-0475-4. (Forschungsberichte *iwb* 191).

COPELAND & ANTIKAROV 2001

Copeland, T.; Antikarov, V.: Real options. New York: Texere 2001. ISBN: 1-58799-028-8.

CROSER & EBEL 2003

Croser, P.; Ebel, F.: Pneumatik. 2. Aufl. Berlin: Springer 2003. ISBN: 3-540-00022-4.

CZICHOS & DAUM 2007

Czichos, H.; Daum, W.: Meßtechnik und Sensorik. In: Grote, K.-H. et al. (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin: Springer 2007, S. W1-W37. ISBN: 978-3-540-49714-1.

DASHCHENKO 2006

Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable manufacturing systems. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-29391-4.

DERVISOPOULOS 2011

Dervisopoulos, M.: Methode zur lebenszyklusbezogenen Optimierung von Werkzeugmaschinen. Diss. Technische Universität Darmstadt (2010). Darmstadt: Shaker 2011. ISBN: 978-3-844-00222-5. (Schriftenreihe des PTW: „Innovative Fertigungstechnik“ D 17).

DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR 2012: Druckluftsysteme in Industrie und Gewerbe. <http://www.stromeffizienz.de/uploads/tx_zrwshop/Ratgeber-Druckluft_web_2012.pdf> - 09.06.2013.

DHILLON 1988

Dhillon, B. S.: Life cycle costing. Montreux: Gordon and Breach 1988. ISBN: 2-88124-302-9.

DIEPOLD & LOHMANN 2010

Diepold, K. J.; Lohmann, B.: Transient Probabilistic Recurrent Fuzzy Systems. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2010) 2010, S. 3529-3536.

DIESTEL 2006

Diestel, R.: Graphentheorie. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-21391-0;

DIN 8580

DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2009.

DIN 8593-0

DIN 8593-0: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 2003.

DIN 14644-1

DIN 14644: Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche - Teil 1: Klassifizierung der Luftreinheit anhand der Partikelkonzentration. Berlin: Beuth 2010.

DIN 31051

DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth 2012.

DIN 60300-3-3

DIN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten. Berlin: Beuth 2005.

DOHMS 2001

Dohms, R.: Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionsstrukturen. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2000). Aachen: Shaker 2001. ISBN: 3-8265-8597-6. (Berichte aus der Produktionstechnik 11/2001).

DOM ET AL. 2008

Dom, M.; Hüffner, F.; Niedermeier, R.: Tiefensuche. In: Vöcking, B. et al. (Hrsg.): Taschenbuch der Algorithmen. Berlin: Springer 2008, S. 61-73. ISBN: 978-3-540-76394-9.

DRABOW 2006

Drabow, G.: Modulare Gestaltung und ganzheitliche Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme. Diss. Leibniz Universität Hannover (2006). Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2006. ISBN: 3-939026-13-1. (Berichte aus dem IFW 05/2006).

DU ET AL. 2006

Du, X.; Jiao, J.; Tseng, M.: Understanding customer satisfaction in product customization. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 31 (2006) 3-4, S. 396-406.

DUDEN 2013A

Duden. <<http://www.duden.de/rechtschreibung/Eigenschaft>> - 30.06.2013.

DUDEN 2013B

Duden. <<http://www.duden.de/rechtschreibung/Faehigkeit>> - 30.06.2013.

DÜRRSCHMIDT 2001

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

ELMARAGHY 2005

ElMaraghy, H. A.: Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 17 (2005) 4, S. 261-276.

ELMARAGHY 2009

ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and reconfigurable manufacturing systems. London: Springer 2009. ISBN: 978-1-84882-066-1.

ELMARAGHY ET AL. 2009

ElMaraghy, H. A.; Azab, A.; Schuh, G.; Pulz, C.: Managing variations in products, processes and manufacturing systems. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009), S. 441-446.

EMBLEMSVÅG 2003

Emblemsvåg, J.: Life-cycle costing. Hoboken: John Wiley 2003. ISBN: 0-471-35885-1.

EPPINGER & BROWNING 2012

Eppinger, S. D.; Browning, T. R.: Design structure matrix methods and applications. Cambridge: MIT Press 2012. ISBN: 978-0-262-01752-7.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Band 1: Grundlagen. 3. Aufl. Düsseldorf: VDI 1996. ISBN: 3-184-01542-4.

EVERSHEIM 1997

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Band 3: Arbeitsvorbereitung. 3. Aufl. Düsseldorf: VDI 1997. ISBN: 3-540-62652-2.

EVERSHEIM ET AL. 1996

Eversheim, W.; Maßberg, W.; Pritschow, G.: Prozeßgestaltung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Hütte. Berlin: Springer 1996, S. 7-73-7-123. ISBN: 3-540-59360-8.

EVERSHEIM ET AL. 2002

Eversheim, W.; Lange-Stalinski, T.; Redelstab, P.: Wandlungsfähigkeit durch mobile Fabriken. Werkstattstechnik online 92 (2002) 4, S. 169-170.

EVJEN ET AL. 2008

Evjen, B.; Hollis, B.; Sheldon, B.; Sharkey, K.: Professional Visual Basic 2008. Indianapolis: John Wiley 2008. ISBN: 978-0-470-19136-1.

FELDMANN 2004

Feldmann, K.: Montage strategisch ausrichten. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-540-40304-3.

FIEBIG 2010

Fiebig, S.: Umrüstung flexibler Fertigungssysteme ohne Stückzahlverlust. In: 9. Deutscher Fachkongress Fabrikplanung 2010. Ludwigsburg, 27.-28. April 2010.

FIEGE 2009

Fiege, R.: Axiomatic Design. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-2136-9.

FIGUEIRA ET AL. 2005

Figueira, J.; Greco, S.; Ehrgott, M. (Hrsg.): Multiple criteria decision analysis. New York: Springer 2005. ISBN: 978-0-387-23067-2.

FLEMMING 2008

Flemming, A.: Zeitkontinuierliche rekurrente Fuzzy-Systeme. Diss. Technische Universität Darmstadt (2008). Düsseldorf: VDI 2008. ISBN: 978-3-18-515108-8. (Berichte aus dem Institut für Automatisierungstechnik der TU Darmstadt 1151).

FLESchUTZ, 2010

Fleschutz, T.: Beitrag zur nachhaltigen industriellen Wertschöpfung durch multiattributive Bewertung von Montageanlagen. Diss. Technische Universität Berlin (2010). Stuttgart: Fraunhofer 2010. ISBN: 978-3-8396-0171-6. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin 83).

FÖRSTER 1981

Förster, G.: Der optimale Geldmengenbegriff. Berlin: Duncker & Humblot 1981. ISBN: 3-428-04905-5.

FOULDS 1992

Foulds, L. R.: Graph theory applications. New York: Springer 1992. ISBN: 3-540-97599-3.

GAUSEMEIER ET AL. 1996

Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: Szenario-Management. 2. Aufl. München: Hanser 1996. ISBN: 3-446-18721-9.

GAUSEMEIER ET AL. 2006

Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Eckes, R.: Virtual Production – Computer Model-Based Planning and Analyzing of Manufacturing Systems. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable manufacturing systems. Berlin: Springer 2006, S. 743-759. ISBN: 3-540-29391-4.

GEIßDÖRFER 2009

Geißdörfer, K.: Total Cost of Ownership (TCO) und Life Cycle Costing (LCC). 1. Aufl. Münster: LIT 2009. ISBN: 978-3-8258-1863-0.

GHANDFOROUSH ET AL. 1985

Ghandforoush, P.; Huang, P. Y.; Taylor, B. W.: A multi-criteria decision model for the selection of a computerized manufacturing control system. International Journal of Production Research 23 (1985) 1, S. 117-128.

GLEISS ET AL. 2003

Gleiss, P. M.; Leydold, J.; Stadler, P. F.: Circuit Bases of Strongly Connected Digraphs. Discussiones Mathematicae: Graph Theory 23 (2003), S. 241-260.

GLEIßNER & ROMEIKE 2005

Gleißner, W.; Romeike, F.: Risikomanagement. 1. Aufl. Freiburg: Haufe 2005. ISBN: 3-448-06209-X.

GÖTZE 2000

Götze, U.: Lebenszykluskosten. In: Fischer, T. M. (Hrsg.): Kosten-Controlling. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2000, S. 266-289. ISBN: 3-7910-1407-2.

GÖTZE 2008

Götze, U.: Investitionsrechnung. 6. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-78872-0.

GÖTZE 2010

Götze, U.: Kostenrechnung und Kostenmanagement. 5. Aufl. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-11823-4.

GRAF ET AL. 1998

Graf, U.; Stange, K.; Henning, H.-J.; Wilrich, P. T.; Henning, H.-J. (Hrsg.): Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik. Berlin: Springer 1998. ISBN: 3-540-16901-6.

GROTHER ET AL. 2008

Grote, K.-H.; Engelmann, F.; Beitz, W.; Syrbe, M.; Beyerer, J.: Konstruktion und Entwicklung. In: Czichos, H. et al. (Hrsg.): Hütte. Berlin: Springer 2008, S. K1-K104. ISBN: 978-3-540-71851-2.

GUTENBERG 1979

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. 23. Aufl. Berlin: Springer 1979. ISBN: 3-540-05694-7.

GÜTTLER 2000

Güttler, P. O.: Statistik. 3. Aufl. München: Oldenbourg 2000. ISBN: 3-486-25453-7.

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). 2. Aufl. Düsseldorf: VDI 1989. ISBN: 3-18-400924-6.

HAUSCHILDT 2004

Hauschildt, J.: Innovationsmanagement. 3. Aufl. München: Franz Vahlen 2004. ISBN: 3-800-63075-3.

HEGER 2007

Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Diss. Leibniz Universität Hannover (2006). Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2007. ISBN: 978-3-939026-43-3. (Berichte aus dem IFA 01/2007).

HEINECKER 2006

Heinecker, M.: Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme. Diss. Technische Universität München (2006). München: Herbert Utz 2006. ISBN: 978-383-160620-7.

HEINEN ET AL. 2008

Heinen, T.; Rimpau, C.; Wörn, A.: Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis, P. et al. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2008, S. 19-32. ISBN: 978-3-939026-96-9.

HELBING ET AL. 2010

Helbing, K. W.; Mund, H.; Reichel, M.: Handbuch Fabrikprojektierung. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-01617-2.

HERNÁNDEZ MORALES 2003

Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Diss. Universität Hannover (2002). Hannover: VDI 2003. ISBN: 978-3-18-314916-2. (Fortschritt-Berichte VDI: Band 149, Reihe 16, Technik und Wirtschaft).

HERRMANN 2010

Herrmann, C.: Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-01420-8.

HÖFT 1992

Höft, U.: Lebenszykluskonzepte. Berlin: E. Schmidt 1992. ISBN: 3-503-03315-7.

HOMBURG 2000

Homburg, C.: Quantitative Betriebswirtschaftslehre. 3. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2000. ISBN: 3-409-33417-3.

HOMMEL 2001

Hommel, U. (Hrsg.): Realloptionen in der Unternehmenspraxis. Berlin: Springer 2001. ISBN: 3-540-41783-4.

HORNBOGEN ET AL. 2012

Hornbogen, E.; Eggeler, G.; Werner, E.: Werkstoffe. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-22560-4.

HWANG & YOON 1981

Hwang, C.-L.; Yoon, K.: Multiple Attribute Decision Making. Berlin: Springer 1981. ISBN: 3-540-10558-1.

IG METALL BEZIRK BAYERN 2008

IG Metall Bezirk Bayern (Hrsg.): Tarifverträge für die Arbeitnehmer der bayerischen Metall- und Elektroindustrie. München: Bavaria-Druck GmbH 2008.

JACOB & VARGHESE 2011

Jacob, J.; Varghese, K.: Integration of BIM and DSM to Improve Design Processes in Building Construction Projects. In: Eppinger, S. D. et al. (Hrsg.): Invest on visualisation. München: Hanser 2011, S. 363-376. ISBN: 978-3-446-43037-2.

JANN 1981

Jann, W.: Kategorien der Policy-Forschung. Speyer: Hochschule für Verwaltungswissenschaften 1981.

JANN & WEGRICH 2003

Jann, W.; Wegrich, K.: Phasenmodelle und Politikprozesse. In: Schubert, K. (Hrsg.): Lehrbuch der Politikfeldanalyse. München: Oldenbourg 2003, S. 71-104. ISBN: 3-486-27284-5.

JANORSCHKE & PRITZEL 2009

Janorschke, B.; Pritzel, C.: Wandlungsfähigkeit. In: Schenk, M. et al. (Hrsg.): Internationalisierung industrieller Dienstleistungen. Wiesbaden: Gabler 2009, S. 409-438. ISBN: 978-3-8349-1359-3.

JONAS 2000

Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Diss. Technische Universität München (2000). München: Herbert Utz 2000. ISBN: 3-89675-870-5. (Forschungsberichte *iwb* 151).

JUNG 2008

Jung, H.: Personalwirtschaft. 8. Aufl. München: Oldenbourg 2008. ISBN: 978-3-48658-709-8.

KARL ET AL. 2011

Karl, F.; Pohl, J.; Schindler, S.: Umfrage - Beeinflussung der Produktion durch Zyklen. *iwb* Newsletter 19 (2011) 4, S. 7. ISSN: 1614-3442.

KARL ET AL. 2012A

Karl, F.; Reinhart, G.; Zaeh, M. F.: Planning of Reconfigurations on Manufacturing Resources. In: Chryssolouris, G. (Hrsg.): Proceedings of the 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012. Athen, 16.-18. Mai 2012, S. 692-700.

KARL ET AL. 2012B

Karl, F.; Reinhart, G.; Zaeh, M. F.: Strategic Planning of Reconfigurations on Manufacturing Resources. *Procedia CIRP* 3 (2012), S. 608-613.

KAUFMANN & CRUON 1967

Kaufmann, A.; Cruon, R.: Dynamic Programming. New York: Academic Press 1967.

KEHAT & SHACHAM 1973

Kehat, E.; Shacham, M.: Chemical Process Simulation Programs, Part 2: Partitioning and Tearing of Systems Flowsheets. *Process Technology International* 18 (1973) 3, S. 115-118.

KIEFER 2007

Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Diss. Universität des Saarlandes (2007). ISBN: 978-3-930429-72-1. (Schriftenreihe Produktionstechnik 43).

KLEIN & SCHOLL 2004

Klein, R.; Scholl, A.: Planung und Entscheidung. München: Vahlen 2004.
ISBN: 3-8006-3060-5.

KLEMKE 2014

Klemke, T.: Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken.
Diss. Leibniz Universität Hannover (2013). Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2014. ISBN: 978-3-944586-50-2. (Berichte aus dem IFA 01/2014).

KOHLER 2008

Kohler, U.: Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme. Diss. Technische Universität München (2007). München: Utz 2008. ISBN: 978-383-160753-2. (Forschungsberichte *iwb* 210).

KONOLD ET AL. 2003

Konold, P.; Reger, H.; Hesse, S.: Praxis der Montagetechnik. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2003. ISBN: 978-3-528-13843-1.

KRAMER 2009

Kramer, O.: Computational Intelligence. Dordrecht: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-79738-8.

KREBS 2012

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. Diss. Technische Universität München (2011). München: Herbert Utz 2012. ISBN: 978-383-164156-7. (Forschungsberichte *iwb* 255).

KREIMEYER 2010

Kreimeyer, M. F.: A Structural Measurement System for Engineering Design Processes. Diss. Technische Universität München (2009). München: Dr. Hut 2010. ISBN: 978-386-853399-6.

KRUG 2013

Krug, S.: Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce). Diss. Technische Universität München (2012). München: Herbert Utz 2013. ISBN: 978-3-8316-4243-4. (Forschungsberichte *iwb* 270).

KRÜGER 1998

Krüger, W.: Management permanenten Wandels. In: Glaser, H. et al. (Hrsg.): Organisation im Wandel der Märkte. Wiesbaden: Gabler 1998, S. 227-249.
ISBN: 3-409-12243-5.

KRUSCHWITZ 2009

Kruschwitz, L.: Investitionsrechnung. 12. Aufl. München: Oldenbourg 2009.
ISBN: 978-3-486-58766-1.

KUSIAK 1999

Kusiak, A.: Engineering design. Products, processes and systems. San Diego: Academic Press 1999. ISBN: 0-12-430145-2.

LACKMANN 2007

Lackmann, J.: Festigkeitslehre - Allgemeine Grundlagen. In: Grote, K.-H. et al. (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin: Springer 2007, S. C1-C6. ISBN: 978-3-540-49714-1.

LAUX & SCHABEL 2009

Laux, H.; Schabel, M. M.: Subjektive Investitionsbewertung, Marktbewertung und Risikoteilung. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-85272-8.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-642-01422-2.

LINDEMANN ET AL. 2009

Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural complexity management. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-87888-9.

LOTTER 1992

Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI 1992. ISBN: 3-18-401168-2.

LOTTER & WIENDAHL 2006

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-21413-7.

LOUKMIDIS 2006

Loukmidis, G.: Unternehmensübergreifendes Bestandsmanagement. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 833-860. ISBN: 978-3-540-40306-7.

LUCZAK & EVERSHEIM 1999

Luczak, H.; Eversheim, W.: Produktionsplanung und -steuerung. 2. Aufl. Berlin: Springer 1999. ISBN: 3-540-65559-X.

MAKRIDAKIS ET AL. 1998

Makridakis, S.; Wheelwright, S. C.; Hyndman, R. J.: Forecasting. 3. Aufl. Hoboken: John Wiley 1998. ISBN: 0-444-85294-8.

MENSCH 2008

Mensch, G.: Finanz-Controlling. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2008. ISBN: 9783486582154.

MELNIKOV ET AL. 1994

Melnikov, O.; Tyshkevich, R.; Yemelichev, V.; Sarvanov, V.: Lectures on graph theory. Mannheim: BI Wissenschaftsverlag 1994. ISBN: 3-411-17121-9.

MERKLE ET AL. 2004

Merkle, D.; Schrader, B.; Thomes, M.: Hydraulik. 2. Aufl. Berlin Springer 2004. ISBN: 3-540-21495-X.

MERZ 1987

Merz, K.-P.: Entwicklung einer Methode zur Planung der Struktur automatisierter Montagesysteme. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1987). Aachen: Shaker 1987.

MEYER 2002

Meyer, M.: Grundlagen der Informationstechnik. Signale, Systeme und Filter. 1. Aufl. Braunschweig: Vieweg 2002. ISBN: 3-528-03931-0.

MIESE 1976

Miese, M.: Systematische Montageplanung in Unternehmen mit Kleinserienproduktion. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1973). Essen: Girardet 1976. ISBN: 3-7736-0401-7.

MIETZNER 2009

Mietzner, D.: Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-1687-7.

MIRSON ET AL. 2011

Mirson, A.; Skrypnyuk, O.; Elezi, F.; Lindemann, U.: MDM-Based Software Modularization by Analysing Inter-Project Dependencies. In: Eppinger, S. D. et al. (Hrsg.): Invest on visualisation. München: Hanser 2011, S. 143-157. ISBN: 978-3-446-43037-2.

MÖLLER 2008

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Diss. Technische Universität München (2007). München: Herbert Utz 2008. ISBN: 978-3-8316-0778-5. (Forschungsberichte *iwb* 212).

MÜLLER ET AL. 2011

Müller, R.; Esser, M.; Janßen, M.; Vette, M.; Corves, B.; Hüsing, M.; Riedel, M.: Reconfigurable handling system. Production Engineering, Research & Development 5 (2011) 4, S. 453-461.

MÜLLER 2007

Müller, S.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Diss. Technische Universität München (2007). München: Herbert Utz 2007. ISBN: 978-3-8316-0750-1. (Forschungsberichte *iwb* 209).

MUN 2006

Mun, J.: Real Options and Monte Carlo Simulation versus Traditional DFC Valuation in Layman's Terms. In: Leggio, K. et al. (Hrsg.): Managing enterprise risk. Amsterdam: Elsevier 2006, S. 75-106. ISBN: 978-0-08-044949-4.

NEBL 2006

Nebel, T.: Anlagenwirtschaft. 1. Aufl. München: Oldenbourg 2006. ISBN: 978-3-486-57961-1.

NEBL 2007

Nebel, T.: Produktionswirtschaft. 6. Aufl. München: Oldenbourg 2007. ISBN: 978-3-486-58493-6.

NEUHAUSEN 2001

Neuhausen, J.: Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2001). < http://sylvester.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2002/047/02_047.pdf> - 08.08.2013.

NICOLAI 1995

Nicolai, H.: Entwicklung eines Verfahrens zur Nutzenbewertung von PPS-Systemen auf der Basis der Theorie unscharfer Mengen. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1995). Aachen: Augustinus. ISBN: 3-860-73248-X. (Aachener Beiträge zu Humanisierung und Rationalisierung 18).

NOFEN 2006

Nofen, D.: Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse der modularen Fabrik. Diss. Leibniz Universität Hannover (2006). Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2006. ISBN: 978-3-939026-20-4. (Berichte aus dem IFA 01/2006).

NYHUIS ET AL. 2008

Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2008. ISBN: 978-3-939026-96-9.

NYHUIS ET AL. 2010

Nyhuis, P.; Wulf, S.; Klemke, T.; Hirsch, B.: Integrative factory, technology, and product planning-systemizing the information transfer on the operational level. Production Engineering, Research & Development 4 (2010) 2-3, S. 231-237.

OLSCHOWY 1990

Olschowy, W.: Externe Einflussfaktoren im strategischen Innovationsmanagement. Berlin: Erich Schmidt 1990. ISBN: 3-50302-887-0.

PACHOW-FRAUENHOFER 2012

Pachow-Frauenhofer, J.: Planung veränderungsfähiger Montagesysteme Diss. Leibniz Universität Hannover (2012). Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2012. ISBN: 978-3-943-10457-8. (Berichte aus dem IFA 01/2012).

PERRIDON ET AL. 2009

Perridon, L.; Steiner, M.; Rathgeber, A. W.: Finanzwirtschaft der Unternehmung. 15. Aufl. München: Vahlen 2009. ISBN: 978-3-8006-3679-2.

PICOT ET AL. 2003

Picot, A.; Reichwald, R.; Wigand, R. T.: Die grenzenlose Unternehmung. 5. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2003. ISBN: 3-409-52214-X.

PIMMLER & EPPINGER 1994

Pimmler, T. U.; Eppinger, S. D.: Integration Analysis of Product Decompositions. In: Hight, T. K. et al. (Hrsg.): Design Theory and Methodology: Proceedings of the Sixth International Conference (DTM '94). Minneapolis, September 1994. New York: American Society of Mechanical Engineers 1994, S. 343-351. ISBN: 978-0-791-81282-2.

POGGENSEE 2009

Poggensee, K.: Investitionsrechnung. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-1016-5.

POHL 2008

Pohl, K.: Requirements Engineering. 2. Aufl. Heidelberg: dpunkt 2008. ISBN: 978-3-89864-550-8.

PRASCH 2011

Prasch, M. G.: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage. Diss. Technische Universität München (2010). München: Herbert Utz 2011. ISBN: 978-3-83164033-1. (Forschungsberichte *iwb* 243).

PREUSSE 2008

Preusse, C.: Maschinen sicher konstruieren. Köln: Heymann 2008. ISBN: 978-3-452-26858-7.

RÅDE ET AL. 2000

Råde, L.; Westergren, B.; Vachenauer, P.: Springers mathematische Formeln. 3. Aufl. Berlin: Springer 2000. ISBN: 3-540-67505-1.

RANGANATH & RODRIGUES 2008

Ranganath, B. J.; Rodrigues, L. L.: System Dynamics. Neu Dehli: I.K. International 2008. ISBN: 978-81-89866-92-1.

RASCH 2000

Rasch, A. A.: Erfolgspotential Instandhaltung. Berlin: Erich Schmidt 2000. ISBN: 3-503-05811-7.

REDEKER 1969

Redeker, G.: Technische und betriebswirtschaftliche Grundlagen für die Methodenwahl bei der Erhaltung betrieblicher Anlagen. Diss. Technische Universität Hannover (1969).

REFA 1990

REFA (Hrsg.): Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München: Hanser 1990. ISBN: 978-3-446-15967-9.

REIBNITZ 1981

Reibnitz, U. von: So können auch Sie die Szenario-Technik nutzen. Marketing Journal 14 (1981) 1, S. 37-41.

REINHART & POHL 2011

Reinhart, G.; Pohl, J.: Production Structure Calendar – A Strategic Planning Tool. In: Duffie, N. A. (Hrsg.): Proceedings of the 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS) 2011. Madison, 1.-3. Juni 2011.

Reinhart & Schindler 2011

Reinhart, G.; Schindler, S.: Strategic Evaluation of Technology Chains for Producing Companies. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability – Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV) 2011. Montreal, 2.-5. Oktober 2011, S. 391-396. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-23860.

REINHART & ZÄH 2003

Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003. ISBN: 978-3-540-00594-0.

REINHART ET AL. 2009A

Reinhart, G.; Pohl, J.; Schindler, S.; Karl, F.; Rimpau, C.: Zyklusorientiertes Produktionsstruktur-Monitoring. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 9, S. 750-754.

REINHART ET AL. 2009B

Reinhart, G.; Schindler, S.; Pohl, J.: Zyklusorientierte Produktionstechnologieplanung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 1-2, S. 50-53.

REINHART ET AL. 2011A

Reinhart, G.; Hüttner, S.; Krug, S.: Automatic Configuration of Robot Systems – Upward and Downward Integration. In: Sabina J. et al. (Hrsg.): Intelligent robotics and applications. Montreal, 3.-5. Oktober 2012. Heidelberg: Springer 2011, S. 102-111. ISBN: 978-3-642-25485-7.

REINHART ET AL. 2011B

Reinhart, G.; Schindler, S.; Krebs, P.: Strategic Evaluation of Manufacturing Technologies. In: Hesselbach, J. (Hrsg.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing - Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Braunschweig, 2.-4. Mai 2011. Berlin: Springer 2011, S. 179-184. ISBN: 978-3-642-19691-1.

REUSCH 1993

Reusch, B.: Fuzzy logic. Berlin: Springer 1993. ISBN: 3-540-57524-3.

RIMPAU 2011

Rimpau, C.: Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte. Diss. Technische Universität München (2010). München: Herbert Utz 2011. ISBN: 978-383-164015-7. (Forschungsberichte *iwb* 239).

ROGALSKI 2009

Rogalski, S.: Entwicklung einer Methodik zur Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen. Diss. Universität Karlsruhe (2009). Karlsruhe: universitätsverlag karlsruhe 2009. ISBN: 978-386-644383-9. (Reihe Informationsmanagement im Engineering Karlsruhe 2).

ROMMELFANGER 1994

Rommelfanger, H.: Fuzzy decision support-systeme. 2 Aufl. Berlin: Springer 1994. ISBN: 3-540-57793-9.

ROSSELLO 2008

Rossello, D.: MaxVaR with non-Gaussian distributed returns. *European Journal of Operational Research* 189 (2008) 1, S. 159-171.

SAATY 1990

Saaty, T. L.: *The Analytic Hierarchy Process*. 2. Aufl. Pittsburgh: RWS Publications 1990. ISBN: 0-9620317-2-0.

SCHENK & WIRTH 2004

Schenk, M.; Wirth, S.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*. Berlin: Springer 2004. ISBN: 978-3-540-20423-7.

SCHIENMANN 2002

Schienmann, B.: *Kontinuierliches Anforderungsmanagement*. München: Addison-Wesley 2002. ISBN: 3-8273-1787-8.

SCHLITTEGEN & STREITBERG 2001

Schlittgen, R.; Streitberg, B. H.: *Zeitreihenanalyse*. 9 Aufl. München: Oldenbourg 2001. ISBN: 978-3-486-71096-0.

SCHMIDT 2012

Schmidt, N.: Der neue Golf: Volkswagen strebt an die Weltspitze. *The Wall Street Journal*, Ausgabe vom 19.08.2012.
<http://www.wallstreetjournal.de/article/SB10000872396390444508504577595171801282972.html?mod=WSJDE_EditorsPicks_GoogleNews> - 19.08.2012.

SCHUH 2010

Schuh, G.: Hoffnung ist keine Strategie. *Werkstattstechnik online* 100 (2010) 4, S. 217.

SCHUH & GIERTH 2006

Schuh, G.; Gierth, A.: Aachener PPS-Modell. In: Schuh, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung*. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 11-27. ISBN: 978-3-540-40306-7.

SCHUH & ROESGEN 2006

Schuh, G.; Roesgen, R.: Aufgaben. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 28-78. ISBN: 978-3-540-40306-7.

SCHUH & KLAPPERT 2011

Schuh, G.; Klappert, S. (Hrsg.): Technologiemanagement. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-12529-4.

SCHUH ET AL. 2004

Schuh, G.; Harre, J.; Gottschalk, S.; Kampker, A.: Design for Changeability (DFC) – Das richtige Maß an Wandlungsfähigkeit finden. Werkstattstechnik online 94 (2004) 4, S. 100-106.

SCHUHR 2012

Schuhr, R.: Einführung in die Prognose saisonaler Zeitreihen mithilfe exponentieller Glättungstechniken und Vergleich der Verfahren von Holt/Winters und Harrison. In: Mertens, P. (Hrsg.): Prognoserechnung. Heidelberg: Physica 2012, S. 47-74. ISBN: 978-3-7908-2796-5.

SCHUMPETER 1939

Schumpeter, J. A.: Business cycles. New York: McGraw Hill 1939.

SCHWEIGER 2009A

Schweiger, S.: Wettbewerbsvorteile durch Lebenszykluskostenoptimierung. In: Schweiger, S. (Hrsg.): Lebenszykluskosten optimieren. Wiesbaden: Gabler 2009, S. 15-34. ISBN: 978-3-8349-0989-3.

SCHWEIGER 2009B

Schweiger, S. (Hrsg.): Lebenszykluskosten optimieren. Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-0989-3.

SEISING 2005

Seising, R.: Die Fuzzifizierung der Systeme. Stuttgart: F. Steiner 2005. ISBN: 3-515-08768-0.

SELIGER 2007

Seliger, G.: Montage und Demontage. In: Grote, K.-H. et al. (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin: Springer 2007, S. S-88-S-94. ISBN: 978-3-540-49714-1.

SESTERHENN 2003

Sesterhenn, M.: Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2002). Aachen: Shaker 2003. ISBN: 3-8322-1066-0. (Berichte aus der Produktionstechnik 1/2003).

SIHN & SPECHT 1996

Sihn, W.; Specht, D.: Instandhaltung von Produktionssystemen. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Hütte. Berlin: Springer 1996, S. 10-103-10-107. ISBN: 3-540-59360-8.

SPATH ET AL. 2001

Spath, D.; Baumeister, M.; Dill, C.: Ist Flexibilität genug? Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 96 (2001) 5, S. 235-241.

SPATH ET AL. 2003

Spath, D.; Warschat, J.; Auernhammer, K.; Gomeringer, A.; Bannert, M.: Integriertes Innovationsmanagement. Stuttgart: Fraunhofer-IRB 2003. ISBN: 3-8167-6329-4.

SPIECKERMANN ET AL. 2000

Spieckermann, S.; Gutenschwager, K.; Heinzl, H.; Voß, S.: Simulation-Based Optimization in the Automotive Industry: A Case Study on Body Shop Design. Simulation 75 (2000), S. 276-286.

SPUR & KRAUSE 1997

Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt. München: Hanser 1997. ISBN: 3-446-19176-3.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2007

Statistisches Bundesamt: Ermittlung der Bruttowertschöpfung. <http://www.bafa.de/bafa/de/energie/besondere_ausgleichsregelung_eeg/publikationen/stabua/energie_eeg_bruttowertschoepfung.pdf> - 08.11.2013.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2013A

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 2013. 1. Aufl. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2013. ISBN: 978-3-8246-1007-5.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2013B

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Bruttoinlands-Produkt 2012 für Deutschland. <https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2013/BIP2012/Pressebrochure_BIP2012.pdf?__blob=publicationFile> - 14.04.2013.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2013C

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Inflationsrate in Deutschland bis 2012. <<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindex-zum-vorjahr/>> - 8.11.2013.

STEMPER 2001

Stemper, T.: Alter, Altern, Alterssport. <<http://www.fitness-tropic.de/assets/applets/alterssport.pdf>> - 08.08.2013.

STEWART 1962

Stewart, D. V.: On an Approach to the Analysis of the Structure of Large Systems of Equations. SIAM Review 4 (1962) 4, S. 321-342.

STEWART 1981

Steward, D. V.: Design structure system: A method for managing the design of complex systems. IEEE Transactions on Engineering Management 28 (1981) 3, S. 71-74.

STIER 2001

Stier, W.: Methoden der Zeitreihenanalyse. Berlin: Springer 2001. ISBN: 978-3-540-41700-2.

STRASSER 1993

Strasser, H.: Ergonomie - Umgebungseinflüsse. In: Hettinger, T. et al. (Hrsg.): Kompendium der Arbeitswissenschaft. Ludwigshafen: Kiehl 1993, S. 243-352. ISBN: 3-470-45401-9.

STRASSER 2007

Strasser, H.: Leitgedanken zur "Kunst des Alterns" und Streifzug durch den Altersgang der Leistungsfähigkeit aus ergonomischer Sicht. In: GfA - Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.): Die Kunst des Alterns. Dortmund: GfA-Press 2007, S. 5-17. ISBN: 978-3-936804-05-8.

SUDHOFF 2008

Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. Diss. Technische Universität München (2007). München: Herbert Utz 2008. ISBN: 978-3-8316-0749-5. (Forschungsberichte *iwb* 208).

TESEON 2012

TESEON (Hrsg.): LOOMEIO.
<<http://www.teseon.de/component/phocadownload/category/2-loomeio-public?download=6:loomeio-highlights-de>> - 16.02.2013.

TIEFEL 2007

Tiefel, T.: Gewerbliche Schutzrechte im Innovationsprozess. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2007. ISBN: 978-3-8244-0824-5.

TIERNAN 1970

Tiernan, J. C.: An Efficient Search Algorithm to Find the Elementary Circuits of a Graph. Communications of the ACM 13 (1970) 12, S. 722-726.

TITTMANN 2003

Tittmann, P.: Graphentheorie. München, Wien: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag. 2003. ISBN: 3-446-22343-6.

TROMMER 2001

Trommer, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2001). Aachen: Shaker 2001. ISBN: 3-8265-8698-0. (Berichte aus der Produktionstechnik 15/2001).

ULRICH 1995

Ulrich, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. Research Policy 24 (1995), S. 419-440.

ULRICH & PROBST 2001

Ulrich, H.; Probst, G.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln. Bern: P. Haupt 2001. ISBN: 3-258-06291-9.

VDI 1983

VDI (Hrsg.): Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. 3. Aufl. Düsseldorf: VDI 1983. ISBN: 3-18-400605-0.

VDI 2221

VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Berlin: Beuth 1993.

VDI 2225

VDI 2225, Blatt 3: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Berlin: Beuth 1998.

VDI 2815

VDI 2815, Blatt 1: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung - Einführung, Grundlagen. Berlin: Beuth 1978.

VDI 2860

VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik. Berlin: Beuth 1990.

VDI 2884

VDI 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Berlin: Beuth 2005.

VDI 2885

VDI 2885: Einheitliche Daten für die Instandhaltungsplanung und die Ermittlung von Instandhaltungskosten. Berlin: Beuth 2003.

VDI 5200

VDI 5200, Blatt 1: Fabrikplanung - Planungsvorgehen. Berlin: Beuth 2011.

VDMA 34160

VDMA 34160: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. Berlin: Beuth 2006.

VELKOVA 2014

Velkova, J.: Methode zur Selbstbewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. Diss. Ruhr-Universität Bochum (2013). Aachen: Shaker 2014. ISBN: 978-3-8440-2461-6. (Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme 1/2014).

VIELHABER 2004

Vielhaber, W.: Planung und Gestaltung wandlungsfähiger Satellitenfabriken und Fabrikparks. In: Witte, K.-W. et al. (Hrsg.): Neue Konzepte für wandlungsfähige Fabriken und Fabrikparks. Aachen: Shaker 2004, S. 19-42. ISBN: 3-8322-3423-3.

VOIGTS 1991

Voigts, A.: Planung und Steuerung variabel nutzbarer Montagebereiche. Diss. Universität Hannover (1991). Düsseldorf: VDI-Verlag 1991. ISBN: 3-18-143102-8. (Fortschritt-Berichte VDI: Band 231, Reihe 2, Fertigungstechnik).

WAGNER 2006

Wagner, W.: Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion. Diss. Technische Universität München (2006). München: Herbert Utz 2006. ISBN: 3-831-60586-6. (Forschungsberichte *iwb* 195).

WAGNER & PATZAK 2007

Wagner, K. W.; Patzak, G.: Performance excellence. München: Hanser 2007. ISBN: 978-3-446-40575-2.

WAHRIG & WAHRIG-BURFEIND 2002

Wahrig, G.; Wahrig-Burfeind, R.: Deutsches Wörterbuch. Gütersloh: Bertelsmann-Lexikon 2002. ISBN: 3-577-10079-6.

WALDMAN & SANGAL 2011

Waldman, F.; Sangal, N.: Measuring, Tracking and Communicating Change in Enterprise Systems with a Webbased Repository. In: Eppinger, S. D. et al. (Hrsg.): Invest on visualisation. München: Hanser 2011, S. 173-185. ISBN: 978-3-446-43037-2.

WALKENBACH 2007

Walkenbach, J.: Excel 2007 VBA programming for dummies. Hoboken: John Wiley 2007. ISBN: 978-0-470-04674-6.

WARFIELD 1973

Warfield, J. N.: Binary Matrices in System Modeling. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 3 (1973) 5, S. 441-449.

WEINBLATT 1972

Weinblatt, H.: A New Search Algorithm for Finding the Simple Cycles of a Finite Directed Graph. Journal of the Association for Computing Machinery 19 (1972) 1, S. 43-56.

WEISMANN 2008

Weismann, U.: Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling. Aachen: Shaker 2008. ISBN: 978-3-8322-7773-4.

WERMKE et al. 2009

Wermke, M.; Klosa, A.; Kunkel-Razum, K.; Scholze-Stubenrecht, W. (Hrsg.): Duden - Die Deutsche Rechtschreibung. 25. Aufl. Mannheim: Dudenverlag 2009. ISBN: 3-4110-4015-7.

WERNERS 2006

Werners, B.: Grundlagen des Operations Research. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-79973-3.

WESTKÄMPER 2002

Westkämper, E.: Wandlungsfähigkeit: Herausforderungen und Lösungen im turbulenten Wettbewerb. In: Westkämper, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion. Stuttgart: Fraunhofer-IRB 2002, S. 17-46. ISBN: 3-8167-6128-3.

WESTKÄMPER ET AL. 2007

Westkämper, E.; Niemann, J.; Stolz, M.: Fertigungs- und Fabrikbetrieb. In: Grote, K.-H. et al. (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin: Springer 2007, S. S94-S114. ISBN: 978-3-540-49714-1.

WHITNEY 2004

Whitney, D. E.: Mechanical assemblies. New York: Oxford University Press 2004. ISBN: 0-19-515782-6.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit. Werkstattstechnik online 92 (2002) 4, S. 122-127.

WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2006

Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.: Verfügbarkeit von Montagesystemen. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Berlin: Springer 2006, S. 369-406. ISBN: 978-3-540-21413-7.

WIENDAHL ET AL. 2003

Wiendahl, H.-P.; Harms, T.; Heger, C. L.: Die Fabrik als strategisches Wettbewerbsinstrument. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003, S. 141-152. ISBN: 978-3-540-00594-0.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Kolakowski, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. Annals of the CIRP 56 (2007) 2, S. 783-809.

WIENDAHL ET AL. 2009

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. München: Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-22477-3.

WINKER 2010

Winker, P.: Empirische Wirtschaftsforschung und Ökonometrie. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-14506-3.

WÖHE & DÖRING 2002

Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 21. Aufl. München: Vahlen 2002. ISBN: 3-800-62865-1.

WÖHE & DÖRING 2010

Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 24. Aufl. München: Vahlen 2010. ISBN: 9783-800-63795-9.

ZADEH 1965

Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets. Information and Control 8 (1965), S. 338-353.

ZAEH ET AL. 2005

Zaeh, M. F.; Moeller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor’s New Clothes or Key Factor for Future Success? In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München, 22.-23. September 2005. München: Herbert Utz 2005, S. 3-10. ISBN: 3-8316-0540-8.

ZAEH ET AL. 2006

Zaeh, M. F.; Werner, J.; Prasch, M.: Changeable Means of Production. In: Westkämper, E. (Hrsg.): First CIRP International Seminar on Assembly Systems. Stuttgart: Fraunhofer-IRB 2006, S. 33-38. ISBN: 978-3-8167-7213-2.

ZAEH ET AL. 2009

Zaeh, M. F.; Reinhart, G.; Pohl, J.; Schindler, S.; Karl, F.; Rimpau, C.: Modelling, Anticipating and Managing Cyclic Behaviour in Industry. In: Zäh, M. F. (Hrsg.): 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). München, 5.-7. Oktober 2009. München: Herbert Utz 2009, S. 16-43. ISBN: 978-3-8316-0933-8.

ZAEH ET AL. 2010A

Zaeh, M. F.; Reinhart, G.; Karl, F.; Schindler, S.; Pohl, J.; Rimpau, C.: Cyclic influences within the production resource planning process. *Production Engineering, Research & Development* 4 (2010) 4, S. 309-317.

ZAEH ET AL. 2010B

Zaeh, M. F.; Reinhart, G.; Lindemann, U.; Karl, F.; Biedermann, W.: Evaluating the Innovation Ability of Manufacturing Resources. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 72 (2010), S. 142-148.

ZÄH ET AL. 2010A

Zäh, M. F.; Reinhart, G.; Karl, F.: Zyklensorientierte Montagebetriebsmittelbewertung. *Werkstattstechnik online* 100 (2010) 9, S. 653-658.

ZÄH ET AL. 2010B

Zäh, M. F.; Reinhart, G.; Karl, F.; Schindler, S.; Pohl, J.; Rimpau, C.: Zyklensorientierte Betriebsmittelgestaltung. *Werkstattstechnik online* 100 (2010) 5, S. 434-439.

ZANGEMEISTER 1973

Zangemeister, C.: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik*. 3. Aufl. München: Wittemann 1973.

ZEBOLD 1996

Zehbold, C.: *Lebenszykluskostenrechnung*. Wiesbaden: Gabler 1996. ISBN: 3-409-12153-6.

ZHANG ET AL. 2006

Zhang, G.; Liu, R.; Gong, L.; Huang, Q.: An Analytical Comparison on Cost and Performance among DMS, AMS, FMS and RMS. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable manufacturing systems. Berlin: Springer 2006, S. 659-673. ISBN: 3-540-29391-4.

ZWEHL 1993

Zwehl, W. von: Entscheidungsegeln. (Hrsg.): Handwörterbuch der Betriebswirtschaft. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1993, S. 920-929. ISBN: 3-7910-8033-4.

Anhang

A1 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) in den Jahren 2009 bis 2013 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die in Tabelle 12 aufgeführten studentischen Arbeiten. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende/r (Abgabe)	Studienarbeit
Fechter, W. (Dezember 2010)	Entwicklung eines Softwaretools zur Beschreibung von Adaptionen an Montagebetriebsmitteln, eingeflossen in Kapitel 7
Günther, C. (Dezember 2012)	Kennzahlensystem zur Bewertung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln, eingeflossen in Abschnitt 5.4 und Abschnitt 6.2.3
Jasper, A. (April 2013)	Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten, eingeflossen in Abschnitt 5.4.2
Knollmüller, P. (Mai 2012)	Modell zur Prognose zyklischer Einflussfaktoren, eingeflossen in Abschnitt 5.1 und Abschnitt 6.3.2
Kong, F. (September 2011)	Weiterentwicklung einer Methodik zur Planung von Rekonfigurationen an Montagebetriebsmitteln, eingeflossen in Abschnitt 5.1
Mörike, C. (Juni 2012)	Quantitatives Beschreibungsmodell für Betriebsmittel, eingeflossen in Abschnitt 5.1
Manteuffel, D. (September 2011)	Erstellung eines Kennzahlensystems zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit von Betriebsmitteln, eingeflossen in Abschnitt 5.4, Abschnitt 5.5, Abschnitt 6.2.3 und Abschnitt 8.1
Schupeck, M. (Januar 2011)	Erstellung eines Klassifikationssystems zur Beschreibung von Betriebsmitteln in der Montage, eingeflossen in Abschnitt 5.1
Sieferlinger, C. (Oktober 2011)	Bewertungsmethoden für Betriebsmittel, eingeflossen in Abschnitt 2.1
Strelkow, B. (August 2010)	Strukturmodellierung und Strukturanalyse zur Bestimmung der Anpassungsfähigkeit einer Produktionsanlage, eingeflossen in Abschnitt 5.2 und Abschnitt 8.2
Strelkow, B. (März 2011)	Studie über zyklische Einflussfaktoren auf den Produktionsplanungsprozess, eingeflossen in Abschnitt 1.2 und Abschnitt 5.1
Zscheje, T. (Mai 2012)	Erarbeitung einer Methode zur Planung von Betriebsmittelrekonfigurationen, eingeflossen in Abschnitt 6.5.2

Tabelle 12: Im Rahmen dieser Dissertation betreute Studienarbeiten

A2 Anforderungen an Betriebsmittel sowie Eigenschaften und Fähigkeiten

Dieser Abschnitt stellt die 25 Kriterien dar, die zur Beschreibung der Anforderungen an Betriebsmittel bzw. der Eigenschaften und der Fähigkeiten von Betriebsmitteln herangezogen werden. Sie wurden durch Literaturrecherchen bzw. Untersuchungen von Betriebsmitteln ermittelt. Sowohl das hierauf basierende Betriebsmittelanforderungs- als auch das Betriebsmitteleigenschaftsmodell sind offen gestaltet, so dass neue Kriterien problemlos hinzugefügt werden können. Generell sind die benötigten Kriterien mit deren Ausprägungen bei Anwendung der Methodik jeweils individuell auszuwählen.

Zur Spezifizierung der Kriterien werden hier potenzielle Einflussfaktoren (siehe Tabelle 2) genannt, die auf die Anforderungen wirken können. Zwischen den einzelnen Einflussfaktoren existieren komplexe Wechselwirkungen und sie wirken jeweils auf unterschiedliche bzw. mehrere Anforderungen. Die hier angegebene Zuordnung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Die Ausprägungen der Kriterien sind quantitativ oder qualitativ. Zur Beschreibung qualitativer Kriterien eignet sich die Definition von Kategorien (siehe bspw. DRABOW 2006, HEGER 2007). Diese Kategorien sind unmissverständlich festzulegen, um Rekonfigurationsbedarfe eindeutig zu identifizieren. Jedoch kann hierbei die Komplexität der Modelle sehr groß werden, da teilweise eine Vielzahl von Kategorien zu definieren sind (z. B. zur Beschreibung komplexer Produktgeometrien). In solchen Fällen können qualitative Kriterien textuell oder visuell (z. B. mit technischen Zeichnungen des Produkts) erläutert werden, um die Komplexität der Modelle zu begrenzen. Dabei steigt jedoch wiederum der Aufwand beim Abgleich von Betriebsmittelanforderungs- und Betriebsmitteleigenschaftsmodell. Generell sind daher die Ausprägungen, insbesondere der qualitativen Kriterien, individuell bei jedem Anwenden der Methodik mit dem benötigten Detaillierungsgrad zu definieren. Daher handelt es sich bei den nachfolgend angegebenen Ausprägungen um Vorschläge.

Die Kriterien bzw. die zur Beschreibung der Kriterien benötigten Daten sind Eingangsgrößen für die Methodik. Daher werden auch Hinweise gegeben wo die Kriterien bzw. die Daten für die Eigenschaften ermittelt werden können bzw. wer die Anforderungen an das Betriebsmittel stellt. Dies hängt jedoch stark von der Größe, Branche, Organisationsstruktur etc. des Unternehmens ab. Demzufolge erheben die Listen wiederum keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Ausschuss

Das quantitative Kriterium Ausschuss beschreibt den Anteil der Schlechtteile im Verhältnis zu allen produzierten Teilen. Schlechtteile sind die Teile, die die Qualitätsanforderungen nicht erfüllen.

Einflussfaktoren, z. B.

- Produktionstechnologien (Technologiezyklus, siehe z. B. OLSCHOWY 1990, HÖFT 1992, TIEFEL 2007, SCHUH & KLAPPERT 2011, Technologiereife, siehe z. B. REINHART & SCHINDLER 2011, REINHART ET AL. 2011B)
- Produktionskosten (siehe z. B. HEGER 2007)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)
- Qualifikation der Mitarbeiter (Mitarbeiterzyklus, siehe z. B. NEBL 2007, JUNG 2008)

Ausprägung

- [ppm]
- [%]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- ERP-System
- Pflichtenhefte
- Produktentwicklung
- Produktionsplanung

Automatisierungsgrad

Das quantitative Kriterium Automatisierungsgrad stellt den Anteil automatisiert durchgeführter Operationen bezogen auf alle Operationen dar.

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Altersstruktur der Mitarbeiter (Leistungswandlung bzw. Mitarbeiterzyklus, siehe z. B. STEMPER 2001, STRASSER 2007, STRASSER 1993)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)
- Qualifikation der Mitarbeiter (Mitarbeiterzyklus, siehe z. B. NEBL 2007, JUNG 2008)

Ausprägung, z. B.

- [%] (siehe FELDMANN 2004)

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Personalabteilung
- Produktionsplanung

Betriebsmittelabmaße

Die Betriebsmittelabmaße werden quantitativ über die Länge, Breite und Höhe des Betriebsmittels beschrieben (HEGER 2007).

Einflussfaktoren, z. B.

- Fertigungslayout und -reihenfolge (Produktionsstrukturzyklus, siehe z. B. REINHART & POHL 2011)
- Lebensdauer der Fabrikgebäude (Fabrikgebäudelebenszyklus, siehe z. B. SCHENK & WIRTH 2004)

Ausprägung, z. B.

- [mm]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Pflichtenhefte
- Produktionsstrukturplanung

Betriebsmittelmasse

Die Betriebsmittelmasse wird als quantitatives Kriterium herangezogen, um hiermit Rückschlüsse auf die Flächenlast zu ziehen. Die zulässige Flächenlast ist begrenzt und kann dem Gebäudeplan entnommen werden (SCHENK & WIRTH 2004).

Einflussfaktoren, z. B.

- Fertigungslayout und -reihenfolge (Produktionsstrukturzyklus, siehe z. B. REINHART & POHL 2011)
- Lebensdauer der Fabrikgebäude (Fabrikgebäudelebenszyklus, siehe z. B. SCHENK & WIRTH 2004)

Ausprägung

- [kg]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Gebäudeplan (SCHENK & WIRTH 2004)
- Pflichtenhefte
- Produktionsstrukturplanung

Emissionen

Das Kriterium Emissionen bildet die Abgaben bzw. die erlaubten Abgaben von z. B. Stoffen, Lärm oder Vibrationen des Betriebsmittels an seine Umwelt ab. Einzelne Ausprägungskategorien können quantitativ charakterisiert werden.

Einflussfaktoren, z. B.

- Altersstruktur der Mitarbeiter (Leistungswandlung bzw. Mitarbeiterzyklus, siehe z. B. STEMPER 2001, STRASSER 2007, STRASSER 1993)
- Lebensdauer der Fabrikgebäude (Fabrikgebäudelebenszyklus, siehe z. B. SCHENK & WIRTH 2004)
- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)

Ausprägungen, z. B.

- Schalldruckpegel [dB]
- Vibrationen [Hz]
- Schadstoffe [-]
- Schadstoffkonzentration [%, ppm]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Arbeitsschutz
- Betriebsrat
- Pflichtenhefte
- Produktionsstrukturplanung

Ergonomische Belastung

Insbesondere auf Grund des demographischen Wandels (ABELE & REINHART 2011) wird die ergonomische Belastung für den Mitarbeiter in der Produktion

immer wichtiger. Dieses qualitative Kriterium kann durch unterschiedliche Profilvergleichsverfahren (z. B. Anforderungs- und Belastbarkeits-Analyse, siehe PRASCH 2011) charakterisiert werden. Profilvergleichsverfahren stellen die ergonomischen Anforderungen von Mitarbeitern an Betriebsmittel den Eigenschaften gegenüber. Dazu werden üblicherweise mehrere Ausprägungen (erforderliche Körpergröße, Belastung des Nackens etc.) herangezogen.

Einflussfaktoren, z. B.

- Altersstruktur der Mitarbeiter (Leistungswandlung bzw. Mitarbeiterzyklus, siehe z. B. STEMPER 2001, STRASSER 2007, STRASSER 1993)
- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Produktionskosten (siehe z. B. HEGER 2007)
- Zeiten (z. B. Rüst-/Durchlaufzeiten, siehe z. B. ABELE & REINHART 2011)

Ausprägung, z. B.

- Kriterien der Anforderungs- und Belastbarkeits-Analyse (Anforderungs- und Belastbarkeits-Analyse, siehe PRASCH 2011)

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Arbeitsschutz
- Betriebsrat
- Personalabteilung
- Pflichtenhefte
- Produktionsplanung

Informationstechnik

Die qualitative Kategorie Informationstechnik umfasst die Informations- und Datenverarbeitung im Betriebsmittel bzw. den Informationsaustausch mit der Umgebung, wobei die Hard- und die Software eingeschlossen sind. Auf Grund sehr kurzer Innovationszyklen in diesem Bereich stellen die genannten Kategorien der Ausprägungen eine Momentaufnahme bzw. einen Ausschnitt dar.

Einflussfaktoren, z. B.

- Fertigungslayout und -reihenfolge (Produktionsstrukturzyklus, siehe z. B. REINHART & POHL 2011)
- Flexibilität (z. B. Stückzahl- und Variantenflexibilität, siehe z. B. NEBL 2007, WIENDAHL ET AL. 2007)

- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)
- Unternehmensentwicklung (Unternehmenslebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Zeiten (z. B. Rüst-/Durchlaufzeiten, siehe z. B. ABELE & REINHART 2011)

Ausprägungen, z. B.

- Anbindung an Informationstechnologie durch Hard- und Softwareschnittstellen (z. B. Feldbus-Kommunikation mit bspw. PROFIBUS) [-]
- Datenformat der Steuerung [-]
- technische Ausstattung (z. B. Betriebsmittelmonitoring und Qualitätssicherung mittels Kamerasystemen, Produktionssteuerung mittels RFID (Identifikation mit elektromagnetischen Wellen, engl. radio-frequency identification)) [-]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Pflichtenhefte
- Produktionsplanung
- Produktionsstrukturplanung (ZAEH ET AL. 2010A)

Materialien

Der Produktwerkstoff stellt eine weitere wichtige Kategorie dar (PREUSSE 2008), die über die Materialien dargestellt wird. Da sie qualitativ ist, wird sie über Kategorien beschrieben, wobei unterschiedliche Möglichkeiten bestehen. Erstens können Werkstoffgruppen herangezogen werden (HORNBÖGEN ET AL. 2012), die bis zur chemischen Zusammensetzung detailliert werden können. Zweitens kann die Härte der Materialien verwendet werden (BERGER & KLOOS 2007). Eine dritte Möglichkeit stellt die über den Elastizitätsmodul beschreibbare Formstabilität dar (LACKMANN 2007). Dabei sind auch Kombinationen denkbar.

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Branchenentwicklung (Branchenlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Konjunkturdaten (Konjunkturzyklus, siehe z. B. SCHUMPETER 1939, FÖRSTER 1981)
- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Produktionskosten (siehe z. B. HEGER 2007)

- Wettbewerb (siehe z. B. WESTKÄMPER 2002)
- Zeiten (z. B. Rüst-/Durchlaufzeiten, siehe z. B. ABELE & REINHART 2011)

Ausprägungen, z. B.

- Werkstoffgruppe (siehe HORNBOGEN ET AL. 2012)
 - metallische Stoffe
 - keramische Stoffe
 - polymere Stoffe (z. B. Duromere, Elastomere, Plastomere, Schäume)
 - Verbundwerkstoffe (z. B. Faserverstärkte Werkstoffe, Stahlbeton, Hartmetalle, Holz)
- Härte, z. B.
 - Vickershärte [HV] (siehe BERGER & KLOOS 2007)
 - Rockwellhärte [HR] (siehe BERGER & KLOOS 2007)
 - Brinellhärte [HBW] (siehe BERGER & KLOOS 2007)
- Elastizitätsmodul [N/mm²]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- ERP-System
- Produktentwicklung
- strategische Produktentwicklung (MÜLLER 2007)
- Stücklisten

Mean Time To Repair (MTTR)

Das Kriterium MTTR ist die mittlere Störungsdauer (SIHN & SPECHT 1996). Diese verlängert sich üblicherweise im Verlauf eines Betriebsmittellebenszyklus auf Grund von Alterungs- bzw. Verschleißausfällen (SIHN & SPECHT 1996).

Einflussfaktoren, z. B.

- Produktionstechnologien (Technologiezyklus, siehe z. B. OLSCHOWY 1990, HÖFT 1992, TIEFEL 2007, SCHUH & KLAPPERT 2011, Technologiereife, siehe z. B. REINHART & SCHINDLER 2011, REINHART ET AL. 2011B)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)

Ausprägung

- [s]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- ERP-System
- Pflichtenhefte
- Produktionsplanung

Mean Time Between Failures (MTBF)

Bei der MTBF handelt es sich um die mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen, die bedingt durch Alterungs- bzw. Verschleißausfälle im Verlauf eines Betriebsmittellebenszyklus üblicherweise abnimmt (SIHN & SPECHT 1996). Aus MTTR und MTBR lässt sich die Verfügbarkeit eines Betriebsmittels berechnen (SIHN & SPECHT 1996), die anstelle dieser beiden Kriterien angegeben werden kann.

Einflussfaktoren, z. B.

- Produktionstechnologien (Technologiezyklus, siehe z. B. OLSCHOWY 1990, HÖFT 1992, TIEFEL 2007, SCHUH & KLAPPERT 2011, Technologiereife, siehe z. B. REINHART & SCHINDLER 2011, REINHART ET AL. 2011B)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)

Ausprägung

- [s]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- ERP-System
- Pflichtenhefte
- Produktionsplanung

Medien

Betriebsmittel benötigen unterschiedliche Medien, um betrieben werden zu können. Die Medien werden oftmals vom Fabrikgebäude bzw. der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) zur Verfügung gestellt. Dabei müssen die Betriebsmittel mit den entsprechenden Anschlüssen ausgerüstet sein (MIESE 1976, PREUSSE 2008). Unter Medien fallen auch Hilfs- und Betriebsstoffe (LOUKMIDIS 2006), wobei eine Vielzahl unterschiedlicher Medien existiert. Es handelt sich um ein qualitatives Kriterium, wobei einzelne Kategorien mit quantitativen Angaben (z. B. Temperaturen) weiter spezifiziert werden können.

Einflussfaktoren, z. B.

- Lebensdauer der Fabrikgebäude (Fabrikgebäudelebenszyklus, siehe z. B. SCHENK & WIRTH 2004)
- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Produktionskosten (siehe z. B. HEGER 2007)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)

Ausprägungen, z. B.

- Absaugung [m³/h]
- Druckluft [bar, m³/h]
- elektrischer Strom [A]
- elektrische Spannung [V]
- Kühlschmierstoff [-]
- Prozessgase [Art, m³/h]
- Prozesskälte [°C]
- Prozesswärme [°C]
- Vakuum [mbar]
- Wasser [m³/h]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Gebäudeplan (SCHENK & WIRTH 2004)
- Pflichtenhefte
- Produktionsstrukturplanung

Mitarbeiteranzahl

Eine weitere wichtige Betriebsmitteleigenschaft ist die benötigte bzw. zur Verfügung stehende Mitarbeiteranzahl (EVERSHEIM 1997). Da es auch möglich ist, dass ein Mitarbeiter mehrere Betriebsmittel betreut, muss dieses quantitative Kriterium nicht ganzzahlig sein.

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Flexibilität (z. B. Stückzahl- und Variantenflexibilität, siehe z. B. NEBL 2007, WIENDAHL ET AL. 2007)

- Konjunkturdaten (Konjunkturzyklus, siehe z. B. SCHUMPETER 1939, FÖRSTER 1981)
- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Produktionskosten (siehe z. B. HEGER 2007)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)
- Qualifikation der Mitarbeiter (Mitarbeiterzyklus, siehe z. B. NEBL 2007, JUNG 2008)
- Zeiten (z. B. Rüst-/Durchlaufzeiten, siehe z. B. ABELE & REINHART 2011)

Ausprägung

- [Stck.]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Personalabteilung
- Pflichtenhefte
- Produktionsplanung

Mitarbeiterqualifikation

Dieses qualitative Kriterium bildet die benötigten bzw. verfügbaren Mitarbeiterqualifikationen ab, die anhand der tariflichen Lohnklassen erläutert werden können (GUTENBERG 1979). Basierend hierauf sowie auf der Mitarbeiteranzahl lassen sich die Mitarbeiterkosten ermitteln, da für jede Qualifikationsgruppe spezifische Kosten anfallen.

Einflussfaktoren, z. B.

- Konjunkturdaten (Konjunkturzyklus, siehe z. B. SCHUMPETER 1939, FÖRSTER 1981)
- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Produktionstechnologien (Technologiezyklus, siehe z. B. OLSCHOWY 1990, HÖFT 1992, TIEFEL 2007, SCHUH & KLAPPERT 2011, Technologiereife, siehe z. B. REINHART & SCHINDLER 2011, REINHART ET AL. 2011B)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)
- Qualifikation der Mitarbeiter (Mitarbeiterzyklus, siehe z. B. NEBL 2007, JUNG 2008)

Ausprägung, z. B.

- Lohnklassen (z. B. ungelernter Arbeiter, Hilfsarbeiter, angelernter Arbeiter, Spezialarbeiter, Facharbeiter, Spezialfacharbeiter, qualifizierter Facharbeiter nach GUTENBERG (1979) oder Entgeltgruppe 1 bis 12 des Entgelttarifvertrags für die bayerische Metall- und Elektroindustrie (ERATV) nach IG METALL BEZIRK BAYERN (2008))

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Personalabteilung
- Pflichtenhefte
- Produktionsplanung

Mobilität

Das qualitative Kriterium Mobilität beschreibt den Aufwand, das Betriebsmittel von einem Standort zu einem anderen Standort zu transportieren und dort in einen betriebsbereiten Zustand zu bringen. Die Mobilität hängt von Faktoren ab, wie dem Transportgewicht, dem Raumprofil, dem Verbindungsgrad, der Transportierbarkeit, der Tragfähigkeit, den im Unternehmen verfügbaren Transportmitteln oder dem Installationsprozess (DRABOW 2006, HEGER 2007).

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Fertigungslayout und -reihenfolge (Produktionsstrukturzyklus, siehe z. B. REINHART & POHL 2011)
- Flexibilität (z. B. Stückzahl- und Variantenflexibilität, siehe z. B. NEBL 2007, WIENDAHL ET AL. 2007)

Ausprägung, z. B.

- hoch
Das Betriebsmittel kann ohne Aufwand und ohne den Einsatz zusätzlicher Transportmittel von einem Einsatzort zum nächsten transportiert werden, bspw. durch fest im Betriebsmittel integrierte Transportmittel (z. B. Rollen). Es ist nicht fest mit dem Hallenboden verbunden. Ein aufwandsarmer Installationsprozess wird bspw. durch standardisierte Anschlüsse sichergestellt.

- mittel
Das Betriebsmittel kann durch den Einsatz zusätzlicher, im Unternehmen verfügbarer Transportmittel (z. B. Hallenkran, Gabelstapler) von einem Einsatzort zum nächsten transportiert werden. Hierfür ist es nicht zu zerlegen. Es kann mit dem Hallenboden fest verbunden sein (z. B. mittels Schraubverbindungen).
- gering
Das Betriebsmittel kann nicht als Ganzes von einem Einsatzort zum nächsten transportiert werden. Für den Transport sind oftmals unternehmensexterne Transportmittel notwendig, wobei es zumeist mit dem Hallenboden fest verbunden ist. Der Installationsprozess ist aufwändig, z. B. auf Grund nicht standardisierter Anschlüsse oder speziell benötigter Qualifikationen.

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Pflichtenhefte
- Produktionsstrukturplanung

Produktabmaße

Die fertigbare Produktgröße ist eine charakteristische Betriebsmitteleigenschaft (MIESE 1976). Diese wird durch die Produktabmaße (Länge, Breite, Höhe) der fertigen bzw. handhabbaren Produkte angegeben. Dabei handelt es sich um ein quantitatives Kriterium. Teilweise ist eine weitere Differenzierung zwischen handhab-, bereitstell-, speicher- und bearbeitbaren Produkten notwendig.

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Branchenentwicklung (Branchenlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Konjunkturdaten (Konjunkturzyklus, siehe z. B. SCHUMPETER 1939, FÖRSTER 1981)
- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Unternehmensentwicklung (Unternehmenslebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Wettbewerb (siehe z. B. WESTKÄMPER 2002)

Ausprägung

- [mm]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- ERP-System
- Produktentwicklung
- strategische Produktentwicklung (MÜLLER 2007)
- Stücklisten

Produktgeometrien

Eine weitere Kategorie ist die Produktgeometrie, die qualitativ zu skizzieren ist. Sie sollte möglichst kategoriell beschrieben werden. Jedoch können komplexe Produktgeometrien sowie ein großes Produktspektrum dazu führen, dass eine Vielzahl von Kategorien zu definieren ist. Demzufolge sollte dann, um die Komplexität der Modelle zu beschränken, eine textuelle oder visuelle Beschreibung vorgenommen werden (z. B. mit technischen Zeichnungen). Durch den Abgleich von Anforderungen und Eigenschaften steigt jedoch der Aufwand zur Ermittlung von Rekonfigurationsbedarfen. Die Ausprägungen dieser Kategorie sind stets unternehmensspezifisch in Abhängigkeit des Produktspektrums festzulegen. Hierbei kann es wiederum nötig sein zwischen handhab-, bereitstell-, speicher- und bearbeitbaren Produkten zu differenzieren.

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Branchenentwicklung (Branchenlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Konjunkturdaten (Konjunkturzyklus, siehe z. B. SCHUMPETER 1939, FÖRSTER 1981)
- Unternehmensentwicklung (Unternehmenslebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Wettbewerb (siehe z. B. WESTKÄMPER 2002)

Ausprägung, z. B.

- kategoriell, z. B.
 - einfach
Einfache Produktgeometrien umfassen Produkte mit einfachen, geraden Oberflächen ohne Hinterschneidungen.

- mittel
Produkte mit einfachen konvexen und konkaven Oberflächen ohne Hinterschneidungen weisen mittlere Produktgeometrien auf.
- komplex
Komplexe Produkte haben Produktgeometrien mit konvexen und konkaven Oberflächen sowie Hinterschneidungen.
- Beschreibung
 - textuell
 - visuell (z. B. mit technischen Zeichnungen vom Produkt)

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Produktentwicklung
- strategische Produktentwicklung (MÜLLER 2007)
- technische Zeichnungen

Produktionskosten

Das quantitative Kriterium Produktionskosten stellt die Einsatzkosten für das Betriebsmittel dar. Es kann über den Maschinenstundensatz charakterisiert werden (WESTKÄMPER ET AL. 2007). Dabei sind die anfallenden Produktionskosten lediglich abhängig von der Produktionszeit und unabhängig von einzelnen Produkten. Variieren die Produktionskosten zwischen unterschiedlichen Produkten stark und können diese Unterschiede nicht auf die Produktionszeiten zurückgeführt werden, bietet es sich an für jedes Produkt spezifische Produktionskosten (GUTENBERG 1979) zu quantifizieren und keinen produktunabhängigen Maschinenstundensatz heranzuziehen.

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Altersstruktur der Mitarbeiter (Leistungswandlung bzw. Mitarbeiterzyklus, siehe z. B. STEMPER 2001, STRASSER 2007, STRASSER 1993)
- Fertigungslayout und -reihenfolge (Produktionsstrukturzyklus, siehe z. B. REINHART & POHL 2011)
- Produktionskosten (siehe z. B. HEGER 2007)
- Produktionstechnologien (Technologiezyklus, siehe z. B. OLSCHOWY 1990, HÖFT 1992, TIEFEL 2007, SCHUH & KLAPPERT 2011, Technologiereife, siehe z. B. REINHART & SCHINDLER 2011, REINHART ET AL. 2011B)

- Qualifikation der Mitarbeiter (Mitarbeiterzyklus, siehe z. B. NEBL 2007, JUNG 2008)
- Zeiten (z. B. Rüst-/Durchlaufzeiten, siehe z. B. ABELE & REINHART 2011)

Ausprägungen, z. B.

- Kosten pro Stück [€/Stck.]
- Maschinenstundensatz [€/h] (WESTKÄMPER ET AL. 2007)

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- ERP-System
- Kosten für Betriebs- und Hilfsstoffe
- Pflichtenhefte
- Produktionsplanung
- Produktentwicklung

Produktionsparameter

Auch Produktionsparameter, wie z. B. die Oberflächeneigenschaft bzw. -qualität (EVERSHEIM 1996) oder Prozesskräfte, bilden eine Kategorie. Die Beschreibung erfolgt jeweils quantitativ.

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Branchenentwicklung (Branchenlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Unternehmensentwicklung (Unternehmenslebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Wettbewerb (siehe z. B. WESTKÄMPER 2002)

Ausprägungen, z. B.

- Oberflächenqualität:
 - Mittenrauhwert R_a [μm] (CZICHOS & DAUM 2007)
 - gemittelte Rauhtiefe R_z [μm] (CZICHOS & DAUM 2007)
- Prozesskräfte [N]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Produktentwicklung
- Produktionsplanung
- technische Zeichnungen

Produktionstechnologien

Diese qualitative Kategorie gibt die Produktionsverfahren wieder, die das Betriebsmittel durchführt bzw. die von ihm gefordert werden. Hierfür wird auf die DIN 8580 zurückgegriffen, wobei die Verfahren noch detaillierter charakterisiert werden können.

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Branchenentwicklung (Branchenlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Produktionskosten (siehe z. B. HEGER 2007)
- Produktionstechnologien (Technologiezyklus, siehe z. B. OLSCHOWY 1990, HÖFT 1992, TIEFEL 2007, SCHUH & KLAPPERT 2011, Technologiereife, siehe z. B. REINHART & SCHINDLER 2011, REINHART ET AL. 2011B)
- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Unternehmensentwicklung (Unternehmenslebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Wettbewerb (siehe z. B. WESTKÄMPER 2002)

Ausprägung, z. B.

- Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [-]
- Handhabungsfunktionen nach VDI 2860 [-]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Pflichtenhefte
- Produktentwicklung (ZAEH ET AL. 2010A)
- Technologieplanung (ZAEH ET AL. 2010A)

Produktmasse

Bei der produzier- bzw. handhabbaren Produktmasse handelt es sich um ein quantitatives Kriterium.

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Branchenentwicklung (Branchenlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)

- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Produktionstechnologien (Technologiezyklus, siehe z. B. OLSCHOWY 1990, HÖFT 1992, TIEFEL 2007, SCHUH & KLAPPERT 2011, Technologiereife, siehe z. B. REINHART & SCHINDLER 2011, REINHART ET AL. 2011B)
- Unternehmensentwicklung (Unternehmenslebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Wettbewerb (siehe z. B. WESTKÄMPER 2002)

Ausprägung

- [kg]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- ERP-System
- Produktentwicklung
- strategische Produktentwicklung (MÜLLER 2007)
- Stücklisten

Rüstzeit

Die Rüstzeit stellen ein quantitatives Kriterium dar (VDI 1983), das produktspezifisch darzustellen ist.

Einflussfaktoren, z. B.

- Produktionskosten (siehe z. B. HEGER 2007)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)
- Zeiten (z. B. Rüst-/Durchlaufzeiten, siehe z. B. ABELE & REINHART 2011)

Ausprägung

- [s]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- ERP-System
- Pflichtenhefte
- Produktionsplanung

Stückzahl

Insbesondere die Stückzahl ist wichtiges quantitatives Kriterium (WIENDAHL & HEGENSCHIEDT 2006), das produktspezifisch zu beschreiben ist.

Einflussfaktoren, z. B.

- Absatzzahlen (Produktlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992, BRANKAMP 1996)
- Branchenentwicklung (Branchenlebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)
- Konjunkturdaten (Konjunkturzyklus, siehe z. B. SCHUMPETER 1939, FÖRSTER 1981)
- Wettbewerb (siehe z. B. WESTKÄMPER 2002)

Ausprägung

- [Stck./h]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- ERP-System
- Pflichtenhefte
- Produktentwicklung
- Produktionsplanung
- Vertrieb

Umgebungsbedingungen

Ein weiteres Kriterium stellen die Umgebungsbedingung dar (PREUSSE 2008), die das Betriebsmittel fordert bzw. die von der Produktionsumgebung an das Betriebsmittel gestellt werden. Hierunter fallen bspw. die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit oder die Luftqualität.

Einflussfaktoren, z. B.

- Altersstruktur der Mitarbeiter (Leistungswandlung bzw. Mitarbeiterzyklus, siehe z. B. STEMPER 2001, STRASSER 2007, STRASSER 1993)
- Fertigungslayout und -reihenfolge (Produktionsstrukturzyklus, siehe z. B. REINHART & POHL 2011)
- Lebensdauer der Fabrikgebäude (Fabrikgebäudelebenszyklus, siehe z. B. SCHENK & WIRTH 2004)
- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Produktionstechnologien (Technologiezyklus, siehe z. B. OLSCHOWY 1990, HÖFT 1992, TIEFEL 2007, SCHUH & KLAPPERT 2011, Technologiereife, siehe z. B. REINHART & SCHINDLER 2011, REINHART ET AL. 2011B)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)

Ausprägungen, z. B.

- Raumtemperatur [°C]
- Luftfeuchtigkeit [%]
- Luftqualität [Reinraumklassen nach DIN 14644-1]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Arbeitsschutz
- Betriebsrat
- Pflichtenhefte
- Produktionsstrukturplanung

Verbindungsgrad

Die Verbindung des Betriebsmittels mit dem Hallenboden ist ein qualitatives Kriterium, das bspw. von den Vibrationen, den bewegten Massen oder auch den Prozesskräften des Betriebsmittels abhängig ist. So stellen große Pressen oder Transferstraßen durch benötigte Fundamentierungen andere Anforderungen an die Verbindung mit dem Hallenboden als einfache, manuelle Montagearbeitsplätze.

Einflussfaktoren, z. B.

- Fertigungslayout und -reihenfolge (Produktionsstrukturzyklus, siehe z. B. REINHART & POHL 2011)
- Produktionstechnologien (Technologiezyklus, siehe z. B. OLSCHOWY 1990, HÖFT 1992, TIEFEL 2007, SCHUH & KLAPPERT 2011, Technologiereife, siehe z. B. REINHART & SCHINDLER 2011, REINHART ET AL. 2011B)
- Lebensdauer der Fabrikgebäude (Fabrikgebäudelebenszyklus, siehe z. B. SCHENK & WIRTH 2004)
- politische Restriktionen (legislative Zyklen, siehe z. B. JANN 1981, JANN & WEGRICH 2003, WESTKÄMPER 2002)
- Prozesssicherheit und -stabilität (siehe z. B. HEGER 2007)

Ausprägung, z. B.

- Fundament (HEGER 2007)
- Schweißverbindung o. Ä. (HEGER 2007)
- Schraubverbindung o. Ä. (HEGER 2007)
- Keine Verbindung (HEGER 2007)

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- Betriebsdatenblätter für Betriebsmittel
- Pflichtenhefte
- Produktionsstrukturplanung

Wartungskosten

Die Wartungskosten beschreiben die Kosten zum Erhalt des ursprünglichen Betriebsmittelzustands (RASCH 2000). Diese steigen üblicherweise im Verlauf eines Betriebsmittellebenszyklus auf Grund von Alterungs- bzw. Verschleißausfällen (SIHN & SPECHT 1996)

Einflussfaktoren, z. B.

- Lebensdauer der Fabrikgebäude (Fabrikgebäudelebenszyklus, siehe z. B. SCHENK & WIRTH 2004)
- Produktionskosten (siehe z. B. HEGER 2007)
- Produktionstechnologien (Technologiezyklus, siehe z. B. OLSCHOWY 1990, HÖFT 1992, TIEFEL 2007, SCHUH & KLAPPERT 2011, Technologiereife, siehe z. B. REINHART & SCHINDLER 2011, REINHART ET AL. 2011B)
- Unternehmensentwicklung (Unternehmenslebenszyklus, siehe z. B. HÖFT 1992)

Ausprägung

- [€]

Datenherkunft der Anforderungen, Eigenschaften sowie Fähigkeiten, z. B.

- Anlagenstammdaten (RASCH 2000, NEBL 2006)
- ERP-System
- Instandhaltung
- Produktionsplanung

A3 Kennzahlen zur strukturellen Bewertung von Alternativen

Bei Berechnung der Strukturkennzahlen in den Abschnitten A3 und A6 wird die Gewichtung der Abhängigkeiten zwischen den Bauteilen berücksichtigt. Bestehen zwischen zwei Bauteilen zwei oder mehrere unterschiedliche Abhängigkeiten, wird der Gewichtungsfaktor mit dem höchsten Absolutbetrag herangezogen.

Anzahl der Adaptionen

Mit der Kennzahl Anzahl der Adaptionen ($AnzAdapt$) wird ausgedrückt wie viele Adaptionen durchzuführen sind. Hierfür wird die Anzahl der Knoten im Rekonfigurationsgraphen gezählt (siehe Formel (2)). Hierbei können Bauteile mehrfach gezählt werden, wenn sie wiederholt zu adaptieren sind, also im Rekonfigurationsgraphen mehrfach auftreten.

$$AnzAdapt = AnzKN_{Rekonfigurationsgraph} \quad (2)$$

$AnzAdapt$ Anzahl Adaptionen

$AnzKN_{Rekonfigurationsgraph}$ Anzahl Knoten im Rekonfigurationsgraph (ohne Anforderung)

Anzahl der Abhängigkeiten

Die Kennzahl Anzahl der Abhängigkeiten ($AnzA$) wird ermittelt, um darzustellen wie viele Beziehungen zwischen den einzelnen Adaptionen bestehen (siehe Formel (3)). Dazu wird die Anzahl der Pfeile zwischen unterschiedlichen Knoten berechnet, wobei ausschließlich Bauteile betrachtet werden. Je höher der Wert dieser Kennzahl ist, desto ausgeprägter sind die Wechselwirkungen. Somit ist auch die Rekonfigurationsalternative tendenziell komplexer. Die Abhängigkeiten fließen hierbei gewichtet in die Bewertung ein.

$$AnzA = \sum A_{Rekonfigurationsgraph, gew.} \quad (3)$$

$AnzA$ Anzahl Abhängigkeiten

$A_{Rekonfigurationsgraph, gew}$ gewichtete Abhängigkeit im Rekonfigurationsgraph,
 $A_{Rekonfigurationsgraph, gew} \in \{1; 2; 3\}$

Anzahl zu adaptierender Bauteile

Da die Anzahl der Adaptionen von der Anzahl der anzupassenden Bauteile auf Grund von mehreren Adaptionen an einem Bauteil abweichen kann, wird die Kennzahl Anzahl der zu adaptierenden Bauteile ($AnzBT_{adapt}$) berechnet. Hiermit wird dargelegt wie vielen unterschiedliche Bauteile bei einer Rekonfiguration betroffen sind (siehe Formel (4)).

$$AnzBT_{adapt} = AnzAdapt - \sum_{BT_j} (n_{BT_j} - 1) \quad (4)$$

$AnzAdapt$	Anzahl Adaptionen
$AnzBT_{adapt}$	Anzahl zu adaptierender Bauteile
j	Zählvariable für Bauteile, $j \in \mathbb{N}$, $j \geq 1$; $j \leq AnzBT$
n_{BT_j}	Anzahl Adaptionen an Bauteil j , $n \in \mathbb{N}$

Reichweite

Die Reichweite (Reichw) stellt eine Relationskennzahl dar, um aufzuzeigen wie hoch der Anteil zu adaptierender Bauteile an der Anzahl der gesamten Betriebsmittelbauteile ist (siehe Formel (5)). Dabei handelt es sich um die Bauteile, aus denen das Betriebsmittel vor der Rekonfiguration bestand sowie die neu hinzugekommenen Bauteile.

$$Reichw = \frac{AnzBT_{adapt}}{AnzBT + AnzBT_{hinzu}} \quad (5)$$

$AnzBT$	Anzahl Bauteile im Betriebsmittel vor Rekonfiguration
$AnzBT_{adapt}$	Anzahl der zu adaptierenden Bauteile
$AnzBT_{hinzu}$	Anzahl bei Rekonfiguration hinzugefügter Bauteile
$Reichw$	Reichweite

A4 Kostengruppen zur betriebswirtschaftlichen Bewertung

Mitarbeiterkosten

Mitarbeiterkosten (K_{Ma}) sind die Kosten, die durch Lohnkosten während Adaptionsprozessen an Betriebsmittelbauteilen hervorgerufen werden (siehe Formel (6)). Dabei handelt es sich bspw. um Kosten, die entstehen wenn ein Mitarbeiter ein Bauteil austauscht oder ein Programm der Anlagensteuerung neu programmiert. Die Mitarbeiterkosten setzen sich zusammen aus der Dauer der Tätigkeit, dem Mitarbeiterstundensatz, den Lohnnebenkosten sowie der benötigten Mitarbeiteranzahl (BRIEL 2002, GÖTZE 2010). Der Mitarbeiterstundensatz kann bspw., abhängig von der geforderten Qualifikation, aus Rahmentarifverträgen abgeleitet werden (z. B. ERA-TV, siehe IG METALL BEZIRK BAYERN 2008).

$$K_{Ma} = \sum_{alleMa} (t_{Adapt} \cdot k_{Ma,h} \cdot k_{Lohnneb}) \quad (6)$$

K_{Ma}	Mitarbeiterkosten
t_{Adapt}	Adaptionsdauer
$k_{Ma,h}$	Mitarbeiterstundensatz
$k_{Lohnneb}$	Lohnnebenkostenzuschlagsatz
$alleMa$	alle beteiligten Mitarbeiter

Entwicklungskosten

Diese Kosten (K_{Ent}) umfassen die Entwicklungsaufwände, die im Rahmen von Rekonfigurationen anfallen, wie bspw. die Konstruktion von neuen Bauteilen (siehe Formel (7)). Sie ergeben sich aus den Kosten für die Mitarbeiter (siehe Formel (6)), den Materialkosten (z. B. für Prototypen, für Versuchsaufbauten) sowie Sonderkosten (z. B. für spezielle Softwareprogramme).

$$K_{Ent} = \sum_{alleMa,Ent} (t_{Ent} \cdot k_{Ma,h} \cdot k_{Lohnneb}) + K_{Mat,Ent} + K_{Sonder,Ent} \quad (7)$$

$alleMa,Ent$	alle beteiligten Entwicklungsmitarbeiter
K_{Ent}	Entwicklungskosten
t_{Ent}	Entwicklungsdauer
$k_{Ma,h}$	Mitarbeiterstundensatz
$k_{Lohnneb}$	Lohnnebenkostenzuschlagsatz
$K_{Mat,Ent}$	Materialkosten für Entwicklungstätigkeiten
$K_{Sonder,Ent}$	Entwicklungssonderkosten

Materialkosten

Die Materialkosten (K_{Mat}) für Bauteile setzen sich nach WÖHE & DÖRING (2010) aus den Materialeinzel- und den Materialgemeinkosten zusammen (siehe Formel (8)). Die Einzelkosten umfassen die direkt zurechenbaren Kosten (z. B. Materialpreise für Rohmaterialien). In den Gemeinkosten sind nicht direktzurechenbare Kosten, wie bspw. Aufwände für die Lagerhaltung oder den Einkauf der Materialien enthalten.

$$K_{Mat} = K_{MatEK} + K_{MatGK} \quad (8)$$

K_{Mat}	Materialkosten
K_{MatEK}	Materialeinzelkosten
K_{MatGK}	Materialgemeinkosten

Maschinenkosten

Die Maschinenkosten (K_{Masch}) (siehe Formel (9)) beinhalten die Kosten für Produktionsanlagen und weiteres Equipment, um die Adaptionen durchzuführen bzw. die benötigten Bauteile zu adaptieren. Sie berechnen sich aus der Dauer des Maschineneinsatzes mit dem entsprechenden Maschinenstundensatz (siehe WÖHE & DÖRING 2010, GÖTZE 2010).

$$K_{Masch} = \sum_{alleMasch} t_{Masch} \cdot k_{Masch,h} \quad (9)$$

$alleMasch$	alle benötigten Maschinen
K_{Masch}	Maschinenkosten
t_{Masch}	Bearbeitungszeit
$k_{Masch,h}$	Maschinenstundensatz

Stillstandkosten

Rekonfigurationen können zu Betriebsmittelstillständen führen. Hierbei entstehen Opportunitätskosten durch entgangene Gewinne, da Betriebsmittel während dieser Zeit nicht wertschöpfend eingesetzt werden können (siehe REDEKER 1969). Diese Stillstandkosten (K_{Still}) berechnen sich aus der Stillstandzeit sowie dem betriebsmittelspezifischen Maschinenstundensatz (siehe DERVISOPOULOS 2011, Formel (10)). Bei diesem Stundensatz kann es sich bspw. um die Wertschöpfung handeln, die in einem Zeitintervall auf dem Betriebsmittel erzielt wird. Zur Ermittlung der Stillstandzeit für das gesamte Betriebsmittel aus den Dauern der einzelnen Adaptionen (t_{Adapt}) lässt sich bspw. die Methode des Kritischen Pfades aus dem Projektmanagement heranziehen (siehe WERNERS 2006).

$$K_{Still} = t_{Still} \cdot k_{BM,h} \quad (10)$$

K_{Still}	Stillstandkosten
t_{Still}	Stillstandzeit
$k_{BM,h}$	Betriebsmittelstundensatz

Sonstige Rekonfigurationskosten

Neben den bereits genannten Kostengruppen, können im Rahmen von Rekonfigurationsprozessen noch weitere Kosten, wie Anlaufkosten, Schulungskosten, Fehlerkosten, Dokumentationskosten oder Fremdleistungskosten auftreten (K_{sonst}). Diese werden unter der Gruppe sonstige Rekonfigurationskosten zusammengefasst (siehe Formel (11)).

$$K_{sonst} = K_{Anlauf} + K_{Schulung} + K_{Fehler} + K_{Doku} + K_{Fremd} + \dots \quad (11)$$

K_{sonst}	sonstige Rekonfigurationskosten
K_{Anlauf}	Anlaufkosten
$K_{Schulung}$	Schulungskosten
K_{Fehler}	Fehlerkosten
K_{Doku}	Dokumentationskosten
K_{Fremd}	Fremdleistungskosten

A5 Kennzahl zur betriebswirtschaftlichen Alternativenbewertung

Gesamte Rekonfigurationskosten

Zur Berechnung der Kennzahl gesamte Rekonfigurationskosten ($K_{Rekonfig}$) werden zunächst die Rekonfigurationskosten kalkuliert (siehe Formel (12)), die sich zum Zeitpunkt der Rekonfigurationsdurchführung ergeben ($K_{Rekonfig,T}$). Dieser Zeitpunkt wird in Schritt 2 der Methodik ermittelt (siehe Abschnitt 6.4). Diese Kosten setzen sich zusammen aus den Mitarbeiter- ($K_{Ma,BTI}$), Entwicklungs- ($K_{Ent,BTI}$), Material- ($K_{Mat,BTI}$) und Maschinenkosten ($K_{Masch,BTI}$) zur Durchführung der Adaptionen an den einzelnen Bauteilen sowie den Entwicklungs- ($K_{Ent,T}$) und Stillstandkosten ($K_{Still,T}$) sowie den sonstigen Kosten ($K_{sonst,T}$), die durch die gesamte Rekonfiguration hervorgerufen werden. Die einzelnen Rekonfigurationskosten werden abgezinst und somit zu den gesamten Rekonfigurationskosten zusammengefasst.

$$K_{Rekonfig} = \frac{K_{Rekonfig,T}}{(1+i)^T} = \frac{\left(\sum_{l=1}^L (K_{Ma,BTl} + K_{Ent,BTl} + K_{Mat,BTl} + K_{Masch,BTl})\right)_T + K_{Ent,T} + K_{Still,T} + K_{sonst,T}}{(1+i)^T} \quad (12)$$

<i>BTl</i>	Bauteil l
$K_{Rekonfig}$	gesamte Rekonfigurationskosten
$K_{Rekonfig,T}$	Rekonfigurationskosten zu Zeitpunkt T
<i>l</i>	Zählvariable für die zu adaptierenden Bauteile, $l \in \mathbb{N}, l \leq \text{AnzBT}_{\text{adapt}}$
<i>T</i>	Periode, in der die Rekonfiguration durchgeführt wird
$K_{Ma,BTl}$	Mitarbeiterkosten für Bauteil l
$K_{Ent,BTl}$	Entwicklungskosten für Bauteil l
$K_{Mat,BTl}$	Materialkosten für Bauteil l
$K_{Masch,BTl}$	Maschinenkosten für Bauteil l
$K_{Ent,T}$	Entwicklungskosten für Gesamtrekonfiguration zu Zeitpunkt T
$K_{Still,T}$	Stillstandkosten zu Zeitpunkt t
$K_{sonst,T}$	sonstige Rekonfigurationskosten zu Zeitpunkt T
<i>i</i>	Zinssatz

A6 Kennzahlen zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit

Anzahl der Bauteile

Die Größe des Betriebsmittels wird mit der Kennzahl Anzahl der Bauteile (AnzBT) dargestellt. Mit dieser können außerdem andere Kennzahlen relativiert werden.

Abhängigkeiten pro Bauteil

Die Kennzahl Abhängigkeiten pro Bauteil ($\text{Anz}(A/BT)$) stellt die Komplexität der Betriebsmittelstruktur dar, indem die Anzahl aller Abhängigkeiten gezählt und ins Verhältnis zur Anzahl der Bauteile gesetzt werden (siehe Formel (13)). Die Komplexität nimmt tendenziell mit der Kennzahl zu, da die Bauteile dann stark vernetzt sind und somit Bauteiladaptionen bei Rekonfigurationen viele weitere Adaptionen hervorrufen können. Eine hohe Komplexität hemmt die Rekonfigurationsfähigkeit.

Da neben der Anzahl der Abhängigkeiten auch der Aufwand die Abhängigkeiten zu lösen und wiederherzustellen die Rekonfigurationsfähigkeit bestimmt, fließen die Gewichtungsfaktoren ein. Die Anzahl der gewichteten Abhängigkeiten stellt die Summe aller Einträge im Betriebsmittelstrukturmodell dar.

$$Anz(A/BT) = \frac{\sum A_{gew}}{AnzBT} \quad (13)$$

$Anz(A/BT)$ Abhängigkeiten pro Bauteil

A_{gew} gewichtete Abhängigkeit, $A_{gew} \in \{1; 2; 3\}$

$AnzBT$ Anzahl Bauteile im Betriebsmittel vor Rekonfiguration

Anzahl der Kreise

In einem Kreis sind Bauteile über weitere Bauteile und Abhängigkeiten mit sich selbst verbunden (siehe Abschnitt 3.3.2). In einem System mit einer großen Anzahl an Kreisen sind Rekonfigurationen oftmals schwierig, da die Kreise selbstverstärkende oder selbsthemmende Effekte hervorrufen können, wenn ein Bauteil adaptiert wird, die schwer zu kontrollieren sind (LINDEMANN ET AL. 2009). Daher stellt die Kennzahl Anzahl der Kreise ($AnzKR$) eine weitere Kennzahl zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit dar. Je größer die Anzahl der Kreise, desto niedriger ist die Rekonfigurationsfähigkeit.

Kreise mit zwei Elementen werden bei der Kennzahl nicht beachtet. Sie existieren bei ungerichteten Graphen nicht, da sie eine gewöhnliche Verbindung zwischen zwei Elementen darstellen. Darüber hinaus ergibt sich bei großen Modellen üblicherweise eine hohe Anzahl an langen Kreisen. Da die Selbstbeeinflussung der Elemente mit zunehmender Kreislänge tendenziell abnimmt (nicht alle Abhängigkeiten lösen eine Adaption aus), kann definiert werden, dass Kreise ab einer bestimmten Länge vernachlässigt werden.

Zur Berechnung der Kreise können unterschiedliche Algorithmen herangezogen werden (siehe bspw. TIERNAN 1970, WEINBLATT 1972, KUSIAK 19991, GLEISS ET AL. 2003, LINDEMANN ET AL. 2009). Hierfür stehen unterschiedliche Software-Werkzeuge zur Verfügung.⁵⁵

⁵⁵ Es können bspw. LOOME[®] (MIRSON ET AL. 2011) oder LATTIX[®] (WALDMAN & SANGAL 2011) herangezogen werden. Weitere Werkzeuge sind bei JACOB & VARGHESE (2011) genannt.

Modularität

Die Modularität ist einer von fünf Wandlungsbefähigern (siehe Abschnitt 1.3.1). Sie stellt eine grundlegende Eigenschaft der Betriebsmittelstruktur dar, um Rekonfigurationen zu ermöglichen, da sich Module einfach auswechseln lassen (WIENDAHL ET AL. 2007). Ein Modul beschreibt funktional zusammengehörige Bauteile. Da sich Module einfach austauschen lassen, weisen sie wenige, standardisierte Abhängigkeiten mit ihrer Umgebung auf, die einfach zu lösen und wiederherzustellen sind. Innerhalb eines Moduls existiert üblicherweise jedoch eine hohe Anzahl an Abhängigkeiten, die womöglich schwerer zu lösen und wiederherzustellen sind, und somit eine starke Vernetzung.

Zunächst sind zur Berechnung der Kennzahl Modularität (*Mod*) Module zu definieren. Für diese Module wird die Anzahl der internen, intramodularen Abhängigkeiten ins Verhältnis zu den externen, intermodularen Abhängigkeiten gesetzt. Die Abhängigkeiten werden wieder hinsichtlich des Aufwands sie zu lösen und wiederherzustellen gewichtet. Externe Abhängigkeiten sind Abhängigkeiten, die das betrachtete Modul mit der Umgebung (zu anderen Modulen) aufweist. Die Kennzahl Modularität stellt letztendlich das durchschnittliche Verhältnis von internen zu externen Abhängigkeiten dar (siehe Formel (14)). Ist dieser Wert größer als 1, weisen die Module in Summe mehr interne Abhängigkeiten als mit der Umgebung auf. Die Modularität und somit die Rekonfigurationsfähigkeit des Betriebsmittels nimmt mit zunehmendem Wert der Kennzahl zu, da damit der Aufwand Module auszutauschen prinzipiell abnimmt.

$$Mod = \frac{\sum_{\text{alleModule}} \frac{\sum A_{intern,gew}}{\sum A_{extern,gew}}}{AnzM} \quad (14)$$

<i>Mod</i>	Modularität
$A_{intern,gew}$	gewichtete intramodulare Abhängigkeit, $A_{intern,gew} \in \{1; 2; 3\}$
$A_{extern,gew}$	gewichtete intermodulare Abhängigkeit, $A_{extern,gew} \in \{1; 2; 3\}$
<i>AnzM</i>	Anzahl Module

A7 Kennzahlen zur Bauteilbewertung (anhand Betriebsmittelstrukturmodell)

Zur Bewertung von einzelnen Bauteilen (siehe auch Abschnitte A8 und A9) können Kennzahlen herangezogen werden, die sich auf das Betriebsmittelstrukturmodell sowie die Rekonfigurationsgraphen beziehen. Ferner können sie be-

triebswirtschaftlich beurteilt werden. Die Kennzahlen ermöglichen die Identifikation von kritischen bzw. rekonfigurationshemmenden Bauteilen.

Abhängigkeiten pro Bauteil

Die Kennzahl Abhängigkeiten pro Bauteil zählt die Anzahl der Abhängigkeiten, die jedes Bauteil im Betriebsmittelstrukturmodell mit weiteren Bauteilen aufweist. Sie wird mit $AnzA_{BT_j, gew}$ ausgedrückt, wobei die Abhängigkeiten gewichtet werden und BT_j für das j -te Bauteil im Betriebsmittelstrukturmodell steht ($j \in [1; AnzBT]$).

Kreise pro Bauteil

Analog zu den gesamten Kreisen in dem Betriebsmittelstrukturmodell (siehe Abschnitt A6) wird die Kennzahl Kreise pro Bauteil berechnet, um kritische Betriebsmittelbauteile zu identifizieren. Die beschreibt die Anzahl an Kreisen, in die das Bauteil eingebunden ist. Diese Kennzahl wird mit $AnzKR_{BT_j}$ dargestellt ($j \in [1; AnzBT]$). Sie kann wiederum mit den in Abschnitt A6 genannten Software-Werkzeugen ermittelt werden.

Relative Zentralität

Eine weitere Kennzahl zur Identifikation signifikanter Bauteile ist die relative Zentralität ($relZentr_{BT_j}$, mit $j \in [1; AnzBT]$). Sie ermittelt, ob ein Bauteil andere Bauteile miteinander verbindet und somit fest in die Betriebsmittelstruktur eingebunden ist (KREIMEYER 2010). Sie wird kalkuliert indem die Abhängigkeiten gezählt werden, die das betrachtete Bauteil zwischen weiteren Bauteilen sicherstellt (siehe KREIMEYER 2010). Es ist somit die Anzahl der kürzesten Pfade zwischen zwei Bauteilen, die über das betrachtete Bauteil führen.

A8 Kennzahlen zur Bauteilbewertung (anhand Rekonfigurationsgraph)

Direkte Aktivität

Die Kennzahl direkte Aktivität ($dirAkt_{BT_j}$, $j \in [1; AnzBT]$) zählt die Adaptionen, die von einem Bauteil direkt ausgelöst werden. Es sind somit die Abhängigkeiten auf der rechten Seite eines Bauteils im Rekonfigurationsgraphen (siehe Abbildung 19). Wird ein Bauteil an mehreren Stellen angepasst, sind die jeweiligen Abhängigkeiten zu addieren.

Indirekte Aktivität

Die Kennzahl indirekte Aktivität (indirAkt_{BTj} , $j \in [1; \text{AnzBT}]$) geht über die direkte Aktivität hinaus, da sie neben den direkt ausgelösten Adaptionen auch weitere, indirekt verursachte Adaptionen berücksichtigt.

Schneeball-Faktor

Der Abstand der direkt und indirekt hervorgerufenen Adaptionen wird durch die Kennzahl Schneeball-Faktor (SchneeFakt_{BTj} , mit $j \in [1; \text{AnzBT}]$) beachtet. Dieser ist die Summe über alle direkt und indirekt ausgelösten Adaptionen, die mit dem Kehrwert des Abstands von der initialen Adaption multipliziert werden (siehe KREIMEYER 2010).

A9 Kennzahlen zur Bauteilbewertung (betriebswirtschaftlich)

Gesamte Adaptionkosten

Die Kennzahl gesamte Adaptionkosten ($K_{\text{Adapt},BTj}$) stellt die Kosten dar, die für Adaptionen an spezifischen Bauteilen anfallen. Dabei werden direkt zurechenbare Kosten beachtet (Mitarbeiterkosten, Entwicklungskosten, Materialkosten, Maschinenkosten) und wie bei einer Kapitalwertbewertung (siehe Abschnitt 3.4.1) abgezinst (siehe (15)).

$$K_{\text{Adapt},BTj} = \frac{K_{\text{Adapt},BTj,T}}{(1+i)^T} = \frac{(K_{\text{Ma},BTj} + K_{\text{Ent},BTj} + K_{\text{Mat},BTj} + K_{\text{Masch},BTj})_T}{(1+i)^T} \quad (15)$$

$K_{\text{Adapt},BTj}$	gesamte Adaptionkosten für Bauteil j ($j \in [1; \text{AnzBT}]$)
$K_{\text{Adapt},BTj,T}$	Adaptionkosten für Bauteil j zu Zeitpunkt T
$K_{\text{Ma},BTj}$	Mitarbeiterkosten für Bauteil j
$K_{\text{Ent},BTj}$	Entwicklungskosten für Bauteil j
$K_{\text{Mat},BTj}$	Materialkosten für Bauteil j
$K_{\text{Masch},BTj}$	Maschinenkosten für Bauteil j
T	Periode, in der die Rekonfiguration durchgeführt wird
i	Zinssatz
j	Zählvariable für Bauteile, $j \in \mathbb{N}$, $j \geq 1$; $j \leq \text{AnzBT}$

Verursachte Kosten

Mit der Kennzahl verursachte Kosten (K_{verurs,BT_j}) werden neben den Adaptionskosten auch noch die Kosten berücksichtigt, die durch Adaptionen an weiteren Bauteilen hervorgerufen werden. Dabei handelt es sich um die Bauteile, die bei der indirekten Aktivität (indirAkt_{BT_j}) einbezogen werden (siehe Formel (16)).

$$K_{\text{verurs},BT_j} = K_{\text{Adapt},BT_j} + K_{\text{ind},BT_j} = \frac{K_{\text{Adapt},BT_j,T} + K_{\text{ind},BT_j,T}}{(I+i)^T} \quad (16)$$

K_{verurs,BT_j}	verursachte Kosten durch Bauteil j ($j \in [1; \text{AnzBT}]$)
K_{Adapt,BT_j}	gesamte Adaptionskosten für Bauteil j ($j \in [1; \text{AnzBT}]$)
K_{ind,BT_j}	durch Bauteil j indirekt ausgelöste Kosten, $j \in [1; \text{AnzBT}]$
$K_{\text{Adapt},BT_j,T}$	Adaptionskosten für Bauteil j zu Zeitpunkt T
$K_{\text{ind},BT_j,T}$	durch Bauteil j zu Zeitpunkt T indirekt ausgelöste Kosten, $j \in [1; \text{AnzBT}]$
T	Periode, in der die Rekonfiguration durchgeführt wird
i	Zinssatz
j	Zählvariable für Bauteile, $j \in \mathbb{N}$, $j \geq 1$; $j \leq \text{AnzBT}$

A10 Daten zur exemplarischen Anwendung aus Abschnitt 8.1

Die Berechnung der betriebswirtschaftlichen Kennzahlen der exemplarischen Anwendung (siehe Abschnitt 8.1) wird nachfolgend anhand von Alternative 1 (Anschlag verschieben, neue Greiferbacken) vorgestellt. Hierfür wird auf Screenshots des Excel-basierten Software-Werkzeugs (siehe Abschnitt 7) zurückgegriffen. Die Ermittlung der entsprechenden Kennzahlen für die fünf anderen Alternativen erfolgte analog.

Tabelle 13 zeigt die zu Grunde gelegten Daten. Die Werte für die Periode 0 wurden anhand von Erfahrungswerten abgeschätzt oder es wurde auf vorhandene Daten zurückgegriffen (z. B. IG METALL BEZIRK BAYERN 2008). Da die Rekonfiguration erst in Periode 1 durchgeführt werden soll, wurden Steigerungsraten angenommen (z. B. für steigende Energiepreise). Mit den Werten der Periode 1 wurden die Werte der Adaptionsliste ermittelt (siehe Tabelle 14). Da die Steigerungsraten einer Unschärfe unterliegen, erfolgte hier eine Modellierung von Unsicherheiten. Unsichere Parameter wurden mit der Standardnormalverteilung mit dem Software-Werkzeug Crystal-Ball[®] (siehe Abschnitte 3.6.1 und 7) abgebildet, wofür ein Maximalwert, ein Minimalwert sowie die Standardabweichung definiert wurden. Darüber hinaus auftretende Unsicherheiten wurden ebenfalls mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen einbezogen, indem sie mit den deterministi-

schen Werten der Adaptionliste multipliziert wurden (siehe Tabelle 15). Die Ergebnisse der deterministischen bzw. stochastischen Berechnung sind in Tabelle 9, Tabelle 16 sowie Abbildung 44 gezeigt.

	Periode 0	Periode 1
Zinssatz [-]	1,08	1,08
Min		1,05
Max		1,11
Standardabweichung		0,02
Facharbeiter [€/h]	22,70	23,61
Mitarbeiter Konstruktion [€/h]	26,56	27,62
Fachinformatiker [€/h]	32,16	33,45
Steigerungsrate		1,04
Min		1
Max		1,06
Standardabweichung		0,04
Maschinenstundensatz Säge [€/h]	20,00	20,60
Steigerungsrate		1,03
Min		1,02
Max		1,05
Standardabweichung		0,05
Maschinenstundensatz Bohrmaschine [€/h]	20,00	20,60
Steigerungsrate		1,03
Min		1,02
Max		1,05
Standardabweichung		0,05
Maschinenstundensatz Drehmaschine [€/h]	75,00	76,50
Steigerungsrate		1,02
Min		1,01
Max		1,03
Standardabweichung		0,05
Maschinenstundensatz Bearbeitungszentrum [€/h]	150,00	156,00
Steigerungsrate		1,04
Min		1,02
Max		1,07
Standardabweichung		0,05
Betriebsmittelstundensatz [€/h]	5,00	5,20
Steigerungsrate		1,04
Min		1,02
Max		1,07
Standardabweichung		0,1

Tabelle 13: Der Alternativenbewertung zu Grunde gelegten Daten

Bauteilnummer	Version	Bauteilname	Bauteilkosten [€]	Mitarbeiterkosten [€]	Materialkosten [€]	Maschinenkosten [€]	Entwicklungs-kosten [€]	Adaptions-dauer [h]	Mitarbeiterstundensatz [€/h] (inkl. Nebenkosten)	Anzahl Mitarbeiter [#]	Entwicklungs-dauer [h]	Mitarbeiterstundensatz [€/h] (inkl. Nebenkosten)	Anzahl Entwickler-mitarbeiter [#]	Bearbeitungs-dauer [h]
88	0	Anschlag längs neu	217,64	11,80	8,40	156,00	41,43	0,5	23,61	1	1,5	27,62	1	1
89	0	Greifvorrichtung neu	285,54	5,90	4,20	234,00	41,43	0,25	23,61	1	1,5	27,62	1	1,5
90	0	Coverhalter	258,23	23,61	126,00	25,75	82,87	1	23,61	1	3	27,62	1	1,25
3	0	Hydrometerhalter (Magazine)	5,90	5,90	0,00	0,00	0,00	0,25	23,61	1	0	0,00	0	0
4	0	Stifthalter (Magazine)	5,90	5,90	0,00	0,00	0,00	0,25	23,61	1	0	0,00	0	0
6	0	Kamera (Vision System)	5,90	5,90	0,00	0,00	0,00	0,25	23,61	1	0	0,00	0	0
91	0	Nagelträger	507,62	0,00	168,00	312,00	27,62	0	0,00	0	1	27,62	1	2
92	0	Kugelvorschieber	411,85	23,61	21,00	312,00	55,24	1	23,61	1	2	27,62	1	2
16	1	optoelektronischer Sensor (Einspannung)	5,90	5,90	0,00	0,00	0,00	0,25	23,61	1	0	0,00	0	0
39	1	Parallelgreifer (Greifer)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0
93	0	optoelektrischer Sensor	16,40	5,90	10,50	0,00	0,00	0,25	23,61	1	0	0,00	0	0
5	0	Gerüst (Vision System)	5,90	5,90	0,00	0,00	0,00	0,25	23,61	1	0	0,00	0	0
70	1	Software (PC)	32,16	32,16	0,00	0,00	0,00	1	32,16	1	0	0,00	0	0
94	0	Palette für Nagelträger	483,05	11,80	210,00	206,00	55,24	0,5	23,61	1	2	27,62	1	10
95	0	Normzylinder	181,11	23,61	157,50	0,00	0,00	1	23,61	1	0	0,00	0	0
96	0	Kugelhalter	200,68	11,80	5,25	156,00	27,62	0,5	23,61	1	1	27,62	1	1
97	0	Ständer Kugelvorschieber	261,10	23,61	26,25	156,00	55,24	1	23,61	1	2	27,62	1	1
41	1	Halterung (Greifer)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0
72	1	Lüsterklemmenblock rechts (vorn)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0
98	0	Positionierstifte Nagelträger	68,22	47,22	21,00	0,00	0,00	2	23,61	1	0	0,00	0	0
99	0	Halteeinheit Palette Nagelträger	87,91	35,41	52,50	0,00	0,00	1,5	23,61	1	0	0,00	0	0
100	0	Magnetventil Kugeln	76,11	23,61	52,50	0,00	0,00	1	23,61	1	0	0,00	0	0
38	1	Spindel (Roboter)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0
45	1	Roboter Anschlagbox rechts (RIA BOX)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0
72	2	Lüsterklemmenblock rechts (vorn)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0
37	1	Schwenkarmroboter	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0
44	1	Steuergerät MELFA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0
45	2	Roboter Anschlagbox rechts (RIA BOX)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0
44	3	Steuergerät MELFA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0
70	2	Software (PC)	33,45	33,45	0,00	0,00	0,00	1	33,45	1	0	0,00	0	0
70	3	Software (PC)	167,23	167,23	0,00	0,00	0,00	5	33,45	1	0	0,00	0	0

Tabelle 14: Adaptionliste von Alternative 1

	Periode 0	Periode 1
Adaptionsdauer [-]	1	1
Min		0,7
Max		1,8
Standardabweichung		0,2
Bearbeitungsdauer [-]	1	1
Min		0,8
Max		1,3
Standardabweichung		0,1
Entwicklungsdauer [-]	1	1
Min		0,8
Max		1,3
Standardabweichung		0,1
Materialkostensteigerung [-]	1	1,05
Steigerungsrate		1,05
Min		1,03
Max		1,08
Standardabweichung		0,07

Tabelle 15: Weitere unsichere Daten zur Bewertung der Alternativen

Kosten aus Adaptionliste [€]	3318	
	Kosten [€]	Dauer [h]
Stillstand	67	12,875
	Kosten [€]	Dauer [h]
Rekonfigurationsplanung	110	4
K_{Rekonfig} [€]	3236	

Tabelle 16: Deterministische Berechnung der gesamten Rekonfigurationskosten (K_{Rekonfig}) von Alternative 1