

Entwicklung einer Methode zur quantifizierbaren Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Förder- und Materialflusstechnik in Brownfield-Produktionslogistiksystemen zur Ermittlung von Wandlungs-Schwachstellen und -Bedarfen


Development of a method for quantifiable assessment of the transformability of conveyor and material flow technology in brownfield production logistics systems for the identification of transformation bottlenecks and needs

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
Master of Science Mechatronik und Robotik
an der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München

Themenstellender Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Betreuerin Pia Vollmuth, M.Sc; Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Externe Betreuung Moritz Bokan-Heller, Dipl.-Wi.-Ing (FH); Munich Consulting Group GmbH

Eingereicht von Stefan Loy


Eingereicht am: 01.12.2023 in Garching bei München

Inventarnr. fml: 2023/035

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand unter der wissenschaftlichen und inhaltlichen Anleitung von Pia Vollmuth, M.Sc., wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zunächst bei dem Partnerunternehmen dieser Arbeit, der Munich Consulting Group GmbH bedanken. Hierbei ist explizit mein Kollege und externer Betreuer Moritz zu nennen, welcher mir sowohl persönliche Unterstützung als auch Korrekturzyklen geboten hat. Gleicher Dank gilt ebenfalls an meinen Kollegen Jan sowie meinen Vorgesetzten Thomas, die mir neben ihren Alltagsaufgaben auch stets bei Fragen und für Inputs zur Verfügung standen.

Ebenso möchte ich der Hauptbetreuerin dieser Arbeit, Frau Pia Vollmuth, herzlichst für den regelmäßigen Austausch, die guten Kommentare sowie der allgemeinen Betreuung danken ohne deren diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Diskriminierungsausschluss

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich gleichermaßen auf weibliche, männliche und diverse Personen. Auf eine Doppelnennung und gegenderte Bezeichnungen wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit und Kompaktheit verzichtet.

Vereinbarung zum Urheberrecht

Hiermit gestatte ich dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik diese Studienarbeit bzw. Teile davon nach eigenem Ermessen an Dritte weiterzugeben, zu veröffentlichen oder anderweitig zu nutzen. Mein persönliches Urheberrecht ist über diese Regelung hinaus nicht beeinträchtigt.

Eventuelle Geheimhaltungsvereinbarungen über den Inhalt der Arbeit zwischen mir bzw. dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik und Dritten bleiben von dieser Vereinbarung unberührt.


München, den 01.12.2023

Abstract

Diese Masterarbeit entwickelt eine Methode zur quantifizierbaren Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Förder- und Materialflusstechnik in Brownfield-Produktionslogistiksystemen. Ziel ist es, Unternehmen der diskreten Fertigung eine tiefgehende Analyse der eigenen Produktion zu ermöglichen, um Wandlungsbedarfe zu identifizieren und Schwachstellen zu optimieren.

Dazu werden mittels einer Literaturrecherche Grundlagen zu Produktionslogistiksystemen, Wandlungsfähigkeit und Bewertungsansätzen sowie ein detaillierter Stand der Technik und Forschung erarbeitet. Aus diesen wird schlussendlich der Bedarf für eine aufwandsarme, merkmalsbasierte quantitative Methode zur technischen Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Förder- und Materialflusstechnik abgeleitet.

Unter Verwendung der bestehenden Literaturansätze und etablierter Methoden des Ingenieurwesens wird anschließend ein Top-Down Bottom-Up Bewertungs-Vorgehen mitsamt Anwendungstool entwickelt, welches in eine regelkreisähnliche Struktur integriert ist. Im Zentrum dieses Vorgehens sowie des Regelkreises steht der Abgleich der Anforderungen an das Produktionslogistiksystem mit den Wandlungsfähigkeitseigenschaften der Systemobjekte. Das dazu adaptierte House-of-logistischer-Wandlungsfähigkeit ermöglicht einen Soll-Ist-Vergleich, um kritische Anforderungen an das System und limitierende Eigenschaften der Objekte zu ermitteln aus denen gezielt Optimierungen abgeleitet werden können.

Die Methode wird anschließend durch zwei Fabrikplanungs-Experten und einen fiktiven Anwendungsfall evaluiert, wodurch das Potential einer methodischen Bewertung sowie der Bedarf an praxisorientierten Verbesserungen des Anwendungstools und der Methode gezeigt werden kann.

Diese Masterthesis zeigt somit sowohl den Bedarf an Forschung zur Wandlungsfähigkeit von Produktionslogistiksystemen auf und liefert zeitgleich ein Basis-Vorgehen wie diese aus technischer Betrachtung bewertet werden kann, welches durch anschließende Forschungsarbeiten vertieft und ganzheitlich erweitert werden muss.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelzeichenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Struktur der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Fabrik, Produktion und Logistik	5
2.1.1 Fabrik und Produktion – Grundlagen, Planung und Betrachtungsweisen	5
2.1.2 Grundlagen, Aufgaben und Ziele der (Produktions-)Logistik	7
2.1.3 Abgrenzung und Bestandteile von (Produktions-)Logistik, Materialfluss und Fördertechnik	9
2.2 Wandlungsfähigkeit	10
2.2.1 Einordnung und Definition der Wandlungsfähigkeit	10
2.2.2 Veränderungstreiber und Wandlungsbedarf	15
2.2.3 Wandlungsobjekte und Wandlungsbefähiger	17
2.2.4 Zusammenfassung	19
2.3 Bewertung	19
2.3.1 Kennzahlen, Merkmale und Skalensysteme	19
2.3.2 Bewertungsmethoden	20
3 Stand der Forschung und Technik	23

3.1	Vorarbeiten am Lehrstuhl fml	23
3.2	Allgemeine Betrachtung der Wandlungsfähigkeit	25
3.2.1	Wandlungsfähigkeit in der Fabrik und Produktion	25
3.2.2	Wandlungsfähigkeit in der (Produktions-)Logistik	27
3.2.3	Zusammenfassung	31
3.3	Bewertungsansätze für Wandlungsfähigkeit	31
3.3.1	Monetäre Betrachtung	31
3.3.2	Technische Betrachtung	34
3.4	Forschungslücke und -bedarf	39
4	Rahmen der Arbeit und Anforderungen	41
4.1	Grundsätzlicher Rahmen der Arbeit	41
4.2	Anforderungen an die Bewertungsmethode	41
5	Methode zur quantifizierbaren Bewertung der WF von Förder- und Materialflusstechnik in Brownfield-PLS	43
5.1	Grundlagen der Konzepterarbeitung	43
5.1.1	Empirisch-Induktive Erarbeitung	43
5.1.2	Theoretisch-Deduktive Erarbeitung	44
5.2	Beschreibung der Methode	44
5.2.1	Struktur und Grundlagen	44
5.2.2	Analyse des Produktionslogistiksystems	47
5.2.3	Quantifizierung und Bewertung der Wandlungsbefähiger	49
5.2.4	Ermittlung der Soll-Wandlungsfähigkeit	54
5.2.5	Soll-Ist-Vergleich	57

5.2.6 Gesamthafte Zusammenführung	61
5.3 Anwendungs-Tool der Bewertungsmethode	64
5.3.1 Grundinformationen und Ablauf	64
5.3.2 Detailbeschreibung	65
6 Anwendung und Evaluierung	69
6.1 Beschreibung des Evaluierungs-Vorgehens	69
6.2 Resultate	70
7 Diskussion der Ergebnisse	73
7.1 Grundlegende Diskussion des methodischen Ansatzes	73
7.2 Diskussion der Anforderungserfüllung der Methode	75
7.3 Beantwortung der Forschungsfragen	78
8 Zusammenfassung und Ausblick	81
8.1 Zusammenfassung	81
8.2 Ausblick	82
Literaturverzeichnis	83
Abbildungsverzeichnis	93
Tabellenverzeichnis	97
A Methode und Anwendungstool	A-1
B Evaluation	B-1
C Zitation nichtveröffentlichter Arbeiten	C-1
D Literaturanhang	D-1

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AHP-Technik	Analytic-Hierarchy-Process-Technik
DIN	Deutsches Institut für Normung
HoLW	House-of-logistischer-Wandlungsfähigkeit
HoQ	House-of-Quality
IPH	Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
Nfi	Need-for-Improvement
PLO	Produktionslogistikobjekt
PLS	Produktionslogistiksystem
QFD	Quality Function Deployment
TUL-Prozesse	Transport-, Umschlags-, Lagerprozesse
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WaProTek	Wandlungsfähige Prozessarchitekturen (Forschungsprojekt)
WB	Wandlungsbefähiger
WF	Wandlungsfähigkeit
WO	Wandlungsobjekt
WR	Wandlungsrezeptor
WT	Wandlungstreiber

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$BG_{i,j}$	[-]	Basisgewichtung eines Wandlungsbefähigers j zum Rezeptor i
$EG_{i,j}$	[-]	Eigengewichtung eines Wandlungsbefähigers j zum Rezeptor i
Σ_i	[-]	Anzahl aller gewonnenen Vergleiche bezüglich eines Rezeptors i
$g_{i,j}$	[-]	Gewichtung eines Wandlungsbefähigers j zum Rezeptor i
$n_{i,j}$	[-]	Anzahl gewonnener Vergleiche eines Wandlungsbefähigers j bezüglich eines Rezeptors i
p	[-]	Eigengewichtungs-Anteil
q	[-]	Basisgewichtungs-Anteil
WB_j	[%]	Ausprägung eines Wandlungsbefähigers j
WF_i	[%]	Wandlungsfähigkeit bezüglich eines Rezeptors i

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Die aktuelle Industrie befindet sich in einem technologischen Wandel, welcher, initiiert durch ein deutsches Forschungsprojekt, unter dem Namen *Industrie 4.0* international bekannt ist [Kel-2022, S. 346]. Dieser Wandel stellt nach der Arbeitsteilung im 19ten Jahrhundert, der Fließbandfertigung zu Anfang des 20ten Jahrhunderts sowie der aufkommenden Automatisierung und Mass Customization¹ die vierte Industrielle Revolution dar und wird Prognosen zufolge Unternehmen und Wirtschaft grundlegend verändern [Kel-2022, S. 343f.].

Neben technologischen Veränderungen treten innerhalb der Industrie von Zeit zu Zeit auch entscheidende unternehmenskulturelle Transformationen auf. Gegen Mitte bis Ende des 20ten Jahrhunderts, wurde innerhalb von europäischen und amerikanischen Produktionsunternehmen die Auffassung und Rolle von Qualität nachhaltig neu definiert [Wöh-2021, S. 28f.]. Ausgangspunkt waren die Qualitätsmanagementsysteme innerhalb der asiatischen Industrie, insbesondere mit Japan als Vorreiter, welche durch Kundenorientierung und Null-Fehler-Prinzipien entscheidende Wettbewerbsvorteile erlangen konnten [Brü-2020, S. 182]. Aus diesem Anstoß entwickelten sich sowohl Ansätze zur kontinuierlichen Prozessverbesserung [Pfe-2014, S. 30], der bis heute gültige Standard der DIN ISO 9001 sowie das Total-Quality-Management, welches die Produktionsunternehmen der westlichen Industrie maßgeblich dominiert [Wöh-2021, S. 32ff.].

Die Qualität komplementiert mittlerweile innerhalb moderner Produktionsunternehmen das Zielgrößen-Dreieck um Kosten und Zeit, dessen Beherrschung Unternehmen erlaubt Kundenzufriedenheit zu erfüllen und Wettbewerbsvorteile zu erlangen. Zur strategisch langfristigen Kontrolle der Wettbewerbsfähigkeit und Erhalt der Kundenzufriedenheit wurden in klassischen Managementansätzen die Eigenschaften Lerngeschwindigkeit und Innovationskraft fokussiert. Neben diesen etablierten Größen wurde in den vergangenen Jahren eine dritte Grundeigenschaft identifiziert, welche sich als wegweisend für die Wettbewerbsfähigkeit moderner Unternehmen herausstellte. Die Wandlungsfähigkeit. [Wie-2014, S. 14f.; Erl-2020, S. 18f.]

¹ Mischbegriff zur Beschreibung zeitgleicher Steigerung von Produktionsvolumina und dem Personalisierungsgrad von Produkten

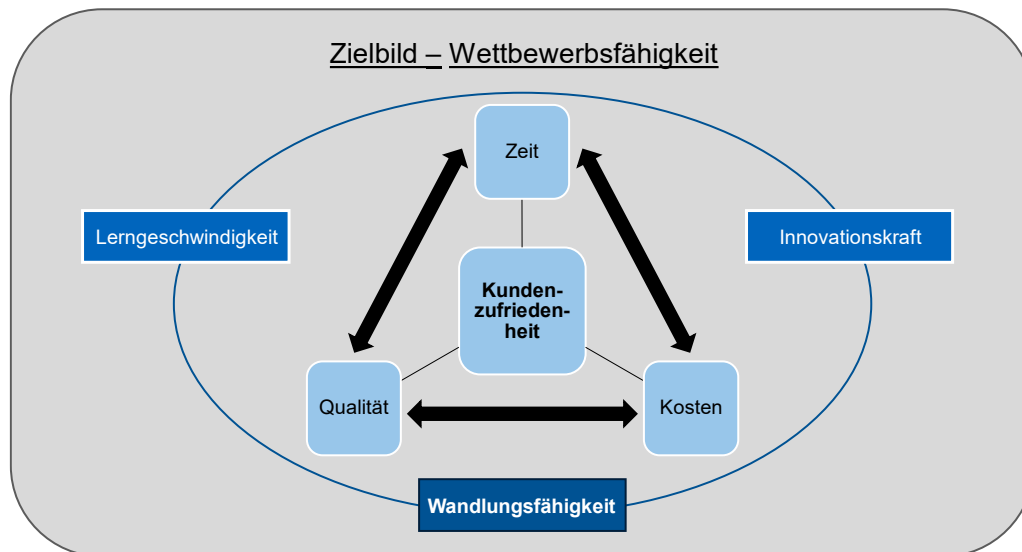


Abbildung 1-1: *Wandlungsfähigkeit im Zielbild wirtschaftlicher und wettbewerbsfähiger Unternehmen in Anlehnung an [Wie-2014, S. 15]*

Integriert im Zielbild wirtschaftlicher und wettbewerbsfähiger Organisationen, dargestellt in Abbildung 1-1, bietet Wandlungsfähigkeit Unternehmen die Möglichkeit sich robust gegenüber externen und internen Impulsen aufzustellen [Wie-2014, S. 15f.]. Dieses marktorientierte Handeln mit kontinuierlicher Veränderung stellt in Zeiten steigender Umfeldturbulenzen bedingt durch wachsende Produktindividualisierung, kürzere Produktlebenszyklen und die Globalisierung den langfristigen Erfolg sicher [Ber-2012, S. 437; Wes-2009, S. 13ff.]. Aus diesem Gedankengang sowie einer differenzierten Betrachtung der Flexibilität von Produktionssystemen entwickelte sich zu Mitte der 1990er Jahre das Forschungsfeld der Wandlungsfähigkeit [Wie-2014, S. 128], welche bis dato Unternehmen vor Herausforderungen stellt [Bor-2022, S. 104f.].

Auch wenn das Peter Drucker zugeordnete weltbekannte Zitat "what gets measured, gets managed" in modernen Management Ansätzen vielfältig unter dem Aspekt dass reines Erfassen von Daten keinen Erfolg garantiert diskutiert wird [Cau-2008; Bue-2019], zeigt die Verbreitung, dass der erste Schritt zur Verbesserung und Zielsetzung von Unternehmen die Messung bestimmter Größen darstellt. Unter diesem Gesichtspunkt sowie der anhaltenden Relevanz der Wandlungsfähigkeit für Unternehmen besteht der Bedarf an Ansätzen zur Quantifizierung der Wandlungsfähigkeit, damit diese anschließend zielgerecht dimensioniert und eingesetzt werden kann.

1.2 Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Innerhalb von produzierenden Unternehmen kommt Produktionslogistiksystemen (PLS) als Bindeglied zwischen Materialbeschaffung und Kundenbelieferung eine hohe Bedeutung zu [Weh-2020, S. 23ff.], deren individuelle Betrachtung im Hinblick auf die Wandlungsfähigkeit, wie später in Kapitel 3.2.2 gezeigt, aufgrund ihrer zentralen Rolle als auch Komplexität sowohl notwendig als auch noch nicht abgeschlossen ist. Zur Implementierung neuer und Analyse bestehender Konzepte benötigen Unternehmen daher Bewertungsmethoden für die Wandlungsfähigkeit, welche Schwachstellen aufzeigen, notwendigen Handlungsbedarf identifizieren und Investitionen in Relation setzen können. Diese Arbeit verfolgt das Ziel eine entsprechende Methode für die Produktionslogistik zu entwickeln und die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

- R1) Welche Dimensionen umfasst die Wandlungsfähigkeit in der Produktionslogistik?
- R2) Wie können diese Dimensionen in Kennzahlen transformiert und auf die unterschiedlichen Ebenen der Produktionslogistik übertragen werden?
- R3) Wie können, basierend auf diesen Kennzahlen, Evaluierungsmethoden eingesetzt werden, um Engpässe und Ineffizienzen der Wandlungsfähigkeit von Förder- und Materialflusstechnik in Brownfield-PLS zu ermitteln?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen und Entwicklung der Methode gliedert sich diese Arbeit, wie in Abbildung 1-2 dargestellt, in 4 wesentliche Bereiche. Den ersten Bereich bilden die Kapitel 2 Grundlagen und Kapitel 3 Stand der Forschung und Technik, in denen sowohl die fachliche und wissenschaftliche Basis zusammengefasst als auch die Grundsteine für die darauf aufbauende Methode gelegt werden. Ausgehend davon werden im zweiten Bereich sowohl der Rahmen der Arbeit und Anforderungen abgeleitet und beschrieben, Kapitel 4, sowie die bestehenden Konzepte aus dem ersten Bereich miteinander kombiniert, adaptiert und um neue Ansätze erweitert, um in Kapitel 5 das Ziel dieser Arbeit, die Methode zur quantifizierbaren Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Brownfield Förder- und Materialflusstechnik zu erarbeiten. Mit dieser Methode wird anschließend im dritten Abschnitt dieser Arbeit eine Anwendung und Evaluierung, Kapitel 6, durchgeführt. Die Diskussion der Ergebnisse schließt in Kapitel 7 an diese Anwendung an, bewertet die Methode anhand ihrer Anforderungserfüllung sowie der generellen Struktur und beantwortet zusammengefasst die oben genannten Forschungsfragen. Kapitel 8 gibt eine Zusammenfassung und Ausblick und bildet mit Kapitel 1 den Rahmen dieser Arbeit.

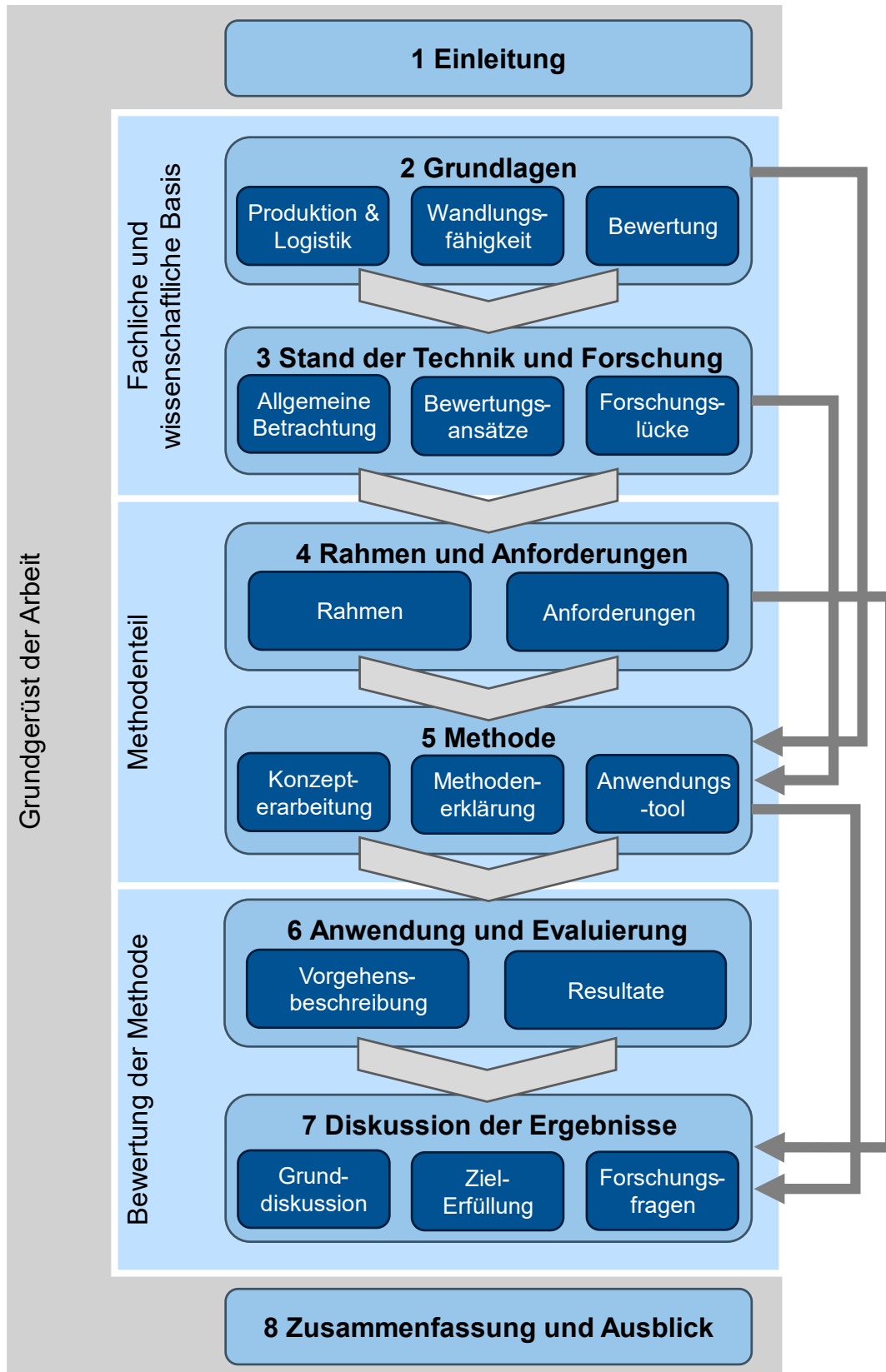


Abbildung 1-2: Übersicht zur Struktur der Arbeit und den Inhalten der Kapitel

2 Grundlagen

Entsprechend des Titels erstrecken sich die zentralen Aspekte dieser Arbeit über die Produktion und Logistik, Wandlungsfähigkeit sowie einer Bewertung dieser, deren Grundlagen und Zusammenhänge in diesem Abschnitt erläutert werden.

2.1 Fabrik, Produktion und Logistik

2.1.1 Fabrik und Produktion – Grundlagen, Planung und Betrachtungsweisen

Der *Verein Deutscher Ingenieure* (VDI) definiert eine Fabrik als einen „Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet“ [VDI-5200-1, S. 3]. Die Produktion als Teil der Fabrik umfasst nach Definition in selbiger Norm „alle zur betrieblichen Leistungserstellung erforderlichen Tätigkeiten, die unmittelbar an der Produktherstellung beteiligt sind [...]“ [VDI-5200-1, S. 4]. Beide Aspekte sind zentraler Fokus des Prozesses Fabrikplanung, welcher entsprechende Systeme entwirft und realisiert. [VDI-5200-1]

Die Fabrikplanung wird in einem Unternehmen in regelmäßigen Abständen als Investitionsprozess aktiv, welcher die wettbewerbsfähige Produktion sicherstellen soll [Gru-2021, S. 11]. Sie beschreibt einen komplexen, interdisziplinären Prozess mit Projektcharakter und dem Ziel das sozio-technische Konstrukt der Fabrik über den gesamten Lebenszyklus wirtschaftlich attraktiv sowie flexibel und wandlungsfähig zu halten [Bur-2021, S. 2ff.; Wie-2014]. Grundlegend kann bezüglich der Ausgangslage unterschieden werden, bei der die Neuplanung auf einer „grünen Wiese“ und die Umplanung bei einer bereits vorhandenen Produktion auf „brauner Wiese“ durchgeführt wird [VDI-5200-1; Sch-1995], weshalb sich die Begriffe Greenfield- bzw. Brownfieldplanung etabliert haben [Bur-2021, S. 4]. Innerhalb der Fabrikplanung kann die Fabrik, als räumlicher Bereich der Produktion, mittels einer systemtechnischen Betrachtung gesamtheitlich eingeordnet und zudem detailliert analysiert werden [Sch-2014, S. 121; VDI-5200-1]. Als Basis dieser Betrachtungsweisen zeigen sich in der Literatur die Arbeiten zur Systemtheorie von Ropohl und System Engineering von Daenzer et al. [Ber-2005, S. 21; Rop-2009; Dae-2002].

Die Systemtheorie und das Systems Engineering befassen sich mit der Hauptaufgabe große, komplexe Systeme in deren Teilsystemen sowie den dazwischen vorherrschenden Wirkbeziehungen aufzuteilen und diese so zu analysieren [Rop-2009; Dae-2002]. Systems Engineering fokussiert sich dabei auf den Entwicklungsprozess und Betrieb von komplexen Systemen und deren

interdisziplinären Zusammenhängen, damit diese in Anbetracht der gestellten Randbedingungen und Anforderungen konsistent sind [Dae-2002]. Ropohl als Vertreter der Allgemeinen Systemtheorie postuliert, dass Technologien nicht nur als einzelne unabhängige Elemente verstanden werden sollen, sondern ein technisches System immer ein Netzwerk seiner technischen und materiellen Einzelteile sowie der organisatorischen, sozio-kulturellen und wissensbasierten Faktoren darstellt [Rop-2009, S. 305ff.]. Zudem verdeutlicht Ropohl, dass die drei in Abbildung 2-1 visualisierten Konzepte in funktionaler, strukturaler und hierarchischer Sichtweise nur als Teilaspekt des Gesamtsystems verstanden werden sollten, welche unterschiedliche Charakteristika in den Vordergrund bringen [Rop-2009, S. 75f.]. In funktionaler Betrachtung stellen Systeme Prozesse dar, die Inputs über Zustandsänderungen in Outputs wandeln, während in strukturaler Sichtweise die Beziehung und Ordnung der Elemente zueinander sowie im Bezug zum Gesamtsystem im Fokus stehen [Rop-2009, S. 78ff.]. In Hierarchie-Darstellung sind Systeme stets Teil eines Supersystems und beinhalten wiederum Sub-Systeme wodurch der Fokus auf den Systemebenen liegt [Rop-2009, S. 77]. Die Ansätze von Ropohl lassen sich in mehreren Aspekten auf die Fabrik und Produktion übertragen.

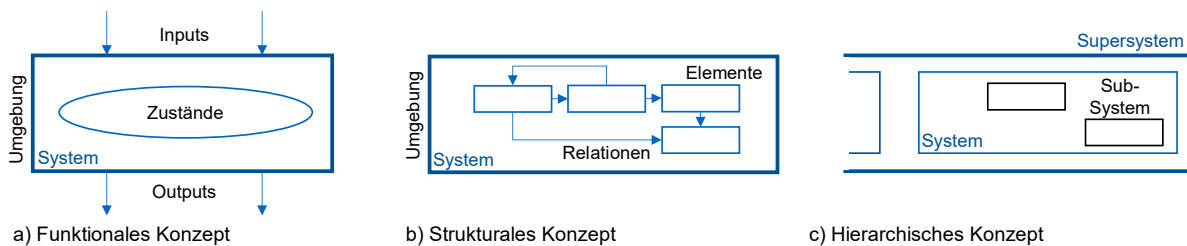


Abbildung 2-1: Konzepte der Systemtheorie in Anlehnung an [Rop-2009, S. 76]

Etabliert hat sich die Betrachtung der Produktion als ein funktionaler Transformationsprozess der Fabrik, welcher unter Nutzung von Hilfsmitteln aus Inputs über definierte Verfahren gewünschte Haupt- und nicht verhinderbare Nebenprodukte erzeugt, dargestellt in Abbildung 2-2 [Sch-2014, S. 119ff.].

Zeitgleich stellt die Fabrik aus Abbildung 2-2 ein soziotechnisches System mit hoher Komplexität dar, welches vom Mensch genutzt und gestaltet wird [Paw-2014, S. 3f.]. Ausgehend von einem hierarchischen Betrachtungsansatz entwickelte Bergholz 2005 in seiner Dissertation das Konzept der objektorientierten Fabrikplanung, welches die Fabrik als Konglomerat von Einzelementen bzw. Subsystemen wie Bereichen, Linien und Arbeitsplätzen sieht und selbst Teil eines Wertschöpfungsnetzwerks ist [Ber-2005; Bur-2021, S. 10f.]. Als abschließenden Systemaspekt müssen die Beziehungen dieser Einzelobjekte auf räumlicher, zeitlicher und inhaltlicher Ebene verknüpft werden, was wiederum in der Expertise Fabrikplanung durch ein strukturaler Konzept erfolgt [Gru-2021, S. 16; Paw-2014, S. 29f.].

Zuletzt sei noch die verbreitete morphologische Modellierung der Fabrik zu nennen, welche als drei essentielle Gestaltungselemente der Fabrikplanung die Organisation, Technik und Raum/Immobilie definiert [VDI-5200-2].

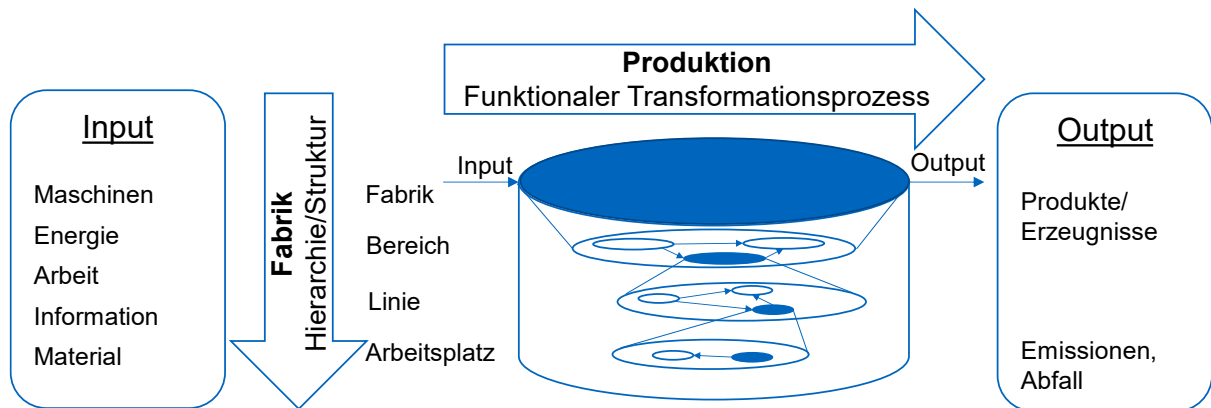


Abbildung 2-2: Anwendung Systemtheorie auf Fabrikplanung in Anlehnung an [Paw-2014, S. 29] und [Bur-2021, S. 17] sowie Transformationsprozess der Produktion in Anlehnung an [Sch-2014, S. 120]

2.1.2 Grundlagen, Aufgaben und Ziele der (Produktions-)Logistik

Die Logistik mit einem Hintergrund als strategisch entscheidender militärischer Nebenprozess wurde nach Ende des zweiten Weltkriegs mit stetig steigender Bedeutung in den wirtschaftlichen Kontext gebracht und ist mittlerweile fest etablierter Bestandteil moderner Unternehmensstrukturen [Tem-2018, S. 1; Weh-2020, S. 4f.; Pfo-2018, S. 11f.]. Im Allgemeinen beschäftigt sich die Logistik mit der Planung, Steuerung, Durchführung und Überwachung von Material- und Informationsflüssen innerhalb von Unternehmen (Unternehmenslogistik) oder Unternehmensnetzwerken (Supply Chain Management) [Paw-2007, S. 15]. Somit schafft die Logistik eine übergreifende und interdisziplinäre Betrachtung von Technik, Informatik sowie Betriebs- und Volkswirtschaftslehre [Weh-2020, S. 5].

Aufgrund der vielfältigen Betrachtungsweisen und Teildisziplinen existiert keine eindeutige Definition der Logistik [Pfo-2018, S. 12]. Pfohl sieht dabei die Logistik nach flussorientierter Definition als „alle Tätigkeiten, durch die die raumzeitliche Gütertransformation und die damit zusammenhängenden Transformationen hinsichtlich der Gütermengen und -sorten, der Güterhandhabungseigenschaften sowie der logistischen Determiniertheit der Güter geplant, gesteuert, realisiert oder kontrolliert werden“ [Pfo-2018, S. 12]. Wehking verweist in seinem Handbuch der Logistik auf die Definition von Jünemann, an welcher sich zudem Pawellek sehr nah in seiner oben genannten Tätigkeitsbeschreibung orientiert [Weh-2020, S. 11; Jün-1989]. Explizit verallgemeinernd definiert Fleischmann Logistik über „die Gestaltung logistischer Systeme sowie der Steuerung der darin ablaufenden logistischen

Prozesse“ [Fle-2018, S. 2]. In Anbetracht dieser Definitionen lässt sich für diese Arbeit mit Fokus auf Industrieunternehmen die Logistik ableitend wie folgt definieren:

Logistik ist die Gesamtheit aller Tätigkeiten zur Durchführung, Überwachung und Steuerung von raumzeitlichen Gütertransformationen innerhalb zuvor geplanter und realisierter Logistiksysteme.

Das soeben referenzierte Logistiksystem beschreibt dabei ein Netzwerk aus Quellen und Senken zwischen denen Güter und Informationen ausgetauscht werden und das über Knoten und Kanten dargestellt werden kann [Fle-2018, S. 3ff.]. In einfachster Form besteht dieses Netzwerk aus einem einstufigen System a), welches durch Sammel- und Auflösungspunkte beliebig erweitert und zu einem mehrstufigen System b) kombiniert werden kann, siehe Abbildung 2-3 [Pfo-2018, S. 5ff.].

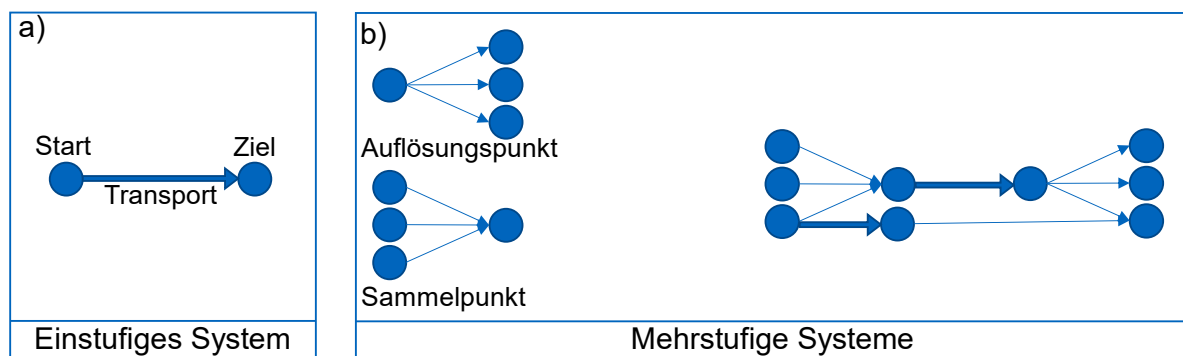


Abbildung 2-3: Knoten- und Kantenmodell von Logistiksystemen in Anlehnung an [Pfo-2018, S. 6]

Ziel der Logistik ist es in eben diesen Systemen durch Durchführung des Güter- und Informationstransports das Dreigespann aus Leistung, Kosten und Qualität zu balancieren [Gud-2011, S. 8]. Innerhalb der Literatur werden als Hauptziele häufig die 7R der Logistik genannt. Die Logistik muss aus dieser Anforderungsperspektive das richtige Gut mit den richtigen Informationen in der richtigen Menge im richtigen Zustand zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort zu den richtigen Kosten zur Verfügung stellen. [Paw-2007, S. 15; Weh-2020, S. 11; Pfo-2018, S. 18]

Im Betrachtungsfeld von Industrieunternehmen kann als Sonderform eines logistischen Systems, die gesamte Materialflussskette eines Industrieunternehmens identifiziert werden, welche Logistikkette bzw. englisch Supply Chain genannt wird [Fle-2018, S. 3]. In dieser fungiert die Produktionslogistik als Bindeglied zwischen der Beschaffungs- und Distributionslogistik und verbindet so den Beschaffungs- mit dem Absatzmarkt [Paw-2007, S. 13f.]. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-4 dargestellt. Die Produktionslogistik ist nach dieser Einteilung an erster Stelle dafür verantwortlich die innerbetriebliche Materialversorgung von produzierenden Unternehmen sicherzustellen [Paw-2007, S. 14].

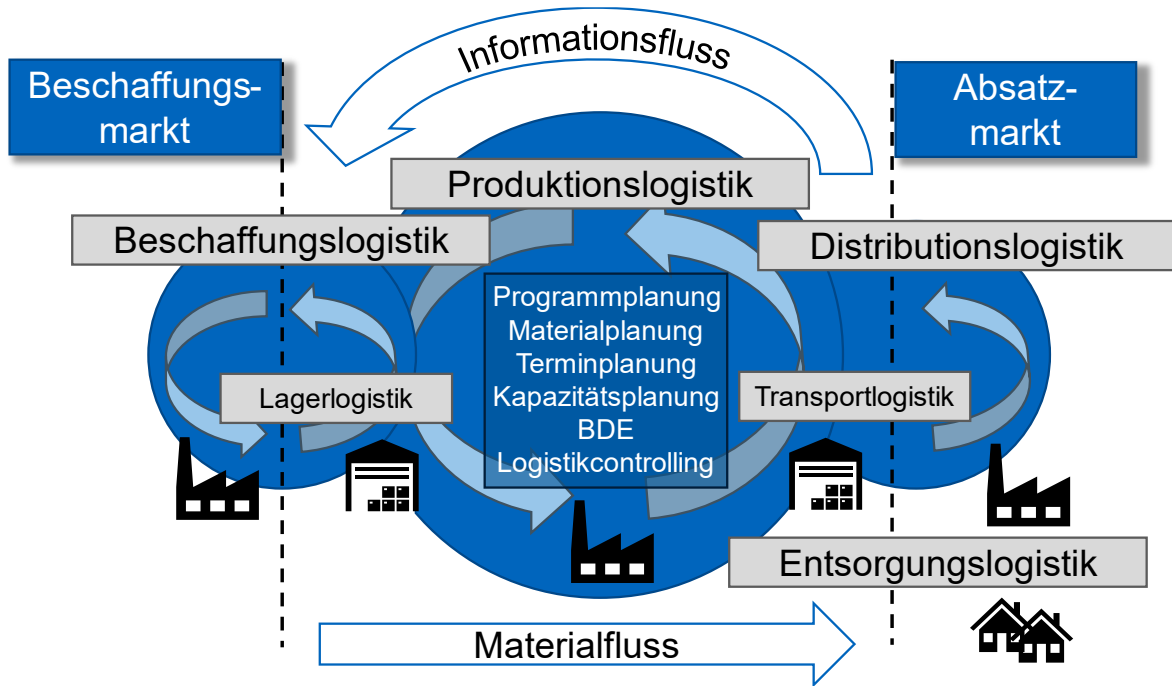


Abbildung 2-4: Logistikkette eines produzierenden Unternehmens mit Aufgaben der Produktionsplanung in Anlehnung an [Weh-2020, S. 91]

Zur Organisation dieses innerbetrieblichen Material- und Informationsflusses beschäftigt sich die Produktionslogistik übergeordneten mit Planungsaufgaben, wie der Programmplanung, Materialplanung, Terminplanung, Kapazitätsplanung, Betriebsdatenerfassung (BDE) und dem Logistikcontrolling [Bau-2014, S. 3]. Im Mittelpunkt der Produktionslogistik steht neben der oben genannten Grundaufgabe der Gewährleistung der Versorgungssicherheit der Produktion durch Ausführung dieser Planungsaufgaben den Zielkonflikt aus Beständen, Ressourcen und Servicegrad, das Dilemma der Materialwirtschaft, zu balancieren [Bur-2021, S. 226f.].

2.1.3 Abgrenzung und Bestandteile von (Produktions-)Logistik, Materialfluss und Fördertechnik

Traditionell entwickelte sich die Logistik aus den Transport-, Umschlags-, und Lagerprozessen (kurz TUL-Prozesse) welche auch weiterhin die Basis aller Logistiksysteme bilden [Weh-2020, S. 12]. Diese Grundfunktion mit den Aufgaben des Förderns, Verteilens, Sammelns und Lagerns werden in der innerbetrieblichen Materialversorgung von den Fördermitteln abgedeckt [Weh-2020, S. 9]. Bezüglich der Grundlagen zur Planung und Entwicklung von TUL-Systemen sei auf die einschlägige Literatur von z.B. Fottner et al. oder ten Hompel et al. verwiesen [Fot-2022; Hom-2018].

Der Materialfluss, als Teilbereich der Produktionslogistik, ergänzt diese klassischen Vorgänge um die Haupt- und Hilfsprozesse der Produktion, namentlich den Bearbeiten, Montieren, Prüfen und Handhaben [Pfo-2018, S. 201]. Dementsprechend definiert auch der VDI den Materialfluss als „die Verkettung aller Vorgänge beim

Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche“ [VDI-2689]. Ausgangsgrund für diese Erweiterung sowie das interdisziplinäre Gesamtsystemdenken ist die stetig steigende wirtschaftstechnologische Komplexität und der Zusammenhang in der Produktion [Weh-2020, S. 10].

Durch Erweiterung der Betrachtung auf Informations- und Datenebene sowie Integration eines betriebswirtschaftlichen Standpunktes wird die Disziplin der Logistik erreicht [Weh-2020, S. 11]. Diese beschriebene funktionale Aufteilung visualisiert Abbildung 2-5 in einer sich aggregierender Anordnung aus Logistikbereich und den zugehörigen Teilaufgaben.

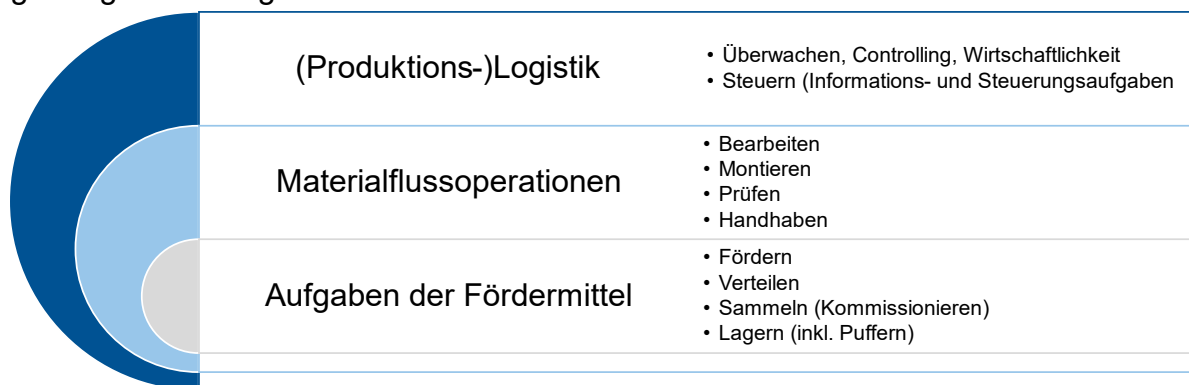


Abbildung 2-5: Funktionale Aufteilung von Fördertechnik, Materialfluss und Logistik in Anlehnung an [Weh-2020, S. 12]

2.2 Wandlungsfähigkeit

Nachdem im Abschnitt 2.1 die Fabrik und Produktionslogistik als grundlegende Betrachtungsfelder dieser Arbeit vorgestellt wurden, erarbeitet dieses Kapitel die Basis zum Thema Wandlungsfähigkeit, eine kurze Einordnung und Definition, die Herleitung des Wandlungsbedarfs sowie die Objekte und technischen Befähiger des Wandels.

2.2.1 Einordnung und Definition der Wandlungsfähigkeit

Bedingt durch wechselnde und stetig steigende interne und externe Herausforderungen müssen sich Produktionsunternehmen sowie deren Fabriken verstärkt an Veränderungen anpassen [Wes-2009, S. 18]. Diese Eigenschaft zur Veränderung wird seit den 1990er Jahren allgemein unter dem Begriff der *Veränderungsfähigkeit* in wissenschaftlichen Ansätzen rund um das Themengebiet der Fabrik untersucht und wurde dort als Zielgröße für Unternehmen mit turbulentem Umfeld identifiziert [Krü-1998, S. 229; Her-2003, S. 7f.]. Wiendahl definierte 2002 zur weiteren Betrachtung die Veränderungsfähigkeit als Metabegriff und differenziert, wie

in Abbildung 2-6 dargestellt, ausgehend von einer Betrachtung auf Markt- und Produktionsleistungsebene die darunterliegenden Subeigenschaften von Unternehmen in die Klassen der *Agilität*, *Wandlungsfähigkeit*, *Flexibilität*, *Rekonfigurierbarkeit* und *Umrüstbarkeit* [Wie-2002, S. 124ff.]. Hinsichtlich der Produktion und Fabrikplanung sind speziell die Wandlungsfähigkeit (WF), Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit von erheblicher Relevanz [Wie-2014, S. 122; Erl-2020, S. 22], weswegen diese im Folgenden detaillierter betrachtet werden. Die Aspekte der Agilität und Umrüstbarkeit werden in dieser Arbeit entsprechend nicht untersucht.

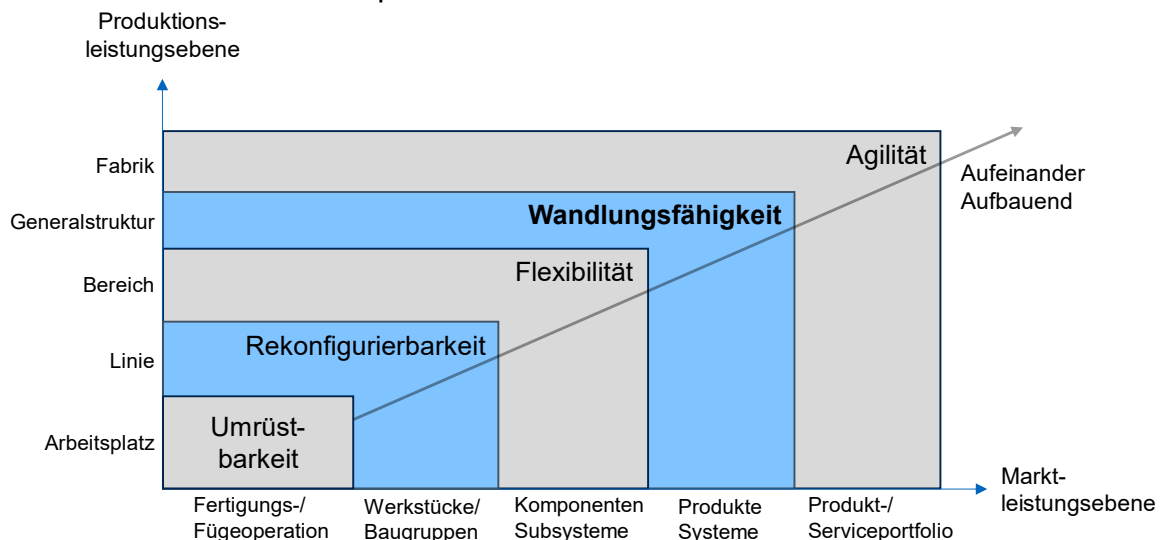


Abbildung 2-6: Klassen der Veränderungsfähigkeit in Anlehnung an [Wie-2002, S. 126]

Rekonfigurierbarkeit

Rekonfigurierbarkeit beschreibt Lösungen aus der Fertigungstechnik, mit denen durch Gliederungen und Funktionsaufteilungen aufwands- und kosteneffizient neue Maschinenkonfigurationen erreicht werden können. Die Übertragung dieser Konzepte auf Fertigungssysteme befindet sich jedoch noch im Forschungsstand. [Wie-2014, S. 128]

Flexibilität

Flexibilität als Begriff im ingenieur- und betriebswissenschaftlichen Bereich wird in vielen Anwendungsfällen inflationär [Hei-2006, S. 46] und ohne Betrachtung einer klaren Definition verwendet [Heg-2007, S. 20]. Diese Thematik wurde bereits 1998 von De Toni und Tonchia anhand von mehr als 120 Publikationen untersucht mit dem Resultat einer notwendigen Unterscheidung verschiedener Flexibilitätsarten [Ton-1998]. Wiendahl führt diese mangelnde Differenzierung auf das Fehlen des Begriffs WF sowie der zum damaligen Zeitpunkt noch geringen Veränderungsimpulse zurück [Wie-2014, S. 128]. Heinecker und Heger untersuchten die unterschiedlichen Arten und Definitionen der Flexibilität mit einem einheitlichen Ergebnis: Die WF entwickelte sich gegen Ende der 1990er aus einer dynamischen und strategischen Betrachtung

der Flexibilität [Hei-2006, S. 49f.; Heg-2007, S. 20f.]. Hernandez führt dies darauf zurück, dass die „statische Flexibilität zwar eine notwendige, aber nicht hinreichende Größe darstellt, um im turbulenten Umfeld angemessen zu agieren“ [Her-2003, S. 25].

Bezüglich einer Beschreibung der statischen Flexibilität (ab sofort nur noch Flexibilität genannt) verweist Heger, speziell in Hinblick auf die Produktion, in seiner Arbeit auf die Definition nach Schmigalla, welcher Flexibilität als „die Eigenschaft eines in bestimmten zeitlichen Grenzen als konstant betrachteten Produktionssystems, sich an verändernde Anforderungen aus Teilprogrammen und technologischen Prozessen anpassen zu können“ bezeichnet [Sch-1995] zitiert nach [Heg-2007, S. 21]. Heinecker übernimmt als zentrale Definition für seine Arbeit die 1993 von Ost entwickelte Beschreibung der Flexibilität als „die Fähigkeit, eine vorgegebene Vielfalt von Fertigungsaufgaben bei zufälligen oder systembedingten Änderungen der Eingangsgrößen zu bewältigen, ohne dass das System in seiner Grundkonzeption verändert werden muss“ [Ost-1993] zitiert nach [Hei-2006, S. 48]. Hawer kombiniert in seiner Dissertation diese sowie weitere Ansätze und stellt damit eine aktuelle, auch in dieser Arbeit gültige, Definition vor:

„[Flexibilität] ist die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich ohne großen finanziellen Investitionsaufwand durch vorgehaltene Maßnahmen oder Aktionskorridore an Umgebungsbedingungen anzupassen.“ [Haw-2020, S. 13]

Wandlungsfähigkeit

Analog zur Flexibilität existieren auch zu diesem Begriff unterschiedliche Beschreibungen und Betrachtungsansätze mit vornehmlich ingenieurwissenschaftlichen Hintergrund [Heg-2007, S. 22; Wie-2014, S. 128ff.; Her-2003, S. 26]. Die mitunter erste Begriffsdefinition unternahm 1995 Hartmann [Har-1995; Heg-2007, S. 22; Ste-2014, S. 72], der „Wandlungsfähigkeit als eine aktive strukturbezogene Eigenschaft von Produktionssystemen“ beschreibt [Heg-2007, S. 22]. Neben der bereits in Abbildung 2-6 gezeigten Unterteilung nach Wiendahl haben sich seitdem die Forschungsinitiativen intensiviert und die Definitionen nach Westkämper und Reinhart etabliert [Hei-2006, S. 50ff.; Wie-2014, S. 128ff.], welche zusammen mit der auf Reinhart aufbauenden Beschreibung nach Zäh et al. im Folgenden kurz detaillierter vorgestellt werden.

Westkämper betrachtet die Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen zunächst aus unternehmerischer Sicht und postuliert dabei mit Blick auf die Lebenszyklen von Fabriken, dass nur eine kurzfristige Wandlungsfähigkeit Erfolg garantiert, da eine mittel- und langfristige Veränderung aufgrund der endlichen Lebensdauer von Produktionsmitteln und Fabriken immanent ist und zwangsweise in jedem Unternehmen passiert [Wes-1999, S. 131f.] zitiert nach [Her-2003, S. 26f.]. Des

Weiteren betont er die notwendige Differenzierung der Wandlungsfähigkeit in unterschiedliche Bereiche eines Unternehmens, wie die Immobilien, Mobilien, Informationsverarbeitung und Personal [Wes-1999, S. 133] zitiert nach [Heg-2007, S. 23; Wie-2014, S. 129]. Ausgehend von dieser Betrachtung teilt er das Veränderungspotential von produzierenden Unternehmen in die passive Flexibilität sowie die aktive Wandlungsfähigkeit auf, welche er im Bereich technischer Systeme mit dem Begriff *Wandelbarkeit* bezeichnet [Wes-2000, S. 23]. Der Begriff der Wandelbarkeit als technische Dimension der WF wird für den weiteren Verlauf dieser Arbeit übernommen, zudem ist diese Abgrenzung in Abbildung 2-7 dargestellt. Westkämper sieht dabei Wandlungsfähigkeit als gegebene Eigenschaft eines Systems an, „wenn es aus sich selbst heraus über gezielt einsetzbare Prozess- und Strukturvariabilität sowie Verhaltensvariabilität verfügt.“ [Wes-2000, S. 23].

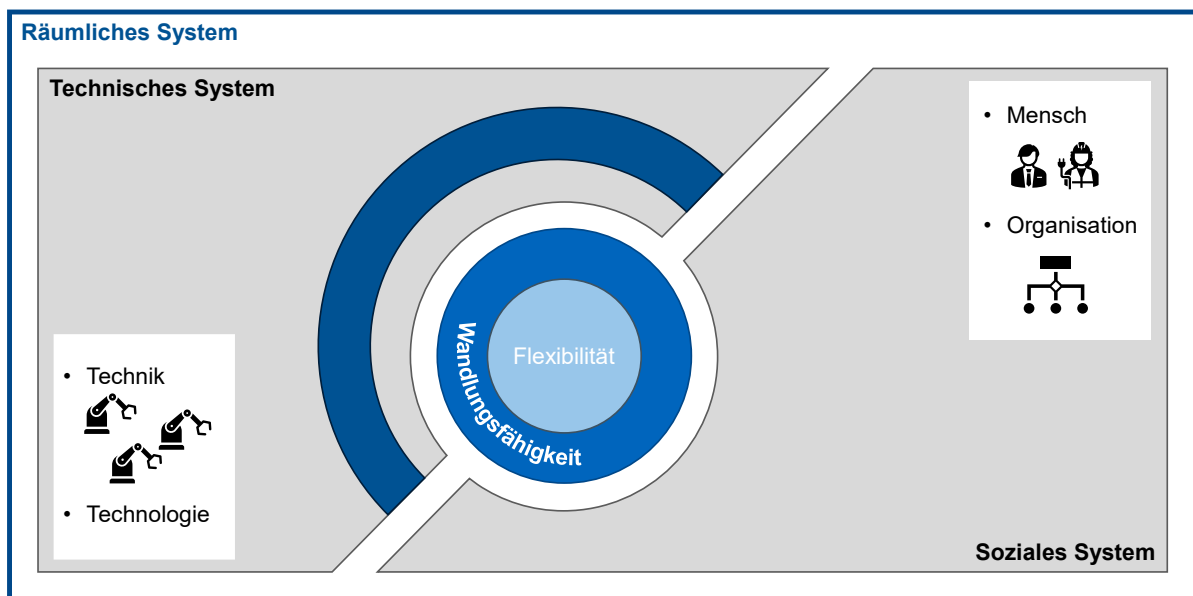


Abbildung 2-7: Abgrenzung der Veränderungspotenziale von produzierenden Unternehmen in Anlehnung an [Wes-2000, S. 23]

Aus dieser Definition entwickelte und publizierte Westkämper 2009 das Stuttgarter Unternehmensmodell, welches eine gesamtheitliche Betrachtung der Wandlungsfähigkeit in das Zentrum von produzierenden Unternehmen stellt [Wes-2009]. Dieses wird detaillierter in Kapitel 3.2 vorgestellt.

Reinhart betrachtet die WF als eine notwendige Weiterentwicklung aus der Flexibilität, da letztere in einem zunehmend turbulenteren Unternehmensumfeld nicht das benötigte Maß an Veränderung erbringen kann [Rei-1997, S. 12f.]. Er setzt die Wandlungsfähigkeit dabei von der Flexibilität durch den Zusatz der Reaktionsfähigkeit ab, welche „Potential, um jenseits vorgedachter Dimensionen und Korridore agieren zu können“ mit sich bringt [Rei-2000, S. 3]. Dementsprechend definiert er WF als „ein Maß für die Fähigkeit eines Unternehmens, sich an ein turbulentes Umfeld anzupassen“ welches sich aus Flexibilität und Reaktionsfähigkeit zusammensetzt

[Rei-2000, S. 3]. Dabei betont Reinhart konkret, dass das benötigte Maß an Wandlungsfähigkeit bzw. Flexibilität von der Unsicherheit des Unternehmensumfeld abhängt und über die Reaktionsfähigkeit verknüpft ist [Rei-2000, S. 4]. Qualitativ ist dieser Zusammenhang in Abbildung 2-8 dargestellt.

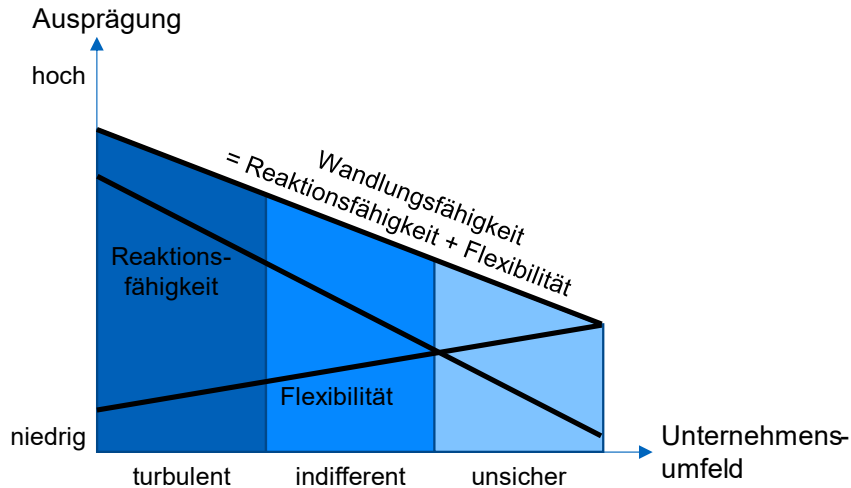


Abbildung 2-8: Wandlungsfähigkeit in Abhängigkeit vom Unternehmensumfeld in Anlehnung an [Rei-2000, S. 4]

Zäh et al. fassen diesen Ansatz auf und übertragen ihn auf Produktionssysteme. Flexibilität ermöglicht in dieser Betrachtungsweise eine Anpassung des Produktionssystems in vordefinierten Korridoren und Dimensionen (z.B. Stückzahl). Sobald diese Flexibilitätskorridore durch externe oder interne Einflüsse jedoch überschritten bzw. verlassen werden müssen greift die Wandlungsfähigkeit reaktiv ein. Die somit angestoßene Strukturveränderung passt den Flexibilitätskorridor in den benötigten Dimensionen an, damit das bestehende System den neuen Anforderungen gerecht wird. Dabei erreichen wandlungsfähige im Vergleich zu wandlungsträgen Systemen diesen neuen Zustand in minimaler Zeit zu minimalen Kosten. Dieser Unterschied zwischen Wandlungsfähigkeit und Flexibilität von Produktionssystemen ist in Abbildung 2-9 dargestellt. [Zäh-2005, S. 4]

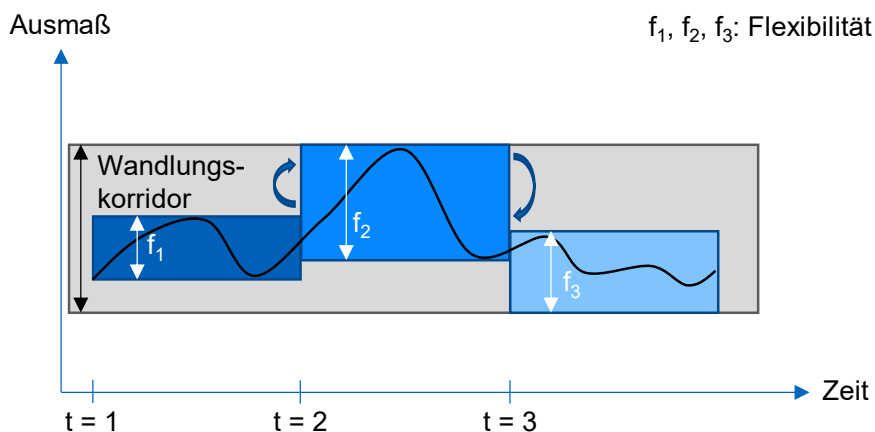


Abbildung 2-9: Wandlungsfähigkeit und Flexibilität von Produktionssystemen nach [Zäh-2005, S. 4]

Auch der VDI verweist 2017 auf diese Darstellungsform und Unterscheidung zwischen der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. Des Weiteren stellt der VDI eine Definition der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an Hernandez mit Verweis auf eine fehlende Einheitlichkeit in der bestehenden Literatur vor, welche in Einklang mit der von Westkämper und Reinhart steht und somit für diese Arbeit als de facto Standard übernommen wird [Her-2003]: [VDI-5201]

„Wandlungsfähigkeit ist die strukturelle Veränderungsfähigkeit eines Produktionssystems zur aktiven Begegnung dynamischer Umfeldveränderungen.“ [VDI-5201]

Nachdem an dieser Stelle die Wandlungsfähigkeit definiert und von verwandten Begriffen abgegrenzt worden ist, verfolgen die anschließenden Teilkapitel das Ziel eine kurze Einführung zu dem benötigten Bedarf sowie der Ermöglichung von wandlungsfähigen Systemen zu geben. Eine tiefere Einsicht zur Analyse und Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Systemen gibt Kapitel 3.



Abbildung 2-10: *Wandlungstreiber und Wandlungsbedarf von Produktionssystemen als Regelkreis in Anlehnung an [Her-2003, S. 46]*

2.2.2 Veränderungstreiber und Wandlungsbedarf

Nach der vorgestellten Definition benötigen produzierende Unternehmen wandlungsfähige Systeme, um dauerhaft den sich wechselnden gestellten Anforderungen gerecht zu werden und somit die Wettbewerbsfähigkeit sicher zu stellen. Betrachtet man das System Fabrik, welches in ein Umfeld eingebettet ist, lassen sich die Einflüsse auf diese in interne und externe Faktoren aufteilen, welche *Veränderungstreiber* oder im Hinblick auf die Wandlungsfähigkeit *Wandlungstreiber* (WT) genannt werden [Her-2003, S. 45f.; Gil-2011, S. 310]. Durch einen Vergleich dieser Einflüsse und Anforderungen mit den gegebenen Systemeigenschaften lässt sich entsprechender *Wandlungsbedarf* eines Systems ermitteln und so ein Wandel initiieren [Her-2003, S. 46]. Dieser Zusammenhang ist in der Form eines Regelkreises² in Abbildung 2-10 dargestellt. Eine Identifikation und Bewertung der WT stellt somit für Unternehmen den ersten und somit auch entscheidenden Schritt dar, um der notwendigen Veränderung gerecht zu werden [Gil-2011, S. 310f.]. Haupttreiber des

² Ein aus dem Fachbereich der Regelungstechnik stammende Wirkdarstellung, bei der die Einhaltung einer gewünschten Systemgröße durch konstanten Vergleich mit der tatsächlichen Systemgröße und Minimierung auftretender Abweichungen erreicht wird [Zac-2017, S. 5ff.].

externen Wandels von Produktionssystemen treten in den technologischen, sozio-kulturellen, ökologischen, ökonomischen und politisch-rechtlichen Bereichen auf, weswegen eine sogenannte PESTEL-Analyse³ wesentliche WT identifizieren kann [Ehr-2015, S. 130f.]. Interne WT stammen entweder aus strategischen Entscheidungen von abgeleiteten externen Einflüssen oder stellen zum Teil Wandlungshemmnisse dar [Gil-2011, S. 311].

Hernandez identifizierte mehr als 160 dieser Einflussfaktoren [Her-2003, S. 111] weswegen mitunter Nofen et al. zu dem Schluss kommen, dass eine Betrachtung sämtlicher WT für viele Unternehmen eine große Herausforderung darstellt [Nof-2005, S. 12f.]. Eine Möglichkeit, um diese Komplexität speziell im Hinblick auf die Fabrik zu beherrschen ist das von Cisek et al. 2002 vorgestellte und im Rahmen der Dissertation von Möller 2008 weiter ausgearbeitete Rezeptormodell der Produktion [Cis-2002; Möl-2008; Poh-2013, S. 12]. In Anlehnung an einen Rezeptor⁴ aus der Biochemie nehmen diese Wandlungsrezeptoren (WR) Reize aus dem Fabrikumfeld auf und geben diese als konkrete Anforderungen an das Produktionssystem weiter [Cis-2002, S. 441f.]. Möller ergänzt dabei die ursprünglichen fünf Rezeptoren *Produkt*, *Stückzahl*, *Zeit*, *Kosten* und *Qualität* von Cisek et al., um die *Technologie*, betont jedoch weiterhin, dass die Rezeptoren zunächst durch eine Analyse- bzw. Entscheidungsinstanz (z.B. die Abteilungen des Produktionsunternehmens) aus den WT ermittelt werden müssen [Möl-2008, S. 21ff.]. Abbildung 2-8 zeigt eine visuelle Interpretation dieses Modells. Die Rezeptoren sind direkte Einflussgrößen innerhalb des Produktionssystems und konzentrieren unterschiedlichste externe und interne Wandlungstreiber.

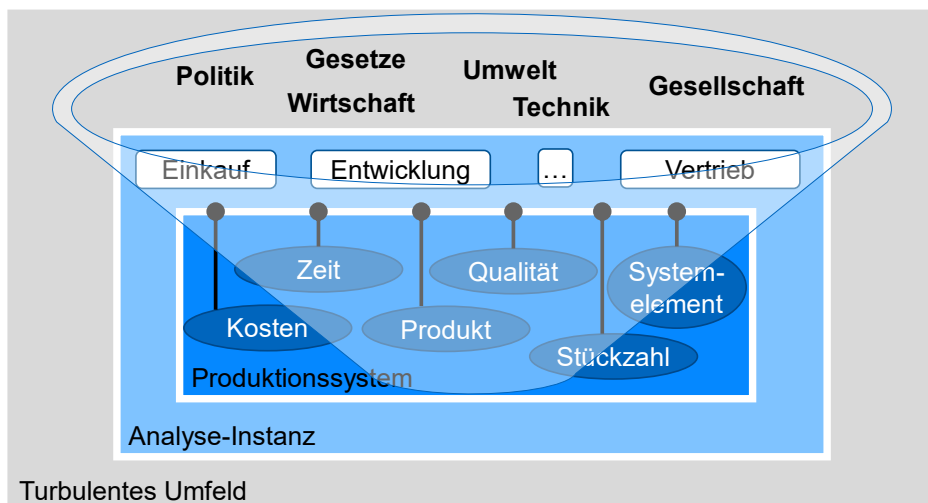


Abbildung 2-11: Rezeptormodell der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Möl-2008, S. 25]

³ Kurzform für die englische Nennung von „political, economical, social, technological, environmental and legislative analysis“.

⁴ Aus dem lateinischen *recipere* für „aufnehmen“ oder „empfangen“

2.2.3 Wandlungsobjekte und Wandlungsbefähiger

Hernandez stellt in seiner Dissertation zur Systematik der WF als erster zwei essentielle Komponenten vor, die nach seiner Auffassung notwendig für die Betrachtung der WF in Fabriken sind [Her-2003, S. 52ff.]. Dies sind zum einen die Objekte innerhalb der Fabrik, welche den Wandlungsprozess vollziehen, sogenannte *Wandlungsobjekte* (WO), sowie deren inhärente abstrakte Metaeigenschaften zur Realisierung des Wandels, die *Wandlungsbefähiger* (WB) [Her-2003, S. 52ff.]. Diese grundlegende Beschreibung des Wandels in der Fabrik hat sich innerhalb der Literatur etabliert und findet in vielen Konzepten zur Betrachtung der Wandlungsfähigkeit Anwendung [Heg-2007, S. 24; Nyh-2010a, S. 26; Wie-2014, S. 132; Ste-2014, S. 82; Ull-2018, S. 2; Haw-2020, S. 14].

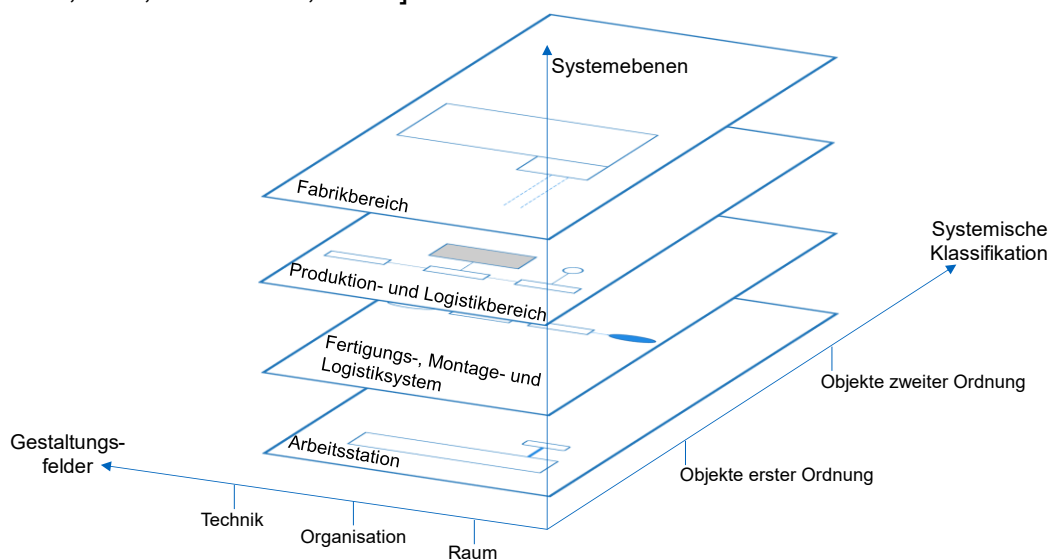


Abbildung 2-12: *Wandlungsobjekte in den Ebenen und Dimensionen der Fabrik in Anlehnung an [Her-2003, S. 66] und [Heg-2007, S. 72]*

Zur Ermittlung der WO innerhalb einer Fabrik nutzen Hernandez und Heger die in Abschnitt 2.1.1 vorgestellte hierarchische Systembetrachtung und ergänzen diese zur differenzierten Betrachtung um die Gestaltungsfelder der Fabrik: Technik, Organisation und Raum [Her-2003, S. 66; Heg-2007, S. 71f.]. Dabei integrieren sie die Faktoren Mensch und Führung in die Organisation [Heg-2007, S. 71] bzw. verweisen auf die unabhängige Betrachtung der Wandlungskompetenz [Her-2003, S. 50; Heg-2007, S. 70], während hingegen andere Publikationen den Mensch und Führung als eigenständiges WO mit eigenen WB aufführen [Nyh-2010a, S. 49; Ull-2018; Wes-1999]. Beide betonen, dass die WO selbst wiederum aus WO bestehen und somit eine Klassifizierung in Objekte erster und zweiter Ordnung zur differenzierten Betrachtung der WF notwendig ist [Her-2003, S. 53]. Aufgrund des Fokus auf eine technische Wandlungsfähigkeitsbewertung verfolgt diese Arbeit ebene jene Aufteilung der Fabrik in Fabrikobjekte erste und zweiter Ordnung in den entsprechenden Dimensionen der Fabrik nach Heger und Hernandez, was graphisch in Abbildung 2-12 dargestellt ist.

Während in der Literatur die WO in der Fabrik als gesetzte Größen gelten [Wie-2014, S. 141] bedarf es einen detaillierteren Blick auf die WB, da diese literatur- bzw. autorabhängig in ihrer Ausführung stark schwanken [Haw-2020, S. 62].



Abbildung 2-13: Primäre Wandlungsbefähiger und deren Definitionen in Anlehnung an [Wie-2014, S. 133]

Hernandez definiert als erster die WB als „individuelle und ungerichtete, abrufbare Eigenschaft eines WO zum Wandel“ und ermittelt ausgehend von grundlegenden wandlungsfördernden Systemeigenschaften die sechs WB *Mobilität*, *Erweiter- und Reduzierbarkeit*, *Modularität*, *Funktions- und Nutzungsneutralität*, *Vernetzungsfähigkeit* sowie *Desintegrations- und Integrationsfähigkeit* [Her-2003, S. 54ff.]. Heger erweitert und adaptiert in seiner Dissertation diese sechs WB um die Eigenschaft der *Standardisierung* sowie eines *objektspezifischen Wandlungspotentials* und verwendet die Bezeichnung *Wandlungspotential*, um die Wandlungsfähigkeit als nutzbare Reserve eines Systems zu betonen [Heg-2007, S. 76ff.]. Zudem führt er die Abstufung in die eben genannten primären sowie deren darunterliegenden sekundären WB, sogenannte *Wandlungspotentialmerkmale*, ein, da nur über diese Merkmale die Wandlungsfähigkeit von WO ermittelt werden kann [Heg-2007, S. 70]. Nyhuis et al. sowie Wiendahl kommen wiederum zur Schlussfolgerung, dass im Sinne der praktischen Anwendung eine Reduzierung auf die fünf aus ihrer Sicht essentiellen primären WB *Universalität*, *Mobilität*, *Skalierbarkeit*, *Modularität* und *Kompatibilität* notwendig sei [Nyh-2007, S. 290; Nyh-2010a, S. 26ff.; Wie-2014, S. 132f.]. Steffens übernimmt mit Fokus auf WF in industriellen Logistiksystemen diese Auflistung von Nyhuis et al. und Wiendahl und gibt eine ausführliche Beschreibung zu jedem dieser fünf WB sowie deren Wechselwirkungen [Ste-2014, S. 145ff.]. Entsprechend eines praktikablen Grundgedankens, sowie der thematischen Verbundenheit dieser Arbeit mit der von Steffens werden eben diese ursprünglich von Nyhuis et al. bzw. Wiendahl

übernommenen fünf Wandlungsbefähiger inkl. deren Definitionen für den weiteren Verlauf dieser Arbeit festgelegt. Eine Übersicht gibt Abbildung 2-13.

An dieser Stelle sei vermerkt, dass Publikationen seit 2014 zum Teil neben anderen Begrifflichkeiten eine größere Anzahl an WB nennen. Ullrich identifiziert z.B. in Hinblick auf das Gesamtsystem der Fabrik inkl. Mensch und Führung nach ausführlicher Literaturrecherche zehn von ihm genannte Wandlungsindikatoren, welche jedoch die in Abbildung 2-13 genannten WB beinhalten [Ull-2018, S. 129]. Hawer führt in seiner Dissertation erneut *Standardisierung* als zusätzlichen WB mit auf und integriert Tertiärbefähiger, um die praktische Relevanz zu erhöhen [Haw-2020, S. 104].

2.2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die *Wandlungsfähigkeit* aufgrund von einer zunehmenden Turbulenz im Unternehmensumfeld aus einer differenzierten Betrachtung der Flexibilität von Systemen gegen Ende der 1990er Jahre entwickelt hat. Als zentrale Unterscheidungsmerkmale zur Flexibilität ist die WF lösungsneutral, nicht vordefiniert und geht mit einer strukturellen Veränderung ein.

Ziel ist es damit veränderten Umfeldbedingungen, sowohl externen als auch internen Ursprungs, zu begegnen. Diese Randbedingungen treten allgemein unter den Begriff Wandlungstreiber auf und können über ein Rezeptormodell als die Inputgrößen *Technologie, Zeit, Kosten, Qualität, Produkt* und *Stückzahl* eines Produktionssystems interpretiert werden und initiieren einen Wandlungsbedarf bei Überschreiten eines Sollbereichs.

Auf der Gegenseite der Wandlungsrezeptoren stehen die sogenannten Wandlungsobjekte innerhalb der Fabrik, welche durch spezifische Merkmale den Wandel eines Systems bei Bedarf vollziehen. Diese Wandlungsbefähiger sind abstrakte Metaeigenschaften und können nicht direkt ermittelt werden. Als zentrale primäre Befähiger dieser Arbeit gelten die von Wiendahl und Nyhuis et al. definierten Eigenschaften *Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität* und *Kompatibilität*.

2.3 Bewertung

2.3.1 Kennzahlen, Merkmale und Skalensysteme

Kennzahlen stellen die informative Basis für wesentliche unternehmerische Analysen und Entscheidungen dar und können grundlegend als willentlich verdichtete Daten mit dem Zweck der einfachen Erfassung eines komplexen Sachverhaltes definiert werden

[Gla-2011, S. 11; Vol-2020, S. 7]. Dabei kann grundlegend zwischen absoluten Kennzahlen, welche direkt ermittelt werden können, Verhältniszahlen, welche durch einen relativen Bezug von Einzelzahlen generiert werden, sowie Richtzahlen, welche aus Vergleich mit üblichen Branchenzahlen entstehen, unterschieden werden [Vol-2020, S. 10ff.]. Die große Herausforderung in der Kennzahlenbildung besteht darin, ein angemessenes Verhältnis aus Informationsverlust durch Aggregation und der zugrundeliegenden Komplexität aus Informationsüberfluss zu bilden [Gla-2011, S. 12f.]. Der VDI fordert aus diesem Grund in der VDI-2525 Unternehmen auf Kennzahlen, mit Praxisbezug zur Logistik, stets aktuell, übersichtlich, aussagekräftig, allgemein verständlich sowie mengenmäßig überschaubar zu halten, um korrekte Schlussfolgerungen aus diesen ziehen zu können [VDI-2525].

Das Deutsche Institut für Normung (DIN) definiert ein Merkmal als einen Obergriff für eine physikalische Größe, welche eine objektspezifische Eigenschaft beschreibt und über ein Ermittlungsverfahren mit einem Merkmalswert versehen werden kann [DIN-1313]. Innerhalb der Statistik unterscheidet man in erster Linie zwischen qualitativen und quantitativen Merkmalen. Qualitative Merkmale treten nur in festgelegten Kategorien bzw. Ausprägungen auf und folgen entweder einer ungeordneten nominalen Skala oder einer geordneten ordinalen Skala. Quantitative Merkmale bilden zahlenmäßige Gegebenheiten ab und treten entweder in diskreten Skalen mit endlichen Ausprägungen und festgelegten Intervallen oder in kontinuierlichen Skalen mit theoretisch unendlichen Ausprägungen auf. [Sto-2022, S. 26f.; Puh-2020, S. 5ff.]

2.3.2 Bewertungsmethoden

Dieser Abschnitt beschreibt Grundlagen zu sowie einige ausgewählte Bewertungsmethoden und stellt eine technische sowie inhaltliche Grundlage für die in Kapitel 3 verglichenen und in Kapitel 4 sowie 5 erarbeitete Bewertungsmethode dar.

Der allgemeine Ansatz zur Beschreibung von Objekteigenschaften über Merkmale sowie deren Ausprägungen formuliert die DIN 55350 zum Qualitätsmanagement. Diese DIN weist dabei auf den Vorteil von quantitativen Merkmalen und Kennzahlen aufgrund des höheren Informationsgehaltes hin, betont jedoch, dass diese empfindlich auf Ergebnisabweichungen reagieren. [DIN-55350]

Grundsätzlich lässt sich innerhalb von Bewertungsmethoden zwischen objektiven und subjektiven Ansätzen unterscheiden sowie den darunter liegenden qualitativen und quantitativen Merkmalen, welche im Rahmen der Methode betrachtet werden. Speziell bei subjektiven Ansätzen ist eine Bewertung durch eine Personengruppe empfehlenswert, um einzelne persönliche Präferenzen und Voreingenommenheit

bestmöglich zu eliminieren und somit ein objektiveres und damit vergleichbareres Ergebnis zu erreichen. Zudem kann bei Systembetrachtungen die Vorgehensweise der Bewertung in einem Top-Down⁵ Verfahren und somit vom Gesamtsystem bis hinunter zu einzelnen Systemteilobjekten erfolgen bzw. bei Bottom-Up⁶ Vorgehen von den einzelnen Systemteilobjekten hinauf zum Gesamtsysteme. [War-2021, S. 309f.]

Die meisten nichtmonetären Bewertungsmethoden beschäftigen sich damit, wie unterschiedliche Kriterien miteinander kombiniert bzw. gewichtet werden können [Büs-2004, S. 55ff.]. Diese individuelle Gewichtung ist aufgrund der zumeist unterschiedlichen Bedeutung der Kriterien notwendig und stellt nach bzw. neben der Ermittlung der Ausprägung der Kriterien den entscheidenden Schritt in vielen Bewertungsverfahren dar [War-2021, S. 311]. Entsprechend ergibt sich für die Berechnung eines Bewertungsergebnisses BE , welches bei linearer Abhängigkeit aus einzelnen Kriterien K_i und deren individuellen Gewichtungen g_i besteht, Formel (2-1).

$$BE = \sum_{i=1}^n g_i \cdot K_i \quad (2-1)$$

Entsprechend des im obigen Abschnitt dargestellten zweistufigen Ablaufs aus Kriterienermittlung/-bewertung sowie anschließender Gewichtung folgen an dieser Stelle eine Auswahl an innerhalb der Literatur weitverbreiteten Methoden zur Gewichtung von Bewertungskriterien [Büs-2004, S. 56; War-2021, S. 313; TU -2016].

Ein einfaches und schnelles Verfahren zur direkten Gegenüberstellung von Bewertungskriterien liefert der *Paarweise Vergleich*. Dabei werden die vorhandenen Kriterien in einer Matrix miteinander verglichen und das nach subjektiver Auffassung wichtigere Kriterium mit einem „+“ vermerkt. Eine Weiterentwicklung stellt die *Präferenz- bzw. Bewertungsmatrix* dar [Dey-1977]. Dabei analog zum Paarweisen Vergleich Kriterien in einer Matrix vergleichen. Zentraler Unterschied besteht darin, dass in der Matrix nicht das gewinnende Kriterium vermerkt wird, sondern ein „+“ beim subjektiv besser bewerteten Kriterium sowie ein „-“ beim schlechteren Kriterium. Bei Gleichheit wird ein „0“ vermerkt. Anschließend erfolgt erneut das Zählen der „+“, um eine nuancierte Rangfolge zu ermitteln. In Abbildung 2-14 sind sowohl der Paarweise Vergleich, als auch die Bewertungsmatrix dargestellt. Nach Abschluss dieses Vergleichs kann die relative Wichtigkeit eines jeden Kriteriums durch die Anzahl an gewonnenen Vergleichen in Relation zu den anderen Kriterien geschlussfolgert werden.

⁵ Aus dem englischen beschreibt „top-down“ das deutsche „[von] oben [nach] unten“ bzw. „abwärts“

⁶ Aus dem englischen beschreibt „bottom-up“ das deutsche „[von] unten [nach] oben“ bzw. „aufwärts“

Großer Nachteil dieser Methoden ist, dass als Endergebnis nur eine Rangfolge und keine Gewichtung der Kriterien ermittelt werden kann. [War-2021, S. 314ff.]

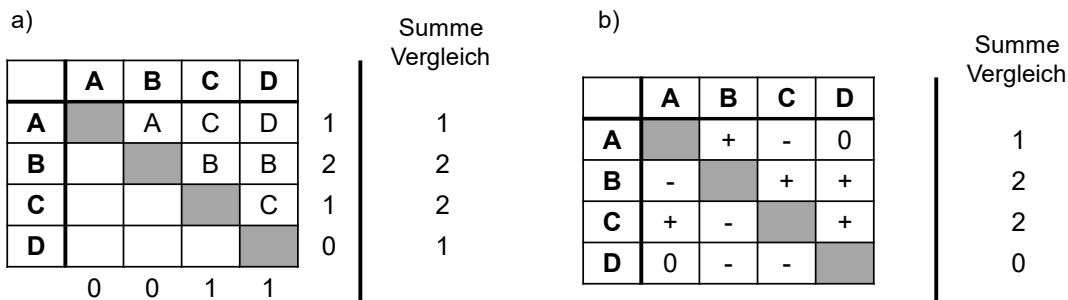


Abbildung 2-14: Ablauf Paarweiser Vergleich a) und Bewertungsmatrix in Anlehnung an [War-2021, S. 315; War-2021, S. 322]

Eine weit verbreitete Methode ist die im Rahmen der Dissertation von Zangemeister entwickelte und vorgestellte *Nutzwertanalyse* [Zan-1970]. Dieser an sich subjektive Bewertungsansatz ist durch das hohe Maß an Formalisierung und Strukturierung gezielt objektiviert worden [Büs-2004, S. 54]. Dabei werden über einen möglichst transparenten Entscheidungsvorgang die Gewichtungen von Zielkriterien so ermittelt, sodass diese addiert 100% ergeben [War-2021, S. 317]. Anschließend werden die gewichteten Zielkriterien zu einem Nutzwert addiert, welcher wiederum mit anderen Nutzwerten verglichen werden kann [War-2021, S. 317f.]. Anforderung an einen entsprechenden Entscheidungsvorgang ist die fachliche Kompetenz der durchzuführenden Personen, weswegen häufig Schätzverfahren wie die Delphi-Methode⁷ eingesetzt werden [Küh-2021, S. 20ff.]. Eine mehrstufige Variante der Nutzwertanalyse stellt die Analytic-Hierarchy-Process-Technik⁸, kurz AHP-Technik, dar, welche die einzelnen Entscheidungskriterien bei Bedarf selbst als Ergebnisse einer Nutzwertanalyse sieht [Büs-2004, S. 60f.]. Beispielhaft sind die AHP-Technik b) und die Nutzwertanalyse a) in Abbildung 2-15 dargestellt.

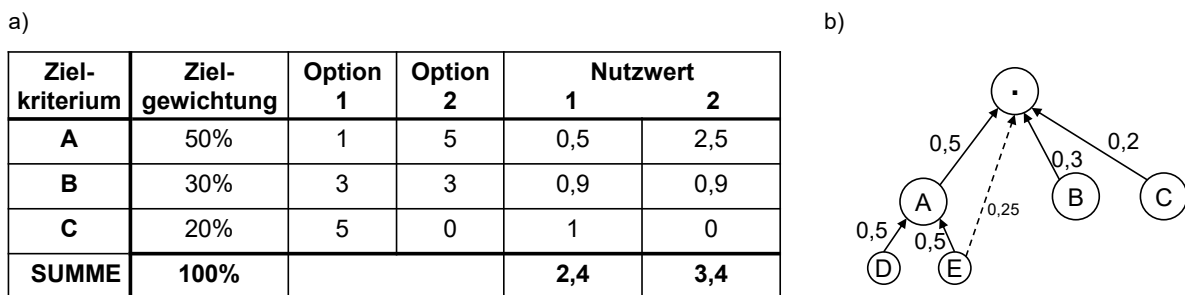


Abbildung 2-15: Nutzwertanalyse a) und AHP-Technik b) in Anlehnung an [Büs-2004].

⁷ Mehrstufiges Schätzverfahren in Expertenrunden zur Ermittlung eines Gruppenkonsens. [Häd-2002].

⁸ Ursprünglich 1980 von Saaty mit dem Ziel entwickelt, bei komplexen Entscheidungsprozessen Analytik, Hierarchie und Prozess konsequent zu berücksichtigen [Saa-1980].

3 Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Forschung und Technik zur Analyse und Bewertung der Wandlungsfähigkeit von produzierenden Unternehmen dargestellt. Aus diesem Überblick wird anschließend die bestehende Forschungslücke erarbeitet und diese Thesis mitsamt ihrer Zielsetzung thematisch eingeordnet. Alle visualisierenden Darstellungen dieses Abschnitts können unter Anhang D gefunden werden.

3.1 Vorarbeiten am Lehrstuhl fml

Die studentischen Vorarbeiten sowie das übergreifende Dissertationsprojekt *Wandlungsfähige Produktionslogistikkonzepte für die Integration alternativer Produktkonzepte in die variantenreiche Nutzfahrzeugproduktion* der Betreuerin dieser Arbeit Frau Pia Vollmuth werden innerhalb dieses Abschnitts kurz zusammengefasst.

Forschungsprojekt Wandlungsfähige Logistikkonzepte, Pia Vollmuth

Ausgangspunkt dieses Forschungsprojektes waren die neuen Anforderungen an die Produktion von Nutzfahrzeugen durch die Integration von elektrischer Antriebstechnik in bestehende Fahrzeugkonzepte und Produktionslinien. Das Projekt entstammt aus einer Kooperation der TU München sowie der MAN Truck & Bus SE und wird in Form einer Dissertation unter der Leitung von Pia Vollmuth M.Sc. abgearbeitet. Das Ziel des Forschungsprojektes ist es wandlungsfähige Produktionslogistikkonzepte für die Nutzfahrzeugproduktion zu entwickeln, zu bewerten und auszuwählen. [Vol-2023]

Analyse und Bewertung der Veränderungsfähigkeit in Fabrikssystemen, Franjo Bartol – 2022

Franjo Bartols Arbeit stellt eine Ausnahme zu den anderen studentischen Vorarbeiten dar, da diese nicht unter Betreuung von Pia Vollmuth verfasst wurde, jedoch Kontakt und Experteninterview-Input bestand und den Fokus auf Veränderungspotenzial von Fabrikssysteme als Ganzes und nicht der Wandlungsfähigkeit von Produktionslogistik legt. Das von Ihm entwickelte Vorgehen teilt sich in eine Analysemethode, welche in Anlehnung an Hernandez, die Fabrikobjekte, deren Befähiger sowie Rezeptoren systematisiert, sowie eine Evaluationsmethode zur Bewertung und Zusammenführung dieser Aspekte in eine gesamtheitliche Betrachtung auf. [Bar-2022]

Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Identifikation und Bewertung des Wandlungsbedarfs in der Produktionslogistik, Daniel Reitz – 2023

Daniel Reitz fokussiert sich auf eine Betrachtung und Bewertung von Wandlungsbedarf in PLS. Seine Arbeit adaptiert die Methode der Balanced-Score-Card sowie das Bewertungsvorgehen für Kommissioniersysteme aus der Arbeit von Heine zur Ermittlung von Wandlungsbedarfen anhand von Trendverläufen und Systemtoleranzen bezüglich spezifischer Dimensionen in der Logistik. Eine technische Betrachtung des Wandlungspotenzials von PLS ist nicht Teil seiner Arbeit. [Rei-2023]

Anforderungsanalyse zur wandlungsfähigen Logistik in der Nutzfahrzeugindustrie unter Ermittlung und Bewertung von Wandlungstreibern und -befähigern, Sebastian Buchwald – 2022

In Sebastian Buchwalds Masterarbeit wird eine Methode zur Ermittlung von Anforderungen an eine zukünftige wandlungsfähige Logistik im Nutzfahrzeugbereich erarbeitet. Sein Vorgehen sieht als zentrale Ansätze Expertengespräche, Fragenkataloge und Szenarienbildung vor, um aus diesen Anforderungen abzuleiten. Diese Anforderungen können anschließend in Ebenen, Elementen und Treibern klassifiziert und jeweils einem Befähiger gegenübergestellt werden. [Buc-2022]

Entwicklung eines Gestaltungsrahmens zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit der Produktionslogistik bei einem Nutzfahrzeughersteller, Lasse Bethäuser – 2023

Das Ziel von Lasse Bethäuser war es Gestaltungsmöglichkeiten zur Steigerung der WF von Produktionslogistikobjekten zu ermitteln und die Umsetzung und Auswahl dieser Maßnahmen zu Systematisieren. Dazu entwickelte er einen hierarchischen Katalog zu den Gestaltungselementen von PLS inkl. derer WB erster und zweiter Ordnung in den Gestaltungsfeldern Technik, Raum und Organisation. Aus diesem Katalog können die individuellen WO, Gestaltungsprinzipien und potenzielle Gestaltungsmaßnahmen abgeleitet werden, welche anschließend hinsichtlich zeitlicher und aufwandsspezifischer Aspekte bewertet werden können. [Bet-2023]

Zusammengefasst behandelt nur Franjo Bartel eine technische Bewertung der WF, dies jedoch übergreifend für eine Fabrik ohne spezifischen Fokus auf die PLS. Die Arbeiten unter Betreuung von Pia Vollmuth behandeln bis dato nicht alle Teilbereiche Wandlungsfähigkeit innerhalb der Produktionslogistik und stellen somit gesamtheitliche Anknüpfungspunkte für diese Masterthesis dar.

3.2 Allgemeine Betrachtung der Wandlungsfähigkeit

3.2.1 Wandlungsfähigkeit in der Fabrik und Produktion

Als zentrale Arbeiten zur Betrachtung der WF von Fabrik- und Produktionssystemen gelten die im Folgenden detaillierter vorgestellten Publikationen.

Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung, Hernandez – 2003

Mit seiner Arbeit legte Hernandez 2003 den Grundstein für eine systematische Betrachtung von wandlungsfähigen Produktionssystemen. Seine Dissertation verfolgt das Ziel die WF als Systemeigenschaft von Fabriken zu definieren und somit für die Fabrikplanung analysierbar zu machen [Her-2003, S. 10f.]. Ausgehend von der Allgemeinen Systemtheorie der Technik nach Ropohl entwickelt er die bereits in 2.2 vorgestellten Konzepte des Wandlungsbedarfs, Wandlungsobjekte und Wandlungsbefähiger [Her-2003, S. 63]. Dabei definiert er den Wandel als einen Transformationsprozess innerhalb der Fabrikplanung zwischen Ausgangs- und Zielzustand [Her-2003, S. 47f.], dessen Erfolg von der Prozessfähigkeit (Effektivität) sowie Prozessbeherrschung (Effizienz) und somit technischen als auch sozialen Faktoren abhängt, was analog in Abbildung 8-1 dargestellt ist [Her-2003, S. 49f.]. Seine Differenzierung des Wandels in den Dimensionen Organisation, Technik und Raum sowie zeitlich nach kurzfristig/operativ, mittelfristig/taktisch und langfristig/strategisch [Her-2003, S. 57] hat auch in aktuellen Betrachtungen noch Bestand [Wie-2014, S. 141ff.]. Als zentralen Ansatz zur Planung der WF und der Ableitung des Wandlungsbedarfs sieht er die qualitative Methode der Szenarioanalyse, welche er in den Gesamttafel der Fabrikplanung integriert, [Her-2003, S. 92ff.] sowie die gesamtheitliche Betrachtung des Wandels im Sinne eines Regelkreises, analog zu Abbildung 2-10.

Wandlungsfähige Produktionsunternehmen – Das Stuttgarter Unternehmensmodell, Westkämper und Zahn – 2009

Ziel dieses Modells ist es produzierenden Unternehmen einen Leitfaden an die Hand zu geben, mit dem diese sich und ihre Produktion robust gegenüber einem turbulenten Umfeld gestalten können [Wes-2009, S. 1ff.]. Hauptaspekte sind die Betrachtung des Unternehmens als ganzheitliches Konstrukt aus sozialen, technischen und organisatorischen Bausteinen [Wes-2009, S. 25ff.] sowie einer grundsätzlich notwendigen Fähigkeit der Anpassung und Veränderung zur Begegnung von dynamischen Anforderungen [Wes-2009, S. 18ff.]. Dies kann seiner Auffassung nach nur erreicht werden, wenn diese komplexen Bausteine von sich aus eigenständig organisiert und optimiert werden können [Wes-2009, S. 47]. Analog zu Hernandez identifiziert Westkämper ausgehend von einer systemtheoretischen Betrachtung

[Wes-2009, S. 57] als zentrale Ansatzpunkte für Unternehmen die Faktoren Technologieintegration [Wes-2009, S. 115ff.], Mitarbeiterbefähigung und -partizipation [Wes-2009, S. 139ff.] sowie Wissensmanagement und Lernen [Wes-2009, S. 186ff.].

Wandlungsförderliche Prozessarchitekturen, Nyhuis et al. – 2010 bis 2013

Das Forschungsprojekt Wandlungsförderliche Prozessarchitekturen (WaProTek) hatte das Ziel produzierenden Unternehmen zu ermöglichen eben diese Konzepte in ihrer Produktion zu ermitteln, zu bewerten und zu gestalten [IFA-2011]. Zentraler Ansatzpunkt ist der von Nyhuis et al. entwickelte mehrstufige Regelkreis der Wandlungsfähigkeit, welcher in Abbildung 3-1 dargestellt ist [Nyh-2010b, S. 8]. Angelehnt an einen Regelkreis legt diese Methode einen Hauptfokus auf den Soll-Ist-Abgleich aus Anforderungen und den diesen gegenüberstehenden WB zur Analyse und Bewertung des benötigten Wandlungsbedarfs [Nyh-2013, S. 29]. Basierend auf diesen Abgleich wird in weiteren Entscheidungsprozessen die vorhandene Flexibilität bzw. wenn diese nicht ausreicht die WF des Systems genutzt, um den geänderten Anforderungen zu begegnen [Nyh-2013, S. 29f.]. Zur Nutzung der WF muss jedoch zunächst sichergestellt sein, dass das System sowohl technisch als auch zeitlich und wirtschaftlich auf den bzw. die Treiber reagieren kann und somit eine „ausreichende Wandlungsfähigkeit“ vorhanden ist [Nyh-2013, S. 44]. Andernfalls muss die WF des Systems über die WB, im ganz rechten Pfad, gestaltet werden [Nyh-2013, S. 46ff.].

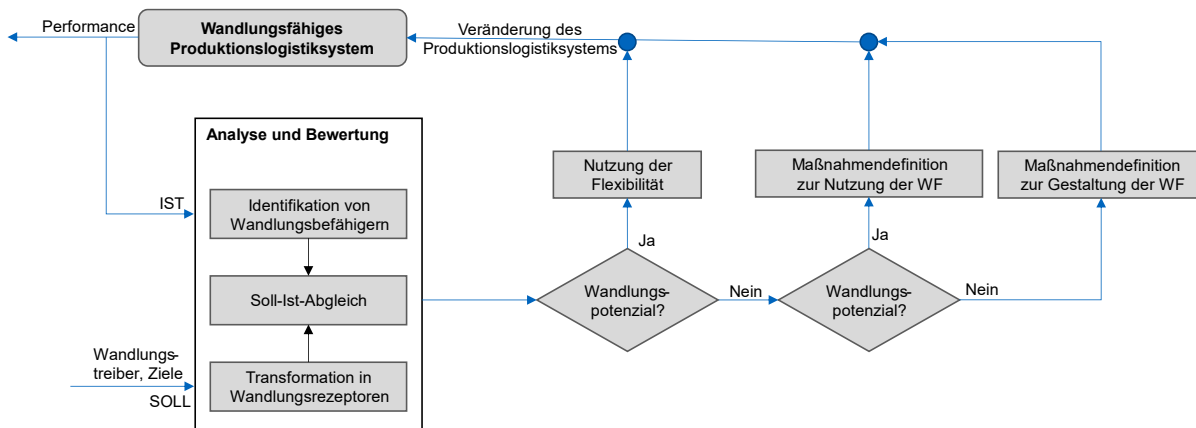


Abbildung 3-1: Regelkreis der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Nyh-2010b, S. 9]

Speziell im Bereich der Logistik schlagen Nyhuis et al. eine Betrachtung auf den drei in aufsteigender Reihenfolge genannten Ebenen Logistikparameter, Logistikaufgaben sowie Logistikstruktur und deren Gestaltungselementen vor [Nyh-2013, S. 118f.]. Zur Identifikation von Wandlungspotenzial und Begegnung von Wandlungsbedarf, sollte diese Struktur zunächst von Unten nach Oben durchlaufen werden, da Gestaltungselemente auf einer unteren Ebene mit geringeren Aufwand angepasst werden können, sowie anschließend von Oben nach Unten, um die Maßnahmen gesamtlogistisch auszuarbeiten [Nyh-2013, S. 120]. Dieses Vorgehen analysiert und

gestaltet somit vornehmlich den organisatorischen Aspekt der Logistik, da Nyhuis et al. die technisch operativen Gesichtspunkte wie z.B. Transportmittel unter dem Gestaltungselement Technologie aufführen [Nyh-2013, S. 21].

Handbuch Fabrikplanung, Wiendahl – 2014

Ziel dieser Fachliteratur ist ein Vorgehen zu beschreiben mit dem Unternehmen und Dienstleister die neue zusätzliche Zielgröße WF in den klassischen Fabrikplanungsprozess aufnehmen können [Wie-2014, S. Vf.]. Die Grundzüge zur Beschreibung der WF übernimmt Wiendahl zu großen Teilen aus den Arbeiten von Hernandez, Heger sowie Nyhuis [Wie-2014, S. 128ff.] und setzt eine marktorientierte strategische WF ins Zentrum der Wettbewerbsfähigkeit einer zukunftsfähigen Produktionsstätte [Wie-2014, S. 15]. Diese Fabrik der Zukunft muss sich anhand von Produkten ausrichten und eine angemessene Wirtschaftlichkeit in allen Ebenen und Bereichen aufweisen [Wie-2014, S. 147]. Der klassisch sequenzielle, in Produktion und Gebäude geteilte, Fabrikplanungsprozess führt seiner Ansicht nach in vielen Fällen zu Ineffizienzen mit einer großen Anzahl an Schnittstellen sowie Mängeln in Aspekten wie z.B. der WF, welche den wechselnden Umfeldanforderungen in ihrer Gesamtlebenszeit nicht gerecht werden [Wie-2014, S. 449]. Aus diesem Grund schlägt er als neuen Ansatz eine Synergetische Fabrikplanung vor [Wie-2014, S. 450]. Diese integriert die technisch organisatorische Produktionsplanung mit der technisch räumlichen Objektplanung nach HOAI⁹ in ein strukturiertes Vorgehen in Anlehnung an die VDI 5200, welches definierte Austauschprozesse und gemeinsame Meilensteine in den Vordergrund stellt [Wie-2014, S. 453ff.].

3.2.2 Wandlungsfähigkeit in der (Produktions-)Logistik

Neben diesen übergreifenden Arbeiten existieren auch Publikationen, welche sich vornehmlich mit dem Bereich der (Produktions-)Logistik und somit dem Fokusthema dieser Thesis beschäftigen. Arbeit mit wesentlichem Fokus auf Wertschöpfungsnetzwerke oder Supply-Chain-Management werden kontextbezogen nicht weiter betrachtet.

Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienfertigung, Dürrschmidt – 2001

Dürrschmidts Dissertation aus dem Jahr 2001 mit Hauptfokus auf die WF von Logistiksystemen stellt zu Beginn der WF-Forschung, nach ihm, die erste umfassende Arbeit in diesem Bereich dar [Dür-2001, S. 48]. Die Notwendigkeit sieht er darin, dass

⁹ Kurzform der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure

sich extern ein Wandel vom Verkäufer- zum Käufer-Markt vollzogen hat [Dür-2001, S. 1] und somit die Logistikleistung für Unternehmen ein entscheidender Wettbewerbsfaktor geworden ist [Dür-2001, S. 3]. Dürrschmidt ist dabei der Auffassung, dass das in einem System vorhandene Wandlungspotenzial nicht gemessen werden kann, da die WF in Dimension und Richtung lösungsneutral ist [Dür-2001, S. 18f.]. Dementsprechend fokussiert er seine Arbeit darauf eine Methode zu entwickeln, mit der Logistiksysteme in einer variantenreichen Serienfertigung modelliert, geplant und betrieben werden können [Dür-2001, S. 4]. Die Modellierung des Systems soll die Transparenz erhöhen [Dür-2001, S. 71] und kann maßgeblich dadurch erreicht werden, dass in einer hierarchischen Betrachtungsweise die einzelnen (Sub-)Systeme in ihre bestehenden Logistikbausteine heruntergebrochen [Dür-2001, S. 78] und zur Leistungsbemessung mit Kennzahlen versehen werden [Dür-2001, S. 75ff.]. In seiner Methode stellt er eine Betrachtung der Flexibilität als zusätzlichen Schritt zwischen der Planungsvorbereitung und Grobplanung vor, da Wandlungs- bzw. Reaktionsfähigkeit auf, zum Zeitpunkt der Planung, unbekannte Anforderungen reagiert und somit nicht gesamtheitlich eingeplant werden kann [Dür-2001, S. 91ff.]. Die WF des Systems wird dadurch erreicht, dass bereits in der Planung ein umfangreiches Systemmodell mitsamt Controlling erstellt wird [Dür-2001, S. 91] und dieses im Betrieb durch Monitoring von externen Umfeldanforderungen und internen Kenngrößen [Dür-2001, S. 81f.] proaktiv und reaktiv dem auftretenden Wandlungsbedarf mit definierten Strategien entgegensteuert [Dür-2001, S. 128f.].

Wertbeitrag einer wandlungsfähigen Logistik, Rosentritt et al. – 2009

Zielsetzung dieser Publikation war eine Methode zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von logistischer WF zu entwickeln, da diese speziell im B2B-Kontext zunehmend an Bedeutung gewonnen hat [Ros-2009, S. 452]. Für Unternehmen definieren sie die *logistische Wandlungsfähigkeit* als „Möglichkeit zur schnellen und aufwandsarmen Anpassung der logistischen Strukturen und Prozesse“ [Ros-2009, S. 453]. Die wirtschaftliche Beurteilung der WF von Logistiksystemen erfolgt dabei durch Vergleich von Handlungsoptionen mit einem Ist-Zustand, welcher die absolute Stillhaltealternative darstellt, und der Anwendung des Economic Value Added-Konzepts [Ros-2009, S. 453f.]. Hierbei fließen die Anfangsinvestition für die wandlungsfähige Lösung, die unterschiedlichen Aufwände und wirtschaftlichen Risiken im Falle einer Anpassung sowie der Nutzen durch die wandlungsfähige Logistik in die Berechnung mit ein [Ros-2009, S. 456]. Mithilfe einer Szenariobetrachtung, welche die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt eines Wandels über die zukünftigen Perioden berücksichtigt, wird schließlich der Wertbeitrag einer wandlungsfähigen Logistik berechnet [Ros-2009, S. 455f.]. Die vorgestellte Methode ermöglicht es produzierende Unternehmen eine Kosten-Nutzen-basierte Investitionsentscheidung in Handlungsmöglichkeiten zur Steigerung der eigenen

logistischen Wandlungsfähigkeit zu treffen [Ros-2009, S. 457] und kann somit nach Abbildung 3-1 in den Bereich der Gestaltung der WF eingeordnet werden.

Wandlungsfähige Produktionslogistik, Bertsch und Nyhuis – 2011

Bertsch und Nyhuis postulieren, dass WF zwar im Bereich der Fabrikplanung bekannt, jedoch für PLS noch nicht weit verbreitet ist [Ber-2011, S. 630]. Aus diesem Grund sehen Sie die Notwendigkeit den Regelkreis der WF aus dem WaProTek-Projekt, siehe Abbildung 3-1, auf ein etabliertes Logistikkonzept zu adaptieren [Ber-2011, S. 631]. Das entstandene *logistische Wandlungsfähigkeits-Controlling* [Ber-2011, S. 632], dargestellt in Abbildung 8-2, erweitert das klassische Logistik-Controlling um dem Hauptziel der Betriebspunkt-Anpassung von Ist auf Soll um zwei Schleifen, welche die kurz- und langfristig veränderten externen Anforderungen an das System mit der darin vorhanden Flexibilität und WF vergleicht und ableitend davon Maßnahmen zur Systemanpassung entwickelt [Ber-2011, S. 632f.]. Dabei nutzen sie die WF, um mittel- und langfristig die Anforderungen an die Produktionslogistik zu erfüllen, welche außerhalb der Flexibilitätsgrenze PLS liegen [Ber-2011, S. 633]. In allen Fällen muss die resultierende Maßnahmenplanung in Abstimmung mit der Gesamtwirtschaftlichkeit und den Unternehmenszielen erfolgen [Ber-2011, S. 633]. Zukünftigen Forschungsbedarf sehen Sie in datenbasierten Bewertungsansätzen zur effizienten Ableitung von Veränderungsbedarf und zielführenden Maßnahmenumsetzung [Ber-2011, S. 634].

Gestaltung und Nutzung produktionslogistischer Wandlungsfähigkeit, Bertsch und Nyhuis – 2012

Fortführend zu Ihrer eben erläuterten Publikation von 2011 stellten Bertsch und Nyhuis im Jahre 2012 eine Methode zur Gestaltung und Nutzung produktionslogistischer WF vor [Ber-2012]. Sie identifizieren dabei *Stückzahl*, *Zeit*, *Produkt* und *Kostenstruktur* als die Dimensionen, in denen logistische Veränderung auftritt [Ber-2012, S. 438] und betrachten somit in Analogie zur Interpretation der Wandlungstreibern von Cisek et al. und Möller aus Kapitel 2.2.2 die Rezeptoren Technologie und Qualität für die Produktionslogistik nicht. Sobald in einer dieser Dimensionen die Systemflexibilität nicht mehr genügt, um die Anforderungen zu erfüllen entsteht ein Wandlungsbedarf, welcher systemseitig durch Änderungen am PLS bedient werden [Ber-2012, S. 438]. Die dabei aktivierte WF bestimmt sich aus der Summe der maximal veränderlichen Flexibilitätsskorridore und in welchen zeitlichen bzw. monetären Aufwand diese erreicht werden können [Ber-2012, S. 438]. Die WF eines PLS ergibt sich dann aus der WF der darin enthaltenen Teilsysteme bzw. Objekte und kann somit nach Auffassung von Bertsch und Nyhuis durch fehlende WF einzelner Elemente stark negativ beeinflusst werden [Ber-2012, S. 439]. Sie unterscheiden dabei zwischen einer lösungsneutralen,

ungerichteten und einer spezifischen gerichteten Wandlungsfähigkeit [Ber-2012, S. 439]. Zur Gestaltung der gerichteten WF folgen Sie dem Konzept der WB, siehe Abschnitt 2.2.3, und verweisen auf die bereits in 3.2.1 innerhalb des WaProTek-Projekts vorgestellten Möglichkeit mit Fokus auf Gestaltungselementen und deren Elementkonfigurationen. Bertsch und Nyhuis schlagen deswegen eine Methodik vor, welche zunächst relevante Treiber sowie deren Einfluss auf PLS identifiziert, anschließend die optimale Ausprägung der Gestaltungselemente ableitet und durch Konfiguration der Elemente die logistischen Dimensionen des Wandels somit an die veränderten Anforderungen anpasst [Ber-2012, S. 440f.]. Dieses Vorgehen sowie mögliche Gestaltungselemente und deren Konfigurationen zeigt Abbildung 8-3.

Logistische Wandlungsbefähiger, Steffens – 2014

Steffens Dissertation fokussiert sich vornehmlich auf die praktische Gestaltung von WB innerhalb übergreifender industrieller Logistiksysteme – siehe Abbildung 2-4 [Ste-2014, S. 2ff.]. Sie identifiziert ausgehend von einer umfassenden Literaturrecherche, dass der Themenbereich WF zwar in vielfältigen Publikationen rund um die Fabrikplanung und -betrieb behandelt wird, diese jedoch zumeist nur implizit die konkreten Anforderungen und Randbedingungen der industriellen Logistik betrachten und die verknüpften Felder Flexibilität, Agilität und Wandlungsfähigkeit abgegrenzt voneinander untersuchen [Ste-2014, S. 98ff.]. Zudem schlussfolgert Steffens, dass eine Konzentration auf die Gestaltung bzw. Verbesserung der eigenen (logistischen) Ressourcen speziell in Bezug auf WF Unternehmen essentielle Wettbewerbsvorteile ermöglicht [Ste-2014, S. 116f.]. Das von ihr entwickelte Gestaltungsmodell kombiniert dabei die Ansätze des Stuttgarter Unternehmensmodells mit dem Regelkreis der Wandlungsfähigkeit sowie den Grundstrukturen der industriellen Logistik, und spezifiziert sowohl ein Monitoring der aktuellen Systemzustände und – Anforderungen sowie ein daraus abgeleitetes Design der WB [Ste-2014, S. 127ff.], dargestellt in Abbildung 8-4.

Zur Gestaltung der WF untersucht sie zudem die Wechselwirkungen der WB und kommt zu der Schlussfolgerung, dass die Kompatibilität von Systemen den Grundbaustein für WF legt und alle anderen WB fördert [Ste-2014, S. 158]. Dementsprechend sollte bei der Gestaltung der WF zunächst diejenigen WB betrachtet werden, welche förderlich für die anderen sind [Ste-2014, S. 212f.]. Eine Übersicht zu den Wechselwirkungen gibt Tabelle 3-1. Diese Zusammenhänge bieten jedoch keine Rückschlüsse darüber welche Relevanz die einzelnen WB für das jeweilige Logistiksystem bzw. dessen Anforderungen an die WF haben sondern stellt rein gestalterische Möglichkeiten dar [Ste-2014, S. 160].

Tabelle 3-1: Förderliche Wechselwirkungen der Wandlungsbefähiger nach [Ste-2014, S. 158]

-- Fördert →	Kompatibilität	Modularität	Mobilität	Universalität	Skalierbarkeit
Kompatibilität		X	X	X	X
Modularität			X	X	X
Mobilität				X	X
Universalität					X
Skalierbarkeit					

3.2.3 Zusammenfassung

Zusammengefasst lassen sich aus dieser allgemeinen Betrachtung zur WF in Fabrik, Produktion und Logistik folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- WF ist eine strategische Zielgröße, betrifft ein Unternehmen gesamtheitlich und kann nur durch Zusammenspiel der technischen, organisatorischen sowie räumlichen Gegebenheiten und Teilobjekte zielführend eingesetzt werden.
- Speziell in Bezug auf PLS existieren nur wenige Arbeiten, welche sich mit dem Thema der WF beschäftigen, trotz der steigenden wirtschaftlichen und wettbewerblichen Relevanz dieses Bereichs in den letzten Jahrzehnten.
- Zur gesamtheitlichen Betrachtung und Umsetzung der WF bieten sich Regelkreis-ähnliche Strukturen in Unternehmen an, welche durch Abgleich von Soll-Anforderungen und Ist-Zuständen Wandlungsbedarfe identifizieren und diese Differenz durch Maßnahmendefinition und -umsetzung reduzieren.
- Die Systematik der WF aus Wandlungstreiber bzw. Rezeptoren, WB und WO findet etabliert Anwendung in annähernd allen Publikationen und ist unter gewissen Adaptionen auch im Bereich von PLS fester Bestandteil vieler Methoden und Konzepte. Insgesamt herrschen jedoch unterschiedliche Auffassungen über die Relevanz und Wechselwirkung dieser Aspekte.

3.3 Bewertungsansätze für Wandlungsfähigkeit

3.3.1 Monetäre Betrachtung

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf einer technischen Bewertung der Wandlungsfähigkeit, jedoch sind wirtschaftliche Aspekte bei der Ableitung und Umsetzung von wandlungsfördernden Maßnahmen im unternehmerischen Sinne nicht außer Acht zu lassen, weswegen dieser Abschnitt einen kurzen Überblick aus ausgewählten Publikationen gibt sowie eine daraus resultierende Schlussfolgerung erarbeitet.

Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme, Möller – 2008

Möller sieht die WF als Befähiger einer effizienten Produktion [Möl-2008, S. 2], da diese bei einer Veränderung zu geringeren Umstellungskosten und gesamtlebenszyklus-betrachtend einem höheren Nutzen führt [Möl-2008, S. 3]. Jedoch kann WF zumeist nur auf Kosten erhöhter Anfangsinvestitionen erreicht werden [Möl-2008, S. 3], wodurch er sich als Ziel setzt eine Methode zu entwickeln, mit der ein optimaler WF-Grad für Produktionssysteme ermittelt werden kann [Möl-2008, S. 5]. Er fügt zudem an, dass im Vergleich zur WF Flexibilität mit erhöhten Betriebskosten einhergeht, jedoch der Veränderungsprozess ohne nennenswerten Aufwand oder Investitionen durchführbar ist [Möl-2008, S. 19]. Zur Ermittlung dieses Optimums müssen nach Möller sowohl Aspekte aus einer unsicherheitsbehafteten Investitionsbewertung als auch aus einer Lebenszyklusanalyse betrachtet werden [Möl-2008, S. 27], wodurch er die Methode der Realoptionstheorie zum Vergleich unterschiedlicher technischer Alternativen in den Mittelpunkt seiner Bewertung stellt [Möl-2008, S. 6]. Er schlägt eine Adaption der Realoptionstheorie vor, da diese in ihrer Ursprungsform mit hoher Komplexität und zeitlichem Aufwand verbunden ist [Möl-2008, S. 84ff.], welche in einem dreistufigen Vorgehen aus Modellierung, Bewertung und Analyse die Realoptionswerte der potentiellen Alternativen ermittelt und dadurch quantitativ nutzbar macht [Möl-2008, S. 87f.]. Zur Reduzierung des verbleibenden hohen rechnerischen Aufwands entwickelte Möller zusammen mit der Siemens AG ein Softwarewerkzeug - PLANTCALC™¹⁰, welches die Ermittlung der Realoptionswerte für Anwender unterstützen sollte [Möl-2008, S. 161].

Vorgehen zur kostentechnischen Beurteilung wandlungsfähiger Gestaltungsalternativen, Zwißler und Gebhardt – 2013

Zwißler und Gebhardt stellen einen betriebswissenschaftlichen Ansatz zur kostentechnischen Beurteilung der WF in Produktionssystemen vor [Zwi-2013]. Die Hypothese ihrer Arbeit besteht darin, dass wandlungsfördernde Gestaltungsalternativen ihre erforderlichen Investitionen durch geringere Wandlungsprozess-Kosten über einen gesamten Lebenszyklus amortisieren können [Zwi-2013, S. 315]. Neben diesem Kostenvorteil garantieren diese Optionen nach dem Wandel keine höhere Systemperformance im Vergleich zu wandlungsträgen Alternativen [Zwi-2013, S. 315]. Die von ihnen erarbeitete Kostenvergleichsrechnung baut dabei auf den von Wiendahl und Heger übernommenen Grundprinzip der

¹⁰ Unter diesen Namen konnte im Rahmen der Recherche dieser Arbeit keine weiterhin vertriebene Software gefunden werden. Vermutlich finden Teilelemente der Methode in anderen Softwarelösungen für die Fabrikplanung der Siemens AG Anwendung. Dies konnte auf Anfrage jedoch weder bestätigt noch widerlegt werden.

Wandlungskosten als Summe aus Ursprungsinvestment (Wandlungsobjektkosten) und Kosten durch den Wandel (Wandlungsprozesskosten) auf [Zwi-2013, S. 316]. Das so entwickelte Kostenmanagement vergleicht über eine lebenszyklusbezogene Gesamtkostenbetrachtung die Stillhaltealternative des Unternehmens mit möglichen wandlungsfördernden Handlungsmaßnahmen und den aus Rezeptoren prognostizierten Wandel, um so eine quantitative betriebswissenschaftliche Entscheidungsbasis zu erarbeiten [Zwi-2013, S. 316f.].

Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis unscharfer Daten, Hawer – 2020

Hawers Ausgangspunkt ist die Annahme, dass Unsicherheit und Unschärfe während der Fabrikplanung durch Veränderungsfähigkeit kompensiert werden kann [Haw-2020, S. 2] und damit einem produzierenden Unternehmen eine Möglichkeit gibt Sicherheitsreserven aufzubauen. Sein Ziel war es eine Planungsmethodik zu entwickeln, mit der ein optimales Maß an Veränderungsbefähigern¹¹ unter Bezugnahme von Realisierungskosten und Nutzen durch Aufbau von Sicherheitsreserven ermittelt werden kann [Haw-2020, S. 3f.]. Hawers Vorgehen modelliert zunächst Unschärfe-Faktoren und leitet basierend darauf mögliche Veränderungsbefähiger-Kombinationen ab, welche schlussendlich über eine Kapitalwertmethode miteinander bewertet und verglichen werden [Haw-2020, S. 73ff.]. Er betrachtet die Veränderungsbefähiger bis auf sekundärer und tertiärer Ebene, um konkret praktische Lösungsansätze zu finden und normiert mögliche Ist- mit aus den Unschärfe-Faktoren abgeleiteten Ideal-Werten, um die Erfüllungsgrade der einzelnen Veränderungsbefähiger zu ermitteln [Haw-2020, S. 109f.]. Die von ihm durch Kombination der Veränderungsbefähiger sowie der respektiven Erfüllungsgrade ermittelten Varianten werden wirtschaftlich in den drei Dimensionen Investitionskosten, Umbaukosten und Betriebskosten verglichen [Haw-2020, S. 125f.]. Dieser Vergleich lässt sich als Würfel darstellen, gezeigt in Abbildung 8-5, und gibt Hawer die Möglichkeit wandlungsfähige (blau markiert), flexible (orange markiert) und robuste (dunkel markierte) Systeme durch ihre typischen Ausprägungen in diesen Dimensionen zu klassifizieren. WF Systeme sind dabei charakterisiert durch geringe Umbaukosten, sowie hohe Investitionskosten und niedrige Betriebskosten oder niedrige Investitionskosten und hohe Betriebskosten [Haw-2020, S. 127f.]. Ein Spezialfall stellt das gelb markierte flexible und wandlungsfähige System dar, welches jedoch sowohl hohe Investitions- als auch Betriebskosten besitzt.

¹¹ Hawers allgemeine Bezeichnung für Befähiger von Veränderung in Anlehnung an Veränderungsfähigkeit und Wandlungsbefähiger.

Zusammenfassend können aus diesen drei Publikationen die folgenden essenziellen Erkenntnisse für diese Arbeit abgeleitet werden, welche qualitativ in Abbildung 3-2 dargestellt sind:

- 1) **Nutzen der Wandlungsfähigkeit:** Wandlungsfähigkeit ermöglicht es produzierenden Unternehmen Unsicherheiten in der Planung und Betrieb von Systemen entgegenzuwirken und im Falle eines Wandels kosten- und zeiteffizient zu reagieren.
- 2) **Kosten der Wandlungsfähigkeit:** Wandlungsfähigkeit verursacht erhöhte Kosten in der Realisierung oder dem Betrieb der Systeme.
- 3) **Optimale Wandlungsfähigkeit:** Der optimale Grad der Wandlungsfähigkeit kann aus einer Kosten-Nutzen Abwägung ermittelt werden und ist abhängig von vielen verschiedenen Faktoren. Entsprechende Methoden zur Ableitung dieses Gleichgewichts entwickelten mitunter die vorgestellten Arbeiten.

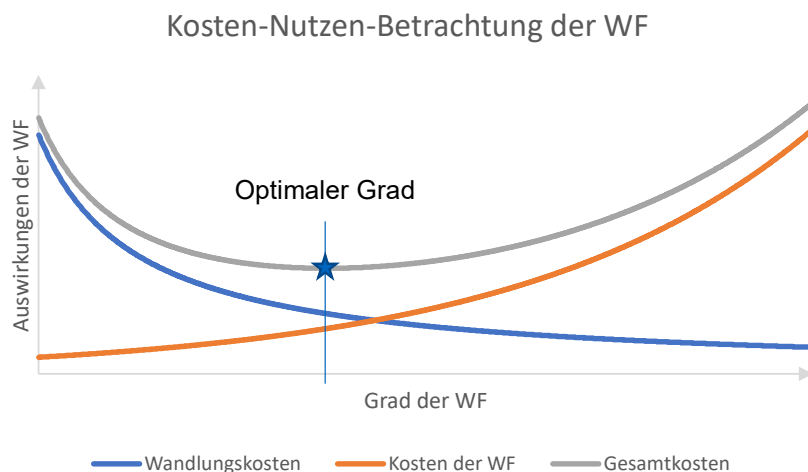


Abbildung 3-2: Qualitative Kosten-Nutzen Betrachtung der Wandlungsfähigkeit

3.3.2 Technische Betrachtung

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Arbeiten aus dem Themengebiet der technischen Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Systemen detaillierter vorgestellt. Am Kapitelende zeigt Abbildung 3-3 eine Übersicht und Kategorisierung dieser sowie weiterer innerhalb der systematischen Literaturrecherche identifizierten Publikationen.

Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung, Hernandez – 2003

Das Problem in der Bewertung und Erfassung von WF sieht er darin, dass diese eine synthetische Metaeigenschaft von Systemen darstellt und deshalb nicht universell gültig gemessen werden kann [Her-2003, S. 83]. Die WF stellt ein abrufbares Potential dar, welches über die WB einem WO zugeordnet werden kann, jedoch fallspezifisch betrachtet werden muss [Her-2003, S. 84]. Sein Ansatz sieht daher eine Bewertung

auf Merkmalsbasis vor, in der ein Gesamtsystem in seine WO hierarchisch und strukturell aufgetrennt wird, welche anschließend mittels ihrer Merkmalsausprägungen in Bezug zu den WB in Skalendarstellung überführt werden müssen [Her-2003, S. 86ff.]. Eine Auswertung kann anschließend durch Kombination und Aggregation der WB und WO auf verschiedenen Ebenen und Kategorien erfolgen [Her-2003, S. 89ff.]. Er stellt dafür jedoch keine Möglichkeit vor, da eine Entscheidung seiner Ansicht nach „aufgabenspezifisch zu treffen ist“ [Her-2003, S. 91] und sein Vorgehen einen „ausbaufähigen methodischen Ansatz darstellt“ [Her-2003, S. 155].

Modulare Gestaltung und ganzheitliche Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme, Drabow – 2006

Drabow unterstützt die Ansichten von Hernandez und postuliert, dass ein universell gültiger Ansatz zur Ermittlung der WF nicht vorhanden ist, da diese als kombinierte Eigenschaft verschiedener Dimensionen nicht einheitlich definiert werden kann [Dra-2006, S. 25]. Zentraler Ansatz zur Gestaltung und Befähigung von WF ist nach ihm die Modularität, da damit Elemente aus dem System entkoppelt werden können [Dra-2006, S. 1]. Zur Aufnahme der WF in Planungsvorhaben muss diese seiner Ansicht nach quantifiziert werden, weshalb er eine merkmalsbezogene Analyse, dargestellt in Abbildung 8-6, erarbeitet und vorstellt [Dra-2006, S. 95f.]. Diese gliedert sich in ein Top-Down Verfahren zur Zielsystembildung sowie Objekt und Merkmalsidentifikation und einer darauf aufbauenden Bottom-Up Bewertung auf Basis von Merkmalsausprägungen, WB sowie einer Ergebnisbildung durch Nutzwert-Verfahren [Dra-2006, S. 97ff.]. Diese Methode dient seiner Ansicht nach vor allem bei der Umplanung bestehender und Entwicklung neuer Fertigungssysteme, um diese wandlungsfähiger zu gestalten [Dra-2006, S. 122].

Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme, Heinecker – 2006

Heinecker fokussiert sich auf die Betrachtung des Wandelbarkeitspotentials von Materialflusssystemen sowie analog zu Drabow den zentralen Gestaltungsfaktor Modularität [Hei-2006, S. 2f.]. Seine Arbeit sortiert sich somit thematisch nahe zu dieser Thesis ein. Sein Ansatz zur Ermittlung des Wandelbarkeitspotentials basiert darauf, dass ein Wandel in den Dimensionen Fördergut, Layout und Durchsatz stattfindet und somit die maßnahmenbezogene Anpassung der gesamthaften Flexibilität in allen diesen Bereichen der Wandelbarkeit entspricht [Hei-2006, S. 68ff.]. Er unterteilt in die Möglichkeit Prozesse systemintern zu erweitern, Erweiterungsfähigkeit [Hei-2006, S. 69], oder durch Integration systemexternen Lösungen zu ergänzen, Integrationsfähigkeit [Hei-2006, S. 70]. Für die Bewertung und Quantifizierung schlägt er anschließend für den funktionalen Teilbereich des

Transports ein Kennzahlensysteme vor, sowie eine adaptierte Nutzwertanalyse zur Zusammenführung dieser Kriterien [Hei-2006, S. 84ff.].

Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten, Heger – 2007

Hegers Arbeit zielt, in Erweiterung von Hernandez [Hei-2006, S. 72], darauf ab, eine detaillierte Bewertungsmethode für die WF in der Fabrikplanung zu entwickeln [Heg-2007, S. 4f.]. Er stützt seine Methode auf den Ansatz eines Wandlungspotentials einzelner Objekte, welche Merkmalsbezogen betrachtet und abgeleitet werden kann [Heg-2007, S. 69]. Entsprechend stellt er zunächst einen umfangreichen Katalog an WO in den Dimensionen Technik, Raum und Organisation sowie deren Merkmalen und möglichen Ausprägungen vor, aus denen zunächst die relevanten Teilobjekte ausgewählt werden können [Heg-2007, S. 70ff.]. Die Aggregation der Teilwandlungspotentialwerte in den Wandlungspotentialwert eines WO erfolgt in seinem Ansatz, aufgrund des Fehlens einer angemessenen Methode, durch reine Summierung der zuvor normierten Teilwerte wodurch sich eine Gesamtskala zwischen 0 und 100% ergibt [Heg-2007, S. 102]. Durch diese können die WO in 20%-Schritten von sehr niedrigem bis sehr hohem Wandlungspotential kategorisiert werden [Heg-2007, S. 105]. Sein Vorgehen, an welches sich neben dem soeben beschriebenen Ablauf der Ist- noch die Soll- und Plan-Analyse anschließen, zeigt Abbildung 8-7.

Bewertung des Wandlungspotenzials und Analyse des Wandlungsbedarfs in Kommissioniersystemen, Heine – 2015

Speziell mit Bezug auf und ausgehend von Kommissioniersystemen entwickelte Heine eine Methode zur Analyse und Bewertung von Wandlungsbedarf und Wandlungspotenzial [Hei-2015]. Sein Ansatz folgt dem Ablauf einer initialen Systematisierung des Systems sowie einer darauf aufbauenden Analyse und Bewertung und gliedert sich im Gesamtkontext vor der Neu/Umplanung von Kommissioniersystemen ein [Hei-2015, S. 87f.]. In der Methode erfolgt zunächst analog zu Heger eine Vorauswahl der wandlungsrelevanten Teilaspekte eines Kommissioniersystems [Hei-2015, S. 102ff.] aufbauend auf der zuvor entwickelten Systematik dieser [Hei-2015, S. 109ff.]. Anschließend werden die Auswirkungen bzw. Gewichtungen der WB und Rezeptoren auf die WO mittels Experteninputs im Delphi-Verfahren ermittelt [Hei-2015, S. 111]. Als letzter Schritt erfolgt die Ermittlung des Wandlungspotenzials indem die zuvor identifizierten WO mit den WB über eine Nutzwertanalyse ermittelt und mit alternativen Ausprägungen in Relation gesetzt werden [Hei-2015, S. 112ff.]. Anschließend können die Teilbereiche des Systems über Gewichtung mit den Rezeptoren in eine Gesamt-WF überführt werden [Hei-2015, S. 131f.]. Die Resultate in den Dimensionen Lagerart, Bereitstellung, Fortbewegung und Entnahme zeigen übergreifend eine hohe Bedeutung der WB Universalität und

Skalierbarkeit [Hei-2015, S. 124f.] sowie einen tendenziell negativen Einfluss von Automatisierung auf das Wandlungspotenzial von Systemen [Hei-2015, S. 134].

Eigenschaften wandlungsfähiger Systeme, Ullrich – 2018

Ullrich behandelt die Erklärung und Beschreibung der WF von sozio-technischen Systemen, zu dessen Zweck er ein Indikatorsystem entwickelt, welches gleichzeitig als Bewertungsmethode instrumentiert werden kann [Ull-2018, S. 6]. Die entsprechend von ihm ermittelten Indikatoren orientieren sich an den Wandlungsbefähigern von Fabrikobjekten und Systemen sind jedoch aufgrund ihres allgemeinen sozio-technischen Hintergrundes generalisierter gefasst und beinhalten neben den 5 in Abbildung 2-13 gezeigten WB noch die Selbstorganisiertheit, Wissen, Konvertabilität, Redundanz und Selbstähnlichkeit [Ull-2018, S. 129ff.]. Das Indikatorsystem, dargestellt in Abbildung 8-8, mit welchem schlussendlich die Wandlungsfähigkeit beschrieben und bestimmt werden kann gliedert sich in eine zweistufige AHP-Technik aus Indikatorebene sowie eine darunter liegender Merkmalsebene, wobei die Merkmale nicht indikator-exklusiv sind und mittels Gewichtungsfaktoren einem Indikator zugeordnet werden sowie durch Multiplikation mit dem Faktor des Indikators selbst direkt der Einfluss auf die Wandlungsfähigkeit ermittelt werden kann [Ull-2018, S. 189f.]. Ullrich bestimmt diese Grundgewichtung über die Closeness Centrality, welche sich wiederum aus von ihm durch Literaturrecherche abgeleiteten Adjazenzmatrizen bildet [Ull-2018, S. 177f.], und situativ zu individuellen Anforderungen justiert werden kann [Ull-2018, S. 190f.].

Forschungsprojekt WALaTra, IPH – 2020

Im Projekt *Wandlungsfähigkeit und Automatisierungsgrad für Lager-, Kommissionier- und Transportsysteme* (WALaTra) des Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH (kurz IPH) wurde eine Methode entwickelt, mit welcher der bestehende als auch benötigte Wandlungsfähigkeits- und Automatisierungsgrad von LKT-Systemen bewertet werden kann [IPH-2019]. Die Methode orientiert sich an den Arbeiten von Heine und dessen Ansatz zur Gewichtung der WB über die Rezeptoren sowie den Objektbewertungsansatz über Merkmale nach Heger [Mül-2020, S. 17]. Durch Experteninput konnten so die Ausprägungen der 5 primären WB Modularität, Universalität, Skalierbarkeit, Kompatibilität und Mobilität für insgesamt 63 LKT-Systeme (29 Transportsysteme [Mül-2020, S. 24] sowie 20 Lager- und 13 Kommissioniersysteme [Mül-2020, S. 54]) ermittelt werden. Die Soll-Werte der WB können in dem entwickelten Ansatz zum Abgleich mit den Ist-WB über die Ausprägungen und Gewichtungen der Rezeptoren mittels eines Fragenkatalogs ermittelt werden [Mül-2020, S. 26].

Arbeit	Fokusbereich					Zeitraum		Bewertungsansatz						
	Fabrik	Fabrikobjekt	Produktion	Logistik	MFS	Ex Ante	Ex Post	Qualitativ	Quantitativ	Simulativ	Tech. EGF	Merkmalsbasis	Monetär	Perf.-Zahlen
Herrandez - 2003:	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	○	○
Hawer - 2020:	●	●	●	○	●	●	○	○	●	○	●	●	○	○
QuamFaB, IPH - 2017:	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ullrich - 2018:	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Baumhansl et al. - 2020:	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Borgmann et al. - 2022:	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Heger - 2007:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Drabow - 2006:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Velkova - 2014:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Möller - 2008:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Klenke et al. - 2011:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Zwißler und Gebhardt - 2013:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Heinecker - 2006:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Albrecht et al. - 2013:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
WALaTra, IPH - 2020:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Heine - 2015:	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Diese Arbeit	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Legende:
 ● Fokus / Voll Angewandt
 ○ Teilweise Betrachtet / Angewandt
 ○ Nicht Betrachtet / Angewandt

Abkürzungen
 ● MFS Materialflusssystem
 ● Tech. EGF Technische Eigenschaften
 ● Perf.-Zahlen Performance Zahlen

Abbildung 3-3: Übersicht zu bestehenden Literaturansätzen und deren Merkmalen

Gesamtübersichtlich zeigt Abbildung 3-3 den Fokusbereich, den Analysezeitpunkt sowie eine Kategorisierung der Bewertungen der in diesem Kapitel im Detail vorgestellten sowie durch eine systematische Literaturrecherche identifizierten thematisch nahestehenden Arbeiten. Dies weiteren Arbeiten sind in alphabetischer Reihenfolge [Alb-2013; Bau-2020; Bor-2022; Bön-2017; Kle-2011]. Die Kategorisierung erfolgte Anhand subjektiver Analyse der vorliegenden Publikationen und zielt auf eine relative Betrachtung im Vergleich zu dieser Arbeit ab, welche abgesetzt ebenfalls in Abbildung 3-3 gelistet ist.

3.4 Forschungslücke und -bedarf

Grundsätzlich kann aus den analysierten Arbeiten der Bedarf an Forschung zur WF von produzierenden Unternehmen abgeleitet werden. Innerhalb der bestehenden Publikationen hat sich über die letzten Jahre eine einheitliche Systematik zur Betrachtung der WF entwickelt, der Regelkreis der Wandlungsfähigkeit. Einzelne Teilelemente dieser Methode sind jedoch bis dato noch aktiver Forschungsbestand mit verschiedenen Ansätzen. Darunter fällt auch der Aspekt der Bewertung von diesen soziotechnischen Systemen [Haw-2020, S. 160]. Zusammen mit dem geringen Anteil an Publikationen mit stärkerer Logistikorientierung, gezeigt in Abbildung 3-3, kann ein Bedarf an Ansätzen zur schnellen und quantitativen Erfassung der technischen Wandlungsfähigkeit von PLS abgeleitet werden.

Die vier identifizierten logistikfokussierten Werke betrachten allesamt Teilaspekte aber schließen die existente Forschungslücke nicht vollkommen. Die Arbeit von Albrecht et. al. stützt sich auf Materialflusssimulationen, welche speziell im Bereich von klein- und mittelständischen Unternehmen wenig verbreitet sind und einen großen Voraufwand und Knowhow erfordern [Alb-2013]. Heineckers Ansatz betrachtet explizit Methoden zur Bewertung von Erweiterungsmöglichkeiten innerhalb von Materialflusssystemen und fokussiert sich auf Flexibilität in den Dimensionen Fördergut, Layout und Durchsatz von entsprechenden Systemen [Hei-2006]. Heine liefert eine umfassende Analyse von Kommissioniersystemen bringt diese jedoch nicht in einen Gesamtkontext mit Transport- oder Lagersystemen [Hei-2015]. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes WALaTra sind auf einen Vergleich mit dem Grad von Automatisierungslösungen verknüpft und betrachten nur Teilelemente, jedoch nicht PLS als Ganzes [Mül-2020].

Ziel dieser Arbeit ist es diese Forschungslücke weiter zu schließen indem produzierenden Unternehmen aus dem Bereich der diskreten Fertigung eine Methode an die Hand gegeben wird, mit welcher diese die technische WF von Teilelementen als

auch von gesamthaften PLS aufwandsarm auf Merkmalsbasis und unter Bezugnahme von technischen Eigenschaften analysieren und gesamtheitlich bewerten können, siehe Abbildung 3-3. Dadurch können bei Bedarf Maßnahmen zur Gestaltung der Wandlungsfähigkeit von Förder- und Materialflusssystemen abgeleitet werden. Abbildung 3-4 zeigt dementsprechend die Einordnung dieser Arbeit, blau hinterlegter Bereich, in den Regelkreis der Wandlungsfähigkeit. Zeitgleich soll durch Beantwortung der Forschungsfragen aus Kapitel 1.2 das Verständnis zum Einfluss der Wandlungsfähigkeit in Produktionslogistiksystemen verbessert werden.

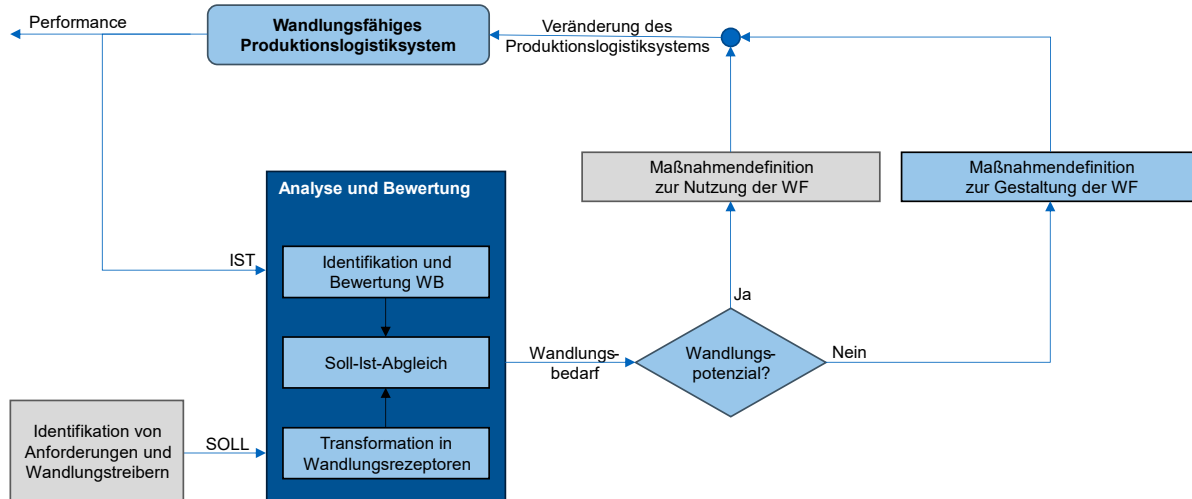


Abbildung 3-4: *Fokusbereich dieser Arbeit (blau hinterlegt) in Relation zum Regelkreis der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Nyh-2010b, S. 9]*

4 Rahmen der Arbeit und Anforderungen

4.1 Grundsätzlicher Rahmen der Arbeit

Die Tätigkeiten zur Dokumentation und Erarbeitung der Bewertungsmethode erfolgten im Rahmen einer Abschlussarbeit zur Erlangung des wissenschaftlichen Grades eines Master of Science und sind auf einen regulären zeitlichen Rahmen von 6 Monaten beschränkt. Daraus resultiert die in Abbildung 3-4 gezeigte Fokussierung auf einen Teilbereich der WF mit entsprechenden Schnittstellen und Abgrenzungen zu den weiteren Elementen des gesamtheitlichen Regelkreises der WF. Folglich ist es nicht Teil dieser Arbeit aus Wandlungsbedarfen konkrete Maßnahmen zur Gestaltung und Umsetzung von WF in Produktionslogistiksystemen abzuleiten sowie Anforderungen und WT zu identifizieren. Zudem erfolgte die Arbeit in Form einer Anstellung als Masterand bei der Munich Consulting Group GmbH mit dem ursprünglichen Ziel eine entsprechende Methode anhand von bestehenden Projekten zu entwickeln und zu erproben. Aufgrund unternehmerischer und projektbezogener Gründe war dies jedoch nur in reduziertem Maße möglich, weswegen ein theoretischer, literaturbasierter Forschungsansatz diese Arbeit dominiert. Abschnitte, welche durch Input aus Expertengesprächen mit Kollegen der Munich Consulting Group GmbH entstanden, sind klar gekennzeichnet. In diesen Fällen sind limitierte Einzeleinschätzungen und persönliche Meinungen vertreten, welche rein theoretisch ohne konkrete Anwendungsfälle erarbeitet wurden.

4.2 Anforderungen an die Bewertungsmethode

Die Anforderungen gliedern sich in grundsätzliche inhaltliche Themen sowie in anwendungsbezogene Forderungen.

Grundsätzliche inhaltliche Anforderungen

Die inhaltlichen Anforderungen befassen sich damit, wie der Inhalt der Methode erarbeitet werden soll und welche grundsätzlichen Ziele vorhanden sind. Nachdem die Ermittlung und Zuweisung einer WF zu Objekten einem Kennzahlensystem nahe kommt, werden zunächst die bereits in 2.3.1 beschriebenen Anforderungen aus der VDI 2525 übernommen [VDI-2525]. Des Weiteren wird die Anforderung der Ganzheitlichkeit mitaufgenommen, um die Einbindung der Methode sowie der daraus resultierenden Ergebnisse in den Gesamtkontext der Produktionslogistik und des Regelkreises der WF zu fordern.

- GA1 **Aktualität:** Die Methode und deren Ergebnisse sollten auf dem neuesten Stand der relevanten Informationen sein.
- GA2 **Übersichtlichkeit:** Die Bewertung sollte klar und verständlich strukturiert sein.
- GA3 **Aussagekräftigkeit:** Die Methode sollte relevante und informative Ergebnisse für die Produktionslogistik liefern.
- GA4 **Allgemeinverständlichkeit:** Die Bewertung sollte für Fachleute aus dem Bereich der Produktion und Logistik verständlich sein.
- GA5 **Mengenmäßige Überschaubarkeit:** Die resultierende Menge an Kennzahlen sollte angemessen sein.
- GA6 **Ganzheitliche Bewertung:** Die Methode sollte alle relevanten Aspekte berücksichtigen und die Ergebnisse in einem produktionslogistischen Gesamtkontext stellen.

Anwendungsbezogene Anforderungen

Die anwendungsbezogenen Anforderungen resultieren aus dem Grundgedanken der Praktikabilität ohne deren Erfüllung die Methode aufgrund zeitlicher und finanzieller Limitierungen in der Realität nicht eingesetzt werden würde.

- AA1 **Einfache Anwendbarkeit:** Die Methode sollte leicht und mit zeitlich überschaubarem Aufwand anwendbar sein, ohne umfangreiche Schulungen oder Zuhilfenahme von Expertenweisungen.
- AA2 **Situative Anpassbarkeit:** Die Methode sollte die Möglichkeit bieten auf verschiedenen Situationen und Randbedingungen angepasst werden zu können.
- AA3 **Allgemeingültigkeit:** Die Methode sollte grundsätzlich für verschiedene Anwendungsbereiche innerhalb der Produktion und Logistik geeignet sein.
- AA4 **Erweiterbare Bewertung:** Die Methode sollte die Möglichkeit bieten, zusätzliche Kriterien oder Daten in die Bewertung einzubeziehen.

5 Methode zur quantifizierbaren Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Brownfield Förder- und Materialflusstechnik

5.1 Grundlagen der Konzepterarbeitung

Zur Erarbeitung der Methode wurden sowohl empirisch-induktive als auch theoretisch-deduktive Forschungsansätze verwendet. Entsprechende Unterschiede und Vorgehensweisen dieser Ansätze werden in diesem Abschnitt gesondert voneinander betrachtet.

5.1.1 Empirisch-Induktive Erarbeitung

Innerhalb der empirisch-induktiven Forschung werden aus speziellen Aussagen, der Empirie, durch Abstraktion, Kombination sowie grundlegender Schlussfolgerungen allgemeine Erkenntnisse, die entstehende Theorie, gezogen [Hel-2016, S. 30]. Die Basis dieser Empirie bildet Kapitel 3, in welcher der Stand der Technik deskriptiv aufgearbeitet wurde. Diese Publikationen werden miteinander kombiniert und an die Aufgabenstellung und Randbedingungen dieser Masterarbeit adaptiert, um neben den Grundkonstrukten der entwickelten Methode auch die zentralen Analyseansätze zu erhalten. Des Weiteren wurden diese Ansätze mit etablierten Bewertungsmethoden aus anderen Fachbereichen, siehe mitunter Kapitel 2.3.2, erweitert, um die Allgemeingültigkeit zu verstärken und bekannte Orientierungspunkte für die Anwendung zu setzen [Hel-2016, S. 31]. Neben deskriptiven Ansätzen stützen sich empirisch-induktive Methoden auch auf Datengrundlagen [Bro-1998, S. 10f.]. Diese Datengrundlagen waren jedoch zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht verfügbar und konnten aufgrund fehlender Projektumfänge, wie in Kapitel 4.1 beschreiben, nicht erarbeitet werden. Aus diesem Grund erfolgt in Kapitel 5.2 eine Ableitung der Grundtheorie aus den vorhandenen Literaturansätzen.

Abgesehen von den literaturbezogenen Ansätzen wurden zudem vereinzelt Expertenbefragungen aus dem Personenkreis der Munich Consulting Group zur Ableitung allgemeingültiger Aussagen eingesetzt. Dies stellt ebenfalls einen empirisch-induktiven Forschungsansatz dar, der jedoch aufgrund der geringen Anzahl an Interviews nur bedingt statistisch signifikant ist [Hel-2016, S. 31]. Weitere Interviews konnten aufgrund fehlender Interviewpartner nicht durchgeführt werden.

5.1.2 Theoretisch-Deduktive Erarbeitung

Zur Überprüfung der Anforderungen sowie der Funktionsweise der Methode werden theoretisch-deduktive Methoden verwendet, um aus der zuvor erarbeiteten Theorie (dem Allgemeinen) auf eine konkrete Anwendung (spezifische Beobachtung) zu schließen [Hel-2016, S. 31f.]. Dazu wird in Kapitel 6 die Methode anhand eines fiktiven Anwendungsfalls durch zwei Produktionslogistikexperten erprobt. Abschließend erfolgt anhand eines Fragebogens die deduktive Ermittlung der Eigenschaftserfüllungen. Näheres zu dem Anwendungsfall sowie den resultierenden Ergebnissen ist in Kapitel 6 beschrieben. Zusätzlich wird neben der prototypischen Anwendung die Methode anhand der Forderungen aus bestehenden Literaturansätzen über die in 4.2 erarbeiteten Anforderungen evaluiert.

5.2 Beschreibung der Methode

5.2.1 Struktur und Grundlagen

Die Struktur der Methode orientiert sich an dem in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Regelkreis der WF. Im Zentrum des Vorgehens steht der Vergleich aus den Ist-Eigenschaften des PLS mit den Soll-Anforderungen an dieses. Dadurch kann das System analysiert sowie mittels des Vergleichs bewertet und Wandlungsbedarf abgeleitet werden. Eine reduzierte Form des Regelkreises aus Abbildung 3-4 mit Fokus auf den Arbeitsschritten und Schnittstellen der Methode sowie den zugehörigen Kapitelnummern bietet Abbildung 5-1. Die Reihenfolge der Arbeitsschritte orientiert sich an der aufsteigenden Kapitelnummer.

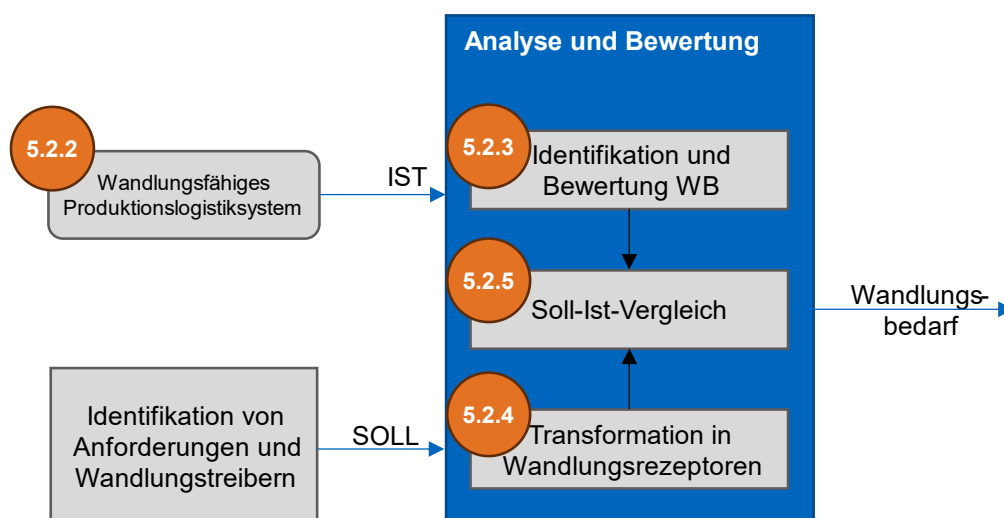


Abbildung 5-1: Grundstruktur der Bewertungsmethode mit Kapitelnummern

Die Methode folgt nach Abbildung 5-1 dem Regelkreis der Wandlungsfähigkeit von Nyhuis et al. [Nyh-2010b, S. 9], da dieser, wie in Kapitel 3.2 gezeigt, seit mehr als 10 Jahren etablierter Bestandteil vielfältiger Analysen- und Bewertungsansätze rund um die WF ist. Die genaue Ausführung des Regelkreises wird dabei an das Betrachtungsfeld adaptiert, siehe z.B. das Logistik-Controlling nach Bertsch [Ber-2011, S. 632] oder Steffens Gestaltungsmodell der wandlungsfähigen Logistik [Ste-2014, S. 127].

Innerhalb der Methode dieser Arbeit werden zwei wesentliche Aspekte der Struktur adaptiert. Zum einen erfolgt die Betrachtung rein auf einer technischen Basis und es werden organisatorische und räumliche Eigenschaften nicht berücksichtigt. Eine alleinige Betrachtung der Dimension Technik innerhalb von PLS ist nach Hawer möglich, da zwischen den genannten Dimensionen Abhängigkeiten herrschen, welche bei einer Kombination zur Gesamtbetrachtung die Einzelergebnisse verfälschen würden und somit die Dimensionen, zur Maßnahmendefinition zusammen, in einer Analyse jedoch einzeln untersucht werden sollten [Haw-2020, S. 128]. Heger stellte diese These bereits in seiner Dissertation auf und verzichtete bewusst auf Aggregationen in seinen Kennzahlen, da diese sonst für Analyse und Maßnahmenableitung zu abstrakt werden würden [Heg-2007, S. 129]. Aus dieser technischen Betrachtung resultierte auch die zweite Adaption. Innerhalb der Methode werden die technischen Eigenschaften des Systems mit den Anforderungen an dieses verglichen, woraus ein Bedarf an Maßnahmen zur Gestaltung des PLS resultiert. In Nyhuis' ursprünglichen Regelkreis der WF wird die Performance des Systems mit den Anforderungen verglichen, bevor das Wandlungspotenzial betrachtet wird. Ein entsprechender Vergleich kann nur vollzogen werden, wenn die Ist- und Soll-Seite in einer einheitlichen Darstellungsform bzw. Einheit (mathematische Grundanforderung) und in einem einheitlichen Kontext (logische Grundanforderung) vorliegen.

Eine Grundlage zu Kennzahlen und Skalensysteme bietet Kapitel 2.3.1. Aus diesem Abschnitt sowie dem Ziel einer quantitativen Bewertung verbleiben die Möglichkeiten diskrete oder kontinuierliche Zahlensysteme einzusetzen. Nachdem ergänzend diskrete Skalen Restriktionen an die möglichen Ausprägungen der Soll- und Ist-Seite sowie den resultierenden Bedarf stellt und somit entgegen der Anforderung AA3 – *Allgemeingültigkeit* stehen, wird der Vergleich anhand einer kontinuierlichen Skala durchgeführt. Mit Verweis auf Anforderung GA3 – *Aussagekräftigkeit* wird diese Skala jedoch auf den Bereich 0-100% beschränkt mit dem Ziel die Ergebnisse als konkrete Informationen in Form eines Erfüllungsgrades darzustellen. In Anlehnung an Heger stellen 0% vollkommene Wandlungsträgheit und 100% volles Wandlungspotenzial dar [Heg-2007, S. 105]. Innerhalb der bestehenden Literatur existiert keine Einigung

darüber, welche Skala zur Darstellung der WF verwendet werden sollte. Sowohl quantitative als auch qualitative Methoden sind vorhanden, siehe Abbildung 3-3, wobei mitunter die prozentuale Darstellung eines Erfüllungsgrades der WF bereits in einigen Publikationen auffindbar ist [Ull-2018; Her-2003; Heg-2007; Hei-2015].

Zur kontextgemäßen Vereinheitlichung können drei Optionen betrachtet werden. Prinzipiell sind die WB auf Ist-Seite technische Eigenschaften, die WR auf Soll-Seite übergreifende Anforderungen, welche über die WF verbunden sind. In direktester Form können sowohl die WB und die WR zu jeweils einer Größe der WF zusammengeführt und so anschließend verglichen werden. Dieser Ansatz findet mitunter in den Arbeiten von Heine, Steffens oder Drabow Anwendung und hat den Vorteil nur je eine Kennzahl vergleichen zu müssen [Hei-2015; Ste-2014; Dra-2006]. Neben der Aggregation zu je einer Soll- bzw. Ist-WF lassen sich die Dimensionen auch einzeln Gegeneinander vergleichen, indem diese jeweils auf die andere Seite transformiert werden. Nach diesem Ansatz kann zum einen aus den WR eine Soll-Ausprägung der jeweiligen WB ermittelt werden. Diese Methode wurde im Forschungsprojekt WALaTra des IPH eingesetzt [Mül-2020, S. 25f.] und bietet direkt die Möglichkeit die Anforderungen an die Eigenschaften des PLS bzw. den Objekten darin heranzutragen und daraus Maßnahmen abzuleiten. Die letzte Option aus dieser Überlegung ist WB an die WR heranzutragen und somit eine Wandlungsfähigkeit bzgl. eines WR zu ermitteln. Damit lässt sich die WF in die 6 Rezeptor-Dimensionen aufspannen und in diesen tiefergehend analysieren. Vergleichbare Ansätze existieren in den Arbeiten von Zäh et. al [Zäh-2004] und Heinecker [Hei-2006], die beiderseits jedoch die Flexibilität bewerten. Zäh et al. betrachten dabei zunächst die Flexibilität bzgl. eines WR auf Objektebene und mitteln die Ausprägungen der Objekte, um eine Systemdarstellung zu erhalten und daraus Maßnahmen zur Erhöhung der WF ableiten zu können [Zäh-2004, S. 175f.]. Dabei wird die rezeptorbezogene Flexibilität direkt über eine Ordinalskala ohne Bezugnahme der WB ermittelt [Zäh-2004, S. 175]. Die Arbeit von Heinecker, erläutert in 3.2.2, differenziert die Flexibilität in die Dimensionen Layout, Fördergut und Stückzahl, welche mitunter die WR darstellen.

Die letztgenannte Option, rezeptorbezogene Wandlungsfähigkeiten im Soll-Ist-Vergleich einzusetzen, wird auch in der Methode dieser Arbeit herangezogen. Dies resultiert einerseits aus der abgeleiteten Anforderung Aggregationen zu limitieren, um tiefergehende Analysen zu ermöglichen. Des Weiteren bietet die Aufteilung der WF in unterschiedlichen Dimensionen, wie in den Arbeiten von Zäh et al. und Heinecker beschrieben, Unternehmen die Option ihre PLS bzw. die darin enthaltenen Objekte zielgerichtet entlang spezifischer Anforderungen zu optimieren. Dies ist aufgrund der in Kapitel 3.3.1 erläuterten positiven Korrelation zwischen WF und den daraus

resultierenden Kosten essenziell für die wirtschaftliche Anwendung der WF in einem realen Unternehmensumfeld. Weitere Informationen zur Berechnung und Anwendung der rezeptorbezogenen WF ist in den Abschnitten 5.2.3 und 5.2.5 zu finden.

Nachdem an dieser Stelle die Grundlagen und Struktur der Methode erläutert wurden, folgen in den nächsten 4 Kapiteln die einzelnen Schritte sowie ihre theoretischen Herleitungen. Abschließend gibt Abschnitt 5.2.6 einen Ausblick, wie die erhaltenen Ergebnisse weiterverwendet werden können.

5.2.2 Analyse des Produktionslogistiksystems

Dieses Kapitel sowie das Kapitel 5.2.3 beschreiben die Ermittlung des Ist-Zustands des Systems, weswegen diese inhaltlich zusammen, jedoch nach Arbeitsschritten getrennt beschrieben werden. Grundlage dieser Beschreibung ist die Aufteilung der Ist-Zustands-Erfassung in die jeweiligen Hälften eines Top-Down bzw. Bottom-Up Vorgehens. Die jeweiligen Schritte sowie die Trennung zwischen diesen beiden Hälften ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Das Vorgehen teilt sich in einen Analysepart – dieses Kapitel – zur Modellierung des Systems, der darin enthaltenen Objekte sowie deren Merkmale und Ausprägungen und einer anschließenden Bewertung dieser Merkmale – Kapitel 5.2.3 – hin zur rezeptorbezogenen Objekt-Wandlungsfähigkeit auf.

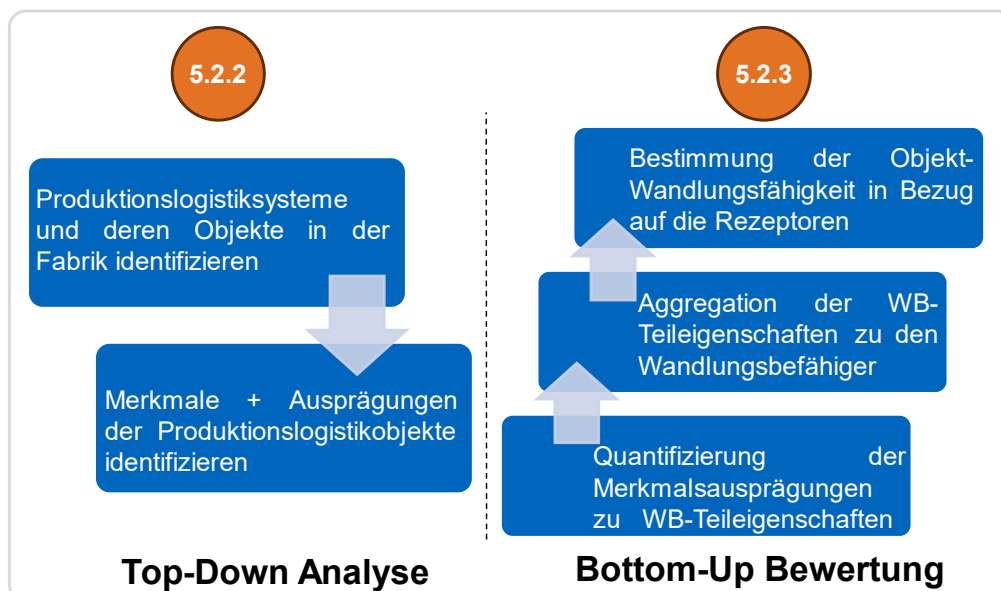


Abbildung 5-2: Übersicht zu den Arbeitsschritten sowie dem Top-Down Bottom-Up Vorgehen aus den Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3

Die Kombination aus einer Top-Down Analyse und einer Bottom-Up Bewertung ist ein Standard-Ansatz für Systembetrachtungen, siehe 2.3.2, und wurde innerhalb der Forschung zur Untersuchung der WF von produzierenden Unternehmen von

Hernandez übernommen [Her-2003]. Dieses Vorgehen ist im Hinblick auf die Literatur aus Kapitel 3 der defacto Standard bei der Bewertung von WF und bildet mitunter in den Methoden von Möller, Steffens, Wiendahl oder Bertsch und Nyhuis den zentralsystematischen Ansatz [Möl-2008; Ste-2014; Wie-2014; Ber-2012]. Aufgrund dieser Verbreitung sowie der daraus ableitbaren Validität wurde der Ansatz auch innerhalb dieser Arbeit übernommen.

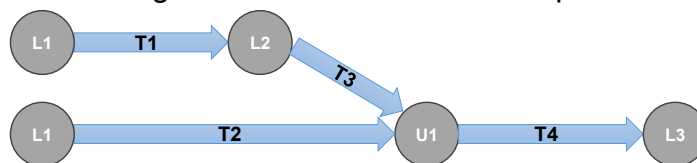
Produktionslogistiksysteme und -objekte identifizieren

Der erste Schritt innerhalb der Methode ist die Ermittlung von PLS und deren Objekten innerhalb von Fabriken. Ziel ist es zunächst Teilsysteme zu identifizieren, welche in großen Teilen unabhängig voneinander betrachtet werden können. Dies reduziert die Komplexität in der Anwendung der Methode erheblich. Anhaltspunkte für diese Unterteilung können räumliche (z.B. unterschiedliche Gebäudeteile), produktionstechnische (z.B. Fertigung und Montage) oder technische (z.B. hochautomatisierte und manuelle Bereiche) Gegebenheiten innerhalb der Fabrik bieten. Diese Systeme haben in realen Anwendungsfällen zumeist gemeinsame Logistikobjekte (z.B. einen Wareneingang) und definierte Schnittstellen zueinander (z.B. Hochzeitsanlage in einem Automobilwerk als erster Endmontageschritt mit vorgelagerter Antriebs- und Karosseriefertigung), welche zur Auftrennung und anschließender Zusammenführung der Teilsysteme verwendet werden können.

Zur weiteren Aufteilung der Systeme müssen diese in ihre Objekte aufgliedert sowie in der zugrundeliegenden Struktur modelliert werden. Ein bereits in Kapitel 2.1.2 beschriebener Standardansatz zur Darstellung von PLS ist das sogenannte Knoten- und Kanten-Modell, siehe Abbildung 2-3. Die Kanten stellen in diesem Falle stets Transportprozesse dar, während die Knoten Lager- oder Kommissionier-/Umschlagspunkte sind. Aufgrund der einfachen und schnellen Modellierung von Systemen in dieser Form mit der zeitgleichen Aufteilung in die Objektkategorien nach den TUL-Prozessen, welche andere Anforderungen und Eigenschaften mit sich bringen, wird innerhalb der Methode diese Form vorgeschlagen. Eine Unterstützung zur Modellierung, speziell bei komplexeren mehrstufigen Systemen, bieten die funktionalen, strukturellen und hierarchischen Betrachtungsweisen aus der Systemtheorie, welche in Kapitel 2.1.1 tiefergehend erläutert wurden. Die Darstellung in einem Knoten- und Kanten-Modell stellt dabei eine spezielle Form der strukturellen, funktionalen Betrachtungsweise dar, während der Top-Down Ansatz aus einer hierarchischen Betrachtung von Systemen stammt.

Merkmale und Eigenschaften der Produktionslogistikobjekte identifizieren

Zeitgleich zu dieser Modellierung können neben dem Objekttyp die technischen Eigenschaften und besonderen Merkmale der Produktionslogistikobjekte (PLO) aufgenommen werden. Diese Merkmale beziehen sich auf Eigenschaften, welche nicht standardmäßig dem Objekttyp entsprechen und in Bezug auf die WB förderlich sind. Ein Beispiel für ein entsprechendes Merkmal wäre ein Förderband, welches anstelle einer festen Bodenverankerung in einer Linearachse platziert und dadurch in einer Dimension mobil ist. Insbesondere der Objekttyp und die besonderen Merkmale stellen neben den technischen Eigenschaften die Basis für die nachfolgende Quantifizierung der Wandlungseigenschaften in Form von WB dar. Nachdem alle Informationen gesammelt wurden, müssen diese in einer Liste zusammen mit dem Systemmodell aufgeführt werden. Dies ist beispielhaft in Abbildung 5-3 dargestellt.



Kurzbez.	Name	Typ	Durchsatz	Kapazität	Bes. Merkmale	...
L1	Wareneingang	Pick-by-Scanner	20 EP/h	10 EP		
L2	Hauptlager	Hochregallager	10 EP/h	200 EP		
L3	Warenausgang	Blocklager	..	..
U1	Kommissionierung	Automat	..	..
T1	WE-Transport	Stapler	..	..
T2	Direktversorgung	Routenzug	..	..
T3	Linienversorgung	Bandförderer	..	..	Auf Rollen montiert	
T4	WA-Transport	Stapler	..	..

EP = Europalette

Abbildung 5-3: Beispielhafte Systemmodellierung mit Objekten, Eigenschaften und Merkmalen

5.2.3 Quantifizierung und Bewertung der Wandlungsbefähiger

Die in Abbildung 5-2 gezeigten drei Arbeitsschritte auf Seiten der Bottom-Up Bewertung werden in diesem Kapitel kontextbezogen in 2 Abschnitten behandelt.

Quantifizierung der Eigenschaften in Wandlungsbefähiger-Ausprägungen

Zur quantitativen Bestimmung der Wandlungsbefähiger-Ausprägungen aus den Objektmerkmalen und -eigenschaften existieren, identifiziert durch die systematische Literaturrecherche dieser Arbeit, 3 verschiedene Ansätze, welche im Folgenden diskutiert werden.

Die erste und innerhalb der Literaturrecherche mengenbezogen verbreitetste Variante ist die Differenzierung der WB in Sekundär- bzw. und Tertiärbefähiger, welche direkt objektspezifischen Merkmalen und Eigenschaften zugeordnet werden können. Anschließend werden diese Sekundär- und Tertiärbefähiger mittels Gewichtungen zu den primären WB aggregierte. Dieser Ansatz ist mitunter in den Arbeiten von Hernandez, Heger, Ullrich, dem WALaTra Projekt sowie Drabow vorhanden [Her-2003; Heg-2007; Ull-2018; Mül-2020; Dra-2006]. Zwischen diesen Arbeiten existieren jedoch Unterschiede in den Gewichtungen und Ausführungen der Sekundär- und Tertiärbefähiger. Vorteil dieses Ansatzes ist die Nachvollziehbarkeit sowie der technische Detailgrad, aufgrund dessen die ermittelten Ausprägungen eine hohe Grundgenauigkeit besitzen.

Der zweite Ansatz besteht in der direkten Ermittlung der WB-Ausprägungen auf Basis einer Objektbetrachtung. Innerhalb der untersuchten Arbeiten aus Kapitel 3 wird dieser Ansatz mitunter von Heine und Heinecker eingesetzt [Hei-2015; Hei-2006]. Aufgrund der direkten Bestimmung der WB führt diese Methode zu schnellen Ergebnissen, ist jedoch schlecht nachvollziehbar und in der Genauigkeit maßgeblich von subjektiven Einschätzungen abhängig. Deshalb werden bei diesem Ansatz häufig Expertenbefragungen durchgeführt, um die Objektivität zu erhöhen, z.B. eine Delphi-Methode bei Heine [Hei-2015, S. 113].

Der dritte und letzte Ansatz ist die Ermittlung der WB aus den Objekteigenschaften mittels einer Berechnungsformel. Dies setzt jedoch die Existenz eines entsprechenden Zusammenhangs voraus, welcher zunächst ermittelt und bewiesen werden muss. Ist eine Berechnungsformel verfügbar, ermöglicht der Ansatz eine schnelle und genau Bestimmung der WB. In dem Forschungsprojekt QuaMFaB des IPH wurden Berechnungsformeln für die Wandlungsbefähiger zur Bewertung von Fabriklayouts und Layoutobjekte definiert [Bön-2017]. Dieses Projekt stellt jedoch die einzige Publikation dar, welche im Rahmen der Literaturrecherche mit einem entsprechenden Ansatz gefunden werden konnte. Eine eigenständige Herleitung für PLO lag außerhalb des Rahmens dieser Arbeit.

Die erste Variante, die Ermittlung der Primär-WB aus Sekundär- und Tertiärbefähigern, besitzt in Anbetracht der Methoden-Anforderungen *GA3 – Aussagekräftigkeit* und *AA4 – Erweiterbarkeit* gegenüber der zweiten Variante erhebliche Vorteile und wird somit angewandt. Variante 3 kann aufgrund der fehlenden Zusammenhänge für eine weitere Betrachtung ausgeschlossen werden. Ein essenzieller Vorteil der Variante 2, die schnelle und somit einfache Anwendbarkeit, siehe Anforderung *AA1*, sollte aber praxisbezogen auch Bestandteil der Methode sein. Eine Basis, für die schnelle, jedoch

weiterhin aussagekräftige Ermittlung der WB-Ausprägungen liefert das Forschungsprojekt WALaTra. In diesem wurde anhand einer qualitativen Merkmalsbewertung mit Ordinalskala in Kombination mit Expertenumfragen die primären WB für 29 Transport- [Mül-2020, S. 24], 20 Lager- [Mül-2020, S. 54], und 12 Kommissioniersystemen [Mül-2020, S. 54] ermittelt. Diese Bewertung ist somit wissenschaftlich fundiert und bietet eine breite Auswahl an gängigen Produktionslogistikobjekten zur direkten Verwendung an. Aus diesem Grund sowie der Adaptierbarkeit des Merkmalskatalogs wird neben den beiden bereits genannten Anforderungen auch AA2 – *situative Anpassbarkeit* mit der Übernahme dieses Ansatzes erfüllt. Die Quantifizierung der WB für die Produktionslogistikobjekte erfolgt somit primär über den erfassten Objekttyp aus Abschnitt 5.2.2. Die Ausprägungen sowie der genannte Merkmalskatalog sind in Anhang A aufgeführt.

Bewertung der rezeptorbezogenen Wandlungsfähigkeit

Die so erhaltenen WB-Ausprägungen der Objekte müssen anschließend auf die Rezeptoren projiziert werden. Analog zu den eben vorgestellten Varianten der WB-Bestimmung lassen sich drei prinzipielle Vorgehensweisen differenzieren. Die erste Option, eine Kombination der WB zu den Rezeptoren über eine nichtlineare Berechnungsvorschrift, ist nur möglich, falls diese existiert und verfügbar ist. Aus diesem Grund scheidet dieser Ansatz erneut für die weitere Betrachtung aus. Verbleibend ist eine lineare Gewichtung der WB, welche entweder fall- bzw. objektspezifisch oder einheitlich für ein PLS sein kann. Für die erste Variante spricht der Aspekt, dass eine objektspezifische Gewichtung eine nuanciertere Anpassung und somit eine tendenziell höhere Genauigkeit im Vergleich zu einer einheitlichen Gewichtung ermöglicht. Eine entsprechende Gewichtung für jedes Objekt zu bestimmen, führt jedoch zu einem hohen Aufwand und unterliegt weiterhin subjektiven Faktoren ohne Garantie auf Korrektheit. Aus diesem Grund wird innerhalb dieser Methode eine einheitliche Grundgewichtung der WB für alle Produktionslogistikobjekte in einem System eingesetzt. Die Gleichgewichtung aller WB zu einem Rezeptor wird als Spezialfall dieser beiden Optionen nicht weiter betrachtet.

Für die Bestimmung der Wandlungsfähigkeit WF_i eines PLO bezüglich eines WR aus Summation des Produkts der Wandlungsbefähiger WB_j mit ihren rezeptorbezogenen Gewichtungen $g_{i,j}$ ergibt sich der Zusammenhang aus Formel (5-1).

$$WF_i = \sum_j g_{i,j} \cdot WB_j \quad (5-1)$$

Die Ermittlung der Gewichtungen $g_{i,j}$ ist an diesem Punkt noch ausstehend. Nachdem, wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, innerhalb der Literatur kein Ansatz zur Ermittlung der rezeptorbezogenen Wandlungsfähigkeit vorhanden ist, existieren zudem keine entsprechenden Gewichtungen. Deswegen mussten diese eigenständig hergeleitet werden. Ohne Input aus der Literatur oder zugreifbaren Daten ist die Methode der Umfrage einzig verbleibender Ansatz zur Erhebung dieser Informationen. Innerhalb der Expertenbefragung wurde eine Reihenfolge der WB zu jedem Rezeptor durch Ausfüllen von je einer Präferenzmatrix, Funktionsweise siehe 2.3.2, ermittelt.

Aus diesen Reihenfolgen wurden anschließend mit dem Grundsatz *jeder Wandlungsbefähiger wirkt jedem Rezeptor entgegen* die Basisgewichtungen abgeleitet. Dazu wurden die Anzahl an gewonnenen Vergleichen eines jeden WB zu einem Rezeptor $n_{i,j}$, mit plus 1 für den Grundanteil addiert, und ins Verhältnis zur Summe aus der Anzahl aller gewonnenen Vergleiche bezüglich eines Rezeptors \sum_i und der Anzahl aller WB, 5, gesetzt. Diese Berechnungsvorschrift ist in Formel (5-2) dargestellt. Gewinnt ein Wandlungsbefähiger keinen direkten Vergleich verbleibt die Grundgewichtung von $1/(\sum_i+5)$, gewinnt kein Wandlungsbefähiger einen direkten Vergleich sind alle WB bezüglich dieses Rezeptors gleich mit 20% gewichtet.

$$g_{i,j} = \frac{(n_{i,j} + 1)}{(\sum_i + 5)} \quad (5-2)$$

Für die Expertenbefragungen standen nur zwei Kollegen der Munich Consulting Group GmbH zur Verfügung, weswegen als zusätzlicher Input die Präferenzmatrizen durch den Autor dieser Masterarbeit ausgefüllt wurden. Dabei wurde den Teilnehmenden neben einer kurzen Einführung in das Thema der WF schriftliche Kurzbeschreibungen zur Funktionsweise einer Präferenzmatrix, sowie zu den WB und Rezeptoren an die Hand gegeben. Die Ergebnisse der Fragebögen sind Teil des Anhangs A. Zusätzlich wurde einer der beiden Teilnehmenden nach tiefergehender Einführung in die Wandlungsfähigkeit gebeten die Präferenzmatrizen erneut auszufüllen.

Aus mündlichen Absprachen zeigte sich zudem, dass ohne konkreten Anwendungsfall oder Systembezug eine Ableitung der Gewichtungen von allen beteiligten Personen als äußerst komplex wahrgenommen wurde. Neben diesem kontextbezogenen Problem können aufgrund der geringen Anzahl an Teilnehmern sowohl Verfälschungen im Endergebnis durch subjektive als auch fachverständliche Einflüsse nicht ausgeschlossen werden. Dies zeigt sich insbesondere dadurch, dass zwischen den einzelnen Einschätzungen sehr geringe Deckung bestand. Übergreifend konnten jedoch einige Gemeinsamkeiten und Tendenzen identifiziert werden. Mobilität besitzt

in den meisten Fällen die geringste Gewichtung bezüglich der Rezeptoren. Dies liegt in einer Auffassung zur Dissertation von Sudhoff, der 2008 explizit die Mobilität in das Zentrum seiner Wandlungsfähigkeitsuntersuchung platziert hatte und zum Schluss kommt, dass alle WB Mobilitätsbefähiger sind und diese mehr einen Grundbestandteil der Logistik darstellt [Sud-2008]. Übergreifend dominierten zudem die WB Kompatibilität, Skalierbarkeit und Modularität. Speziell die WB Modularität und Kompatibilität sind im gesamtheitlichen Blick der WF sowohl bei Ullrich über Zentralitätsmaße und bei Steffens als auch Sudhoff über Wechselwirkungen am stärksten gewichtet [Ull-2018, S. 179; Ste-2014, S. 158; Sud-2008, S. 22].

Aufgrund der limitierten Anzahl an Einschätzungen wurden zur Zusammenführung der Ergebnisse alle Inputs berücksichtigt und der Wissenstand zur WF mitgewichtet. Aus diesem Grund wurde das Teilergebnis des Autors, mit größter theoretischer WF-Expertise, doppelt in die Zusammenführung integriert. Die doppelte Einschätzung des einen Teilnehmers wurde zudem zunächst zu einer gemittelt. Abschließend wurden die so verbleibenden 4 Ergebnisse, eines der drei doppelt, zur Basisgewichtung über eine Mittelwertbildung zusammengeführt. Die resultierenden Gewichtungen inkl. der Gesamtbetrachtung sind in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Farbskalierung erfolgt von Rot, geringe Gewichtung, zu Grün, hohe Gewichtung. Die nach Bertsch und Nyhuis dominierenden Rezeptoren sind blau hinterlegt [Ber-2011], der Zusatzrezeptor Systemelement von Möller ist leicht gelb hervorgehoben [Möl-2008]. In dieser Matrixdarstellung aus Abbildung 5-4 können jeweils in den Zeilen die Gewichtungen des WB einer Zeile zu den Rezeptoren (in den Spalten) entnommen werden. Abgesetzt am rechten Rand sind die gemittelte Gewichtung des WB zu allen WR dargestellt. Aus der Gesamtbetrachtung ergibt sich die, in absteigender Reihenfolge genannte, Relevanz der WB Kompatibilität, Skalierbarkeit und Modularität. Zwischen den Rezeptoren ist herauszuheben, dass die Modularität übergreifend der geringsten Varianz unterliegt, und somit für die WF jedes Rezeptors eine ähnliche und zahlenbezogen auch große Bedeutung besitzt. Die Mobilität besitzt übergreifend mit einem deutlichen Abstand die geringste Bedeutung.

	Produkt	Stückzahl	Zeit	Kosten	Qualität	Systemelement	Gesamt-betrachtung
Universalität	27%	12%	13%	23%	29%	18%	20,3%
Mobilität	13%	14%	17%	11%	11%	17%	13,7%
Skalierbarkeit	14%	35%	34%	25%	15%	9%	21,9%
Modularität	19%	20%	22%	23%	21%	25%	21,8%
Kompatibilität	28%	18%	14%	18%	25%	32%	22,2%

Abbildung 5-4: Basisgewichtung der Wandlungsbefähiger zu den Rezeptoren

Damit der Ansatz zur Ermittlung der rezeptorbezogene Wandlungsfähigkeit aus Formel (5-1) zudem die Anforderung AA2 – *Anpassbarkeit* erfüllt, wird, in Anlehnung an Ullrich, innerhalb der Anwendung ermöglicht eigenen Gewichtungen $EG_{i,j}$ zu ermitteln und diese ins Verhältnis zur Basisgewichtung $BG_{i,j}$ zu setzen [Ull-2018, S. 191]. Formel (5-3) zeigt diesen Zusammenhang, mit den Anteilsfaktoren q und p . Im Spezialfall $q = 1$, somit $p = 0$, folgt die Endgewichtung rein der Basisgewichtung, bei $q = 0$ und somit $p = 1$, folgt die Endgewichtung entsprechend rein der Eigengewichtung.

$$g_{i,j} = (q \cdot BG_{i,j} + p \cdot EG_{i,j}), \quad \text{wobei} \quad q + p = 1 \quad (5-3)$$

Mit diesem Schritt sind sowohl die Gewichtungen als auch die WB-Ausprägungen ermittelt und somit die Betrachtung des Ist-Systems abgeschlossen. Die ausstehende Bewertung der Wandlungsfähigkeit erfolgt in Kapitel 5.2.5.

5.2.4 Ermittlung der Soll-Wandlungsfähigkeit

Im, in Abbildung 5-1 dargestellten, zweistufigen Ablauf zur Ermittlung der Soll-WF bzgl. jedes WR, müssen zunächst die Anforderungen und WT des PLS identifiziert werden, bevor diese in die Dimensionen der WR transformiert werden können. Ziel ist es Ausprägungen der WR zwischen 0% (keinerlei WF bezüglich dieses Rezeptors benötigt) und 100% (maximale WF bezüglich dieses Rezeptors benötigt) zu erhalten.

Identifikation von Anforderungen und Wandlungstreibern

Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben liegt die Ermittlung von Anforderungen und WT außerhalb des Fokusbereichs dieser Arbeit. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle nur eine kurze Einführung in diesen Arbeitsschritt mit Verweis auf bestehende Literaturansätze. Die WR stellen nach der Definition aus 2.2.2 einen Ansatz dar, um verschiedene Einflüsse an ein PLS zu bündeln und somit die Komplexität für die Betrachtung der WF-Anforderungen zu reduzieren. Damit diese Einflüsse jedoch gebündelt werden können müssen diese zunächst grundlegend bekannt sein. Ein etablierter Ansatz zur Umfeldbetrachtung eines Unternehmens ist die bereits genannte PESTEL-Analyse. Ansätze und Vorlagen für diese Methode sind mitunter in der Publikation von Ehrenmann verfügbar [Ehr-2015]. Zusätzlich zur PESTEL-Analyse schlägt Velkova ein geführtes Brainstorming vor, um neben einer reinen Umfeldanalyse auch die Inputs der produktionsnahen Unternehmensbereiche zu berücksichtigen [Vel-2014, S. 58ff.]. Abgesehen von dieser freien Form der Ideenfindung wurden in der Literatur auch vorgefertigte WT-Kataloge publiziert, in

denen verbleibend nur die Ausprägungen festgelegt werden müssen, siehe [Mül-2020, S. 25f.; Buc-2022, S. 58ff.; Dra-2006, S. 57ff.; Gil-2011, S. 310f.].

Transformation der Wandlungstreiber in die Dimension der Rezeptoren

Aufgrund der zum Teil mehrfachen Zusammenhänge von WT und WR und Wechselwirkungen innerhalb der WT und WR stellt dieser Schritt ein nicht triviales Problem dar. Aus diesem Grund schlägt Möller in seiner Dissertation eine Entscheidungsinstanz vor, welche diesen Prozess übernimmt [Möl-2008, S. 21ff.]. Er bleibt jedoch ohne konkrete Angabe zum Vorgehen in dieser Entscheidungsinstanz und setzt analog zu Velkova die angrenzenden Abteilung bzw. Expertengremien in die Hauptverantwortung die WR-Ausprägungen aus den WT abzuleiten (z.B. Entwicklung maßgeblich für WR Produkt) [Möl-2008, S. 23]. Einen Ansatz zur Überführung der Treiber in eine Soll-WF kann im Forschungsprojekt WALaTra gefunden werden, wobei hier durch Gewichtung basierend auf einem Paarweisen Vergleich die WT in die Dimension der WB nicht der WR transformiert werden [Mül-2020, S. 26]. Gill und Zwißler schlagen den Einsatz einer Nutzwertanalyse zur Kombination der WT zu den WR unter den Gesichtspunkten Vorlaufzeit, Dauer, Häufigkeit, Eintrittswahrscheinlichkeit und Einflussnahme vor [Gil-2011, S. 311]. Weitere Ansätze konnten aus der Literaturrecherche dieser Arbeit nicht identifiziert werden.

Im Hinblick auf die vorhandenen Ansätze und unter Bezugnahme der Anforderungen *Einfachheit, Anpassbarkeit, Allgemeingültigkeit* und *Erweiterbarkeit* aus Abschnitt 4.2 schlägt diese Arbeit einen zweistufigen Prozess zur Ermittlung der rezeptorbezogenen Soll-WF vor. Dabei werden im ersten Schritt, adaptiert aus den Arbeiten von Velkova und Ehrenmann, aus einer PESTEL-Analyse in Form eines semistrukturierten Brainstormings innerhalb einer Expertenrunde bestehend aus allen Abteilungen des Unternehmens externe WT identifiziert und in den PESTEL-Kategorien aufgelistet. Diese dienen anschließend dazu in vorgefertigten Fragenkatalogen, welche aus den bestehenden Literaturansätzen abgeleitet und erweitert wurden, die Ausprägungen von WR-Anforderungen auf einer vordefinierten Likert-Skale von (0-4) zu beurteilen. Dabei müssen zum einen die Treiber aus der PESTEL-Analyse, als auch interne Anforderungen an das PLS berücksichtigt werden. Diese Ausprägungen werden abschließend in Prozentwerte (0 – 100% in 25% Schritten) transferiert und zur Soll-WF für diesen Rezeptor gemittelt. Der Fragenkatalog für den WR Produkt zeigt Abbildung 5-5, weitere Kataloge sind Teil von Anhang A. In den freien Zeilen können bei Bedarf weitere Rezeptoranforderungen notiert und beurteilt werden, was den Anforderungen AA2 – *Situative Anpassbarkeit* und AA4 – *Erweiterbarkeit* dient.

5 Methode zur quantifizierbaren Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Brownfield Förder- und Materialflusstechnik

Dieses Vorgehen sollte von jedem Teilnehmer der vorigen Expertenrunde durchgeführt werden, um eine Vielzahl von Einschätzungen zu erhalten. Abschließend können diese Einschätzung direkt gemittelt oder durch den Ablauf einer Delphi-Methode zu einer gemeinsamen Einschätzung zusammengezogen werden.

Fragebogen		Legende				
		0	1	2	3	4
Nr.	Thema	Ausprägung				
1)	Wie umfangreich schätzen Sie zukünftige Änderungen an den physischen Produktmerkmalen ein? (Form, Dimension, Material, etc.)					
2)	Wie umfangreich schätzen Sie zukünftige Änderungen an der Produktstruktur ein?					
3)	Wie umfangreich schätzen Sie zukünftige komponentenbezogenen Änderungen am Produkt ein?					
4)	Wie hoch schätzen Sie die Wahrscheinlichkeit einer Produktmixänderung ein? (Steigerung, Minderung, Einführung, etc.)					
5)	Wie hoch schätzen Sie die Wahrscheinlichkeit einer Neuprodukteinführung ein?					
6)	Welche Geschwindigkeiten besitzen produktbezogene Änderungsprozesse innerhalb des Unternehmens?					
7)						
8)						
9)						
10)						
11)						
12)						
13)						
14)						
Gesamtergebnis						0%

Abbildung 5-5: Erweiterbarer Fragekatalog zur Ermittlung der Soll-Wandlungsfähigkeit, beispielhaft für den Rezeptor „Produkt“ dargestellt.

Zusätzlich zu diesem Ablauf ist es essenziell den Grundgedanken der WF, Unternehmen gegenüber Unsicherheiten robust zu gestalten, nicht außer Acht zu lassen. Unsicherheit führt in diesem Kontext dazu, dass die resultierende einzelne Einschätzung der Soll-WF bezüglich jedes WR selbst einer statistischen Verteilung unterliegen. Aus diesem Grund fordern mitunter Möller, Hawer und Rosentritt die Betrachtung unterschiedlicher Szenarien zur genaueren Prognose zukünftiger WT-Ausprägungen. Gill und Zwißler entwickeln dafür ein Trichtermodell, welches die Bandbreite aus besten, schlechtesten und zu erwartenden WT-Ausprägungen aufspannt [Gil-2011, S. 312]. Drabow setzt in seiner Dissertation unter Zuhilfenahme eines Morphologischen Kastens auf eine Kombination verschiedener WT und deren

Ausprägungen zu unterschiedlichen Szenarien (z.B. Stückzahlsteigerung durch Diversifizierung des Produktportfolios vs. Stückzahlsteigerung und Kostenreduzierung eines Produktes), welche anschließend tiefer betrachtet werden sollen [Dra-2006, S. 57ff.]. Die Erstellung unterschiedlicher Soll-WF in verschiedenen Szenarien ist aus diesen Gründen mit diesem Vorgehen für eine tiefergehende Analyse der WF essenziell und sollte bei Anwendung der Methode durchgeführt werden.

5.2.5 Soll-Ist-Vergleich

Durch Abschluss der Schritte 5.2.2 bis 5.2.4 ist sowohl die Ist- als auch die Soll-WF des Systems sowie der darin vorhandenen PLO vorliegend und kann abschließend in diesem Kapitel zusammengeführt werden. Um diesen Vergleich analysetechnisch tiefer aufzuarbeiten und so die Anforderungen *GA3 – Aussagekräftigkeit* und *GA6 – Ganzheitlichkeit* zu erfüllen, wurde für die Methode ein nicht-binärer Abgleich entwickelt. Unter Berücksichtigung der Anforderung *GA2 – Übersichtlichkeit* wurde als Basis für diesen Vergleich ein etablierter Ansatz aus dem Ingenieurwesen verwendet, welcher für die Bewertung der Wandlungsfähigkeit adaptiert wurde. Dies ist das House-of-Quality (kurz HoQ) auch bekannt unter dem übergeordneten Begriff Quality Function Deployment (kurz QFD).

Der ursprünglich aus dem Qualitätsmanagement stammende QFD-Ansatz wurde um 1970 in Japan entwickelt, hielt rund 10 Jahre später Einzug in die amerikanische Industrie und ist heute ein international Standardansatz, speziell innerhalb des Automobilsektors [Rab-2009, S. 129]. QFD ist eine Sammlung an Methoden, mit dem Ziel die Eigenschaften von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen iterativ an den Kundenanforderungen zu orientieren und diese so zu Verbessern [Lin-2016, S. 630]. QFD kann somit als systematischer Prozess zur anforderungsgerechten Ausrichtung von Objekten und Systemen abstrahiert werden. Das House-of-Quality dient innerhalb dieses Prozesses zur Dokumentation und Darstellung von Informationen, aus denen anschließend Handlungsmaßnahmen abgeleitet werden können [Rab-2009, S. 133f.]. Die Grundstruktur des House-of-Quality, dargestellt in Abbildung 5-6, setzt das WAS des Kunden, linke Hälfte, mit dem WIE des Produktes/Prozesses, oberer Bereich, in Verbindung [Lin-2016, S. 633f.]. Dabei stehen im Zentrum des „Hauses“ die Verbindungen zwischen dem WIE und dem WAS, sowie die Wechselwirkungen der WIEs im „Dach des Hauses“. Aus der zeilenweisen Betrachtung können in der rechten Hälfte sowohl Alternativen als auch Wettbewerber aus der WAS-Sicht miteinander verglichen und so Schwachstellen identifiziert werden. Aus diesem Vergleich sowie dem Zusammenhang der WAS und WIEs ergeben sich die wichtigen und kritischen

WIEs. Im „Keller“ werden Veränderungen an den WIEs untersucht. Detailliertere Ausführungen der Grundstruktur sind zum Teil standardisiert/genormt, z.B. die Version des American Supplier Institut, können und sollten aber nach dem Grundgedanken des QFD auf die notwendige Problemstellung angepasst werden [Lin-2016, S. 633].



Abbildung 5-6: Grundstruktur des House-of-Quality in Anlehnung an [Lin-2016, S. 634]

Analog zum Ziel der QFD-Methode Prozesse und Produkte nach Kundenanforderungen auszurichten ist es das Ziel in der Untersuchung und Gestaltung von WF Unternehmen hinsichtlich wechselnder Umfeldanforderungen auszurichten und so robust und wettbewerbsfähig zu halten [Wes-2009, S. 13f.]. Aus dieser Betrachtung können auch die Grundstrukturen des House-of-Quality hinsichtlich einer WF-Betrachtung adaptiert werden, wodurch die Vergleichsmethode dieser Arbeit entsteht. Das House-of-logistischer-Wandlungsfähigkeit (kurz HoLW), eine unausgefüllte Vorlage zeigt Abbildung 5-7.

Die beiden Grunddimensionen WAS und WIE werden dabei durch die WF-Anforderungen an das PLS, die Wandlungsrezeptoren, und die WF-Eigenschaften des Systems, den Wandlungsbefähiger, gebildet. Der Unterstützungsgrad im Zentrum des HoQ wird im HoLW durch die in Kapitel 5.2.3 ermittelten WB-Gewichtungen, siehe Abbildung 5-4, gebildet. Der Vergleich im rechten Bereich des HoQ erfolgt im HoLW durch den Abgleich zwischen der jeweiligen in Kapitel 5.2.4 ermittelten Soll-WF des Systems bezüglich eines WR und der über Formel (5-1) ermittelten rezeptorbezogenen Ist-WF des WO, wodurch sich der resultierende Need-for-Improvement (kurz Nfi) aus dem Quotienten der beiden Größen ergibt. Ein Need-for-

5 Methode zur quantifizierbaren Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Brownfield Förder- und Materialflusstechnik

Improvement > 1 steht direkt für den Bedarf an Maßnahmen zur Erhöhung der WF bezüglich dieses WR unter dem gewählten Soll-WF-Szenario.

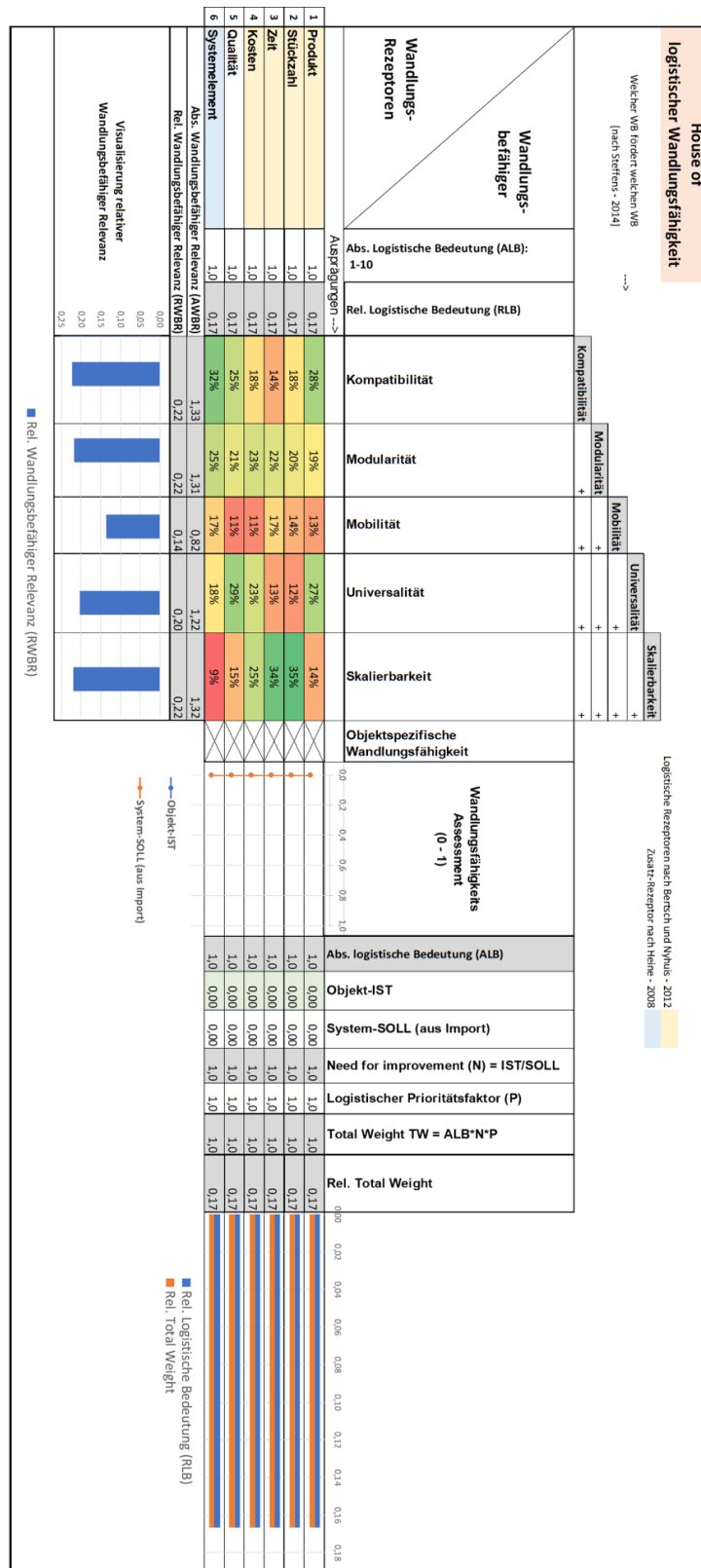


Abbildung 5-7: Leeres House-of-logistischer-Wandlungsfähigkeit mit Basisgewichtungen

Die Wechselwirkungen der WB im „Dach“ des HoLW sind als positive Förderlichkeiten aus der Dissertation von Steffens und somit aus Tabelle 3-1 übernommen. Der Zusatz der Objektspezifischen Wandlungsfähigkeit als sechster WB stammt aus dem WALaTra Projekt und gibt wandlungsförderliche objektspezifische Sondermerkmale auf einer Skala von 0-100% an [Mül-2020, S. 17]. Die Ausprägung dieses sechsten WB ist rein informativ aufgeführt und hat keinen weiteren Einfluss auf die Ergebnisse innerhalb des HoLW, da dieser keinem WR konkret zugeordnet werden kann.

Neben der Gewichtung der WB zu den WR können innerhalb der Vergleichsmethode noch zwei weitere Faktoren angepasst werden. Dies ist zum einen die Absolute Logistische Bedeutung des WR. Die Rezeptorbedeutung kann auf einer Skala von 1 bis 10 (niedrig bis hoch) festgelegt werden und stellt aus Anforderungssicht die Relevanz des WR im Kontext der WF dar. Speziell die WR Produkt, Stückzahl, Zeit und Kosten wurden von Bertsch und Nyhuis als zentral für die logistische WF identifiziert [Ber-2012, S. 438] und sollten daher eine höhere Bedeutung als die Rezeptoren Qualität und Systemelement besitzen. Des Weiteren können die WR noch aus interner Logistiksicht mit einem Prioritätsfaktor belegt werden. Dieser liegt in einem festen Bereich (1.0 = normal, 1.2 = medium und 1.5 = hoch) und stellt aus interner Sicht dar, mit welchem Aufwand ein Wandel bezüglich dieses Rezeptors durchgeführt werden kann. Die Ermittlung dieser Faktoren sollte analog zu den Gewichtungen der WB über einen Expertenkreis entstehen.

Durch die Multiplikation der Rezeptorbedeutung, der Rezeptorpriorität sowie des Nfi ergibt sich im rechten Teil des HoLW die Totale Gewichtung (TW) des Rezeptors. Aus dieser können die WR abgeleitet werden, welche für dieses WO die größte Bedeutung haben und entgegen deren die Wandlungsbefähiger dieses Objektes am stärksten wirken müssen.

Im unteren Teil des HoLW ergeben sich aus der Multiplikation der Totalen Gewichtungen der WR mit den Gewichtungen der jeweiligen WB die Absolute Relevanz der WB. Aus dieser können die Wandlungsbefähiger abgeleitet werden, welche bezüglich der Rezeptoren den größten Hebel zur gesamtheitlichen Verbesserung der Wandlungsfähigkeit besitzen.

Zusammengefasst kann aus dem House-of-logistischer-Wandlungsfähigkeit der Wandlungsbedarf direkt aus dem Need-for-Improvement (**Nfi**) abgeleitet werden, der gesamthafte Einfluss der Wandlungsrezeptoren aus der Totalen Gewichtung (**TW**) sowie die Wandlungsbefähiger mit dem größten Maßnahmenpotential aus der Absoluten Wandlungsbefähiger Relevanz (**AWBR**).

5.2.6 Gesamthafte Zusammenführung

Im vorigen Kapitel wurde erläutert, wie aus dem Soll-Ist-Abgleich der Wandlungsbedarf für einzelne PLO abgeleitet werden kann. Weiterführend zu dieser technischen Einzelbetrachtung verbleiben zwei offene Punkte. Zum einen die konkrete Maßnahmendefinition zur Begegnung der Wandlungsschwachstellen sowie die Zusammenführung der PLO zum PLS zur Fertigstellung der Bottom-Up Bewertung.

Grundlage der Maßnahmenableitung für ein PLO ist zum einen der Nfl, welcher einen grundsätzlichen Wandlungsbedarf indiziert. Besteht der Bedarf Maßnahmen durchzuführen, muss zudem eine Wirtschaftlichkeits-Analyse, siehe Kapitel 3.3.1, hinzugezogen werden, um effiziente Lösungen zu identifizieren. Dabei können grundsätzliche zwei Lösungswege betrachtet werden. Zum einen kann durch gezielte Veränderung das bestehende Objekt verändert werden. Die WB mit dem größten Potential für das Objekt können am AWBR-Wert abgelesen werden. Bei gleichem oder ähnlichem AWBR-Wert sollten die WB verbessert werden, welche nach Steffens andere WB stärker fördern und somit weiter links stehen. Methoden zur Auswahl von Gestaltungsmaßnahmen ausgehend von den WB sind mitunter in der Arbeit von Bethäuser sowie im Forschungsprojekt WaProTek auffindbar [Bet-2023; IFA-2011]. Der zweite Ansatz liegt in dem Tausch bzw. der Umstrukturierung von Objekten. Dabei können entweder TUL-Objekte durch wandlungsfähigere Objekttypen ersetzt werden oder das PLS so umstrukturiert werden, dass in Teilsystemen mit höheren WF-Anforderungen wandlungsfähiger PLO eingesetzt sind.

In Bezug auf diese soeben genannte Gesamtbetrachtung des PLS können drei Ansätze unterschieden werden, um die Gesamt-WF zu ermitteln. Die erste Möglichkeit liegt in der Bottleneck-Denkweise. Dabei definiert das WO mit der geringsten WF maßgeblich die Wandlungsfähigkeit des Gesamt-PLS. Diesen Ansatz vertreten auch Bertsch und Nyhuis und halten daher an diese Objekte zu identifizieren und zu verbessern [Ber-2012, S. 439f.]. Ähnliche Vorgehensweisen finden standardmäßig in der Produktionslogistik zur Ermittlung von z.B. Durchsatz-Engpässen Anwendung und liefern schnell und zielgerichtet Erkenntnisse und Lösungen. Betrachtet man hingegen das System als Summe seiner Teilelemente, analog zu einer Verfügbarkeitsbetrachtung von Materialflusssystemen – siehe z.B. [Arn-2019, S. 320ff.], so kann die Gesamt-WF aus Kombination der Einzel-WF ermittelt werden. Mit Blick auf eine Verfügbarkeitsberechnung bringen, auch bezogen auf die WF in PLS, parallele und doppelte Strukturen zusätzliche Redundanzen. Im Gegenzug müssen in Reihe geschaltete PLO stärker aufeinander abgestimmt sein, da nur das in sich geschlossenen Gesamtsystem wandlungsfähig gegenüber Umfeldveränderungen reagieren kann. Diesen Aspekt wendet auch Heine in seiner Dissertation an, indem er

bei mehrstufigen Kommissioniersystemen die WF des Gesamtsystems als den Mittelwert der Teilsysteme definiert [Hei-2015, S. 132f.]. Tiefergreifend zur Betrachtung nach seriellen und parallelen Strukturen kann als letzter Ansatz die WF der PLO über ihre logistischen Eigenschaften bzw. Leistung gewichtet und zur Gesamt-WF des PLS kombiniert werden. Diesen Ansatz stellt mitunter Bartol in seiner Arbeit vor [Bar-2022].

Diese Möglichkeiten zeigen, dass die Kombination der WF der PLO zur WF des PLS maßgeblich von der Betrachtungsweise abhängig und nicht trivial ist. Dabei werden speziell in den beiden letztgenannten Ansätzen durch Aggregation und Kombination mit anderen Dimensionen die zuvor erarbeiteten Erkenntnisse der WF zunehmend abstrahiert, was entgegen der Anforderung *GA3 - Aussagekräftigkeit* wirkt. Eine Betrachtung aus reiner Bottleneck-Sicht führt jedoch dazu, dass andere Einflüsse wie die Struktur des Systems oder die logistischen Eigenschaften der PLO vernachlässigt werden, wodurch wiederum die Anforderung *GA6 – Ganzheitlichkeit* nicht erfüllt ist.

Zur Kombination der Vorteile und Reduzierung der Nachteile der genannten Ansätze eignet sich die Methode des Wertstrommanagements. Das Wertstrommanagement stammt aus dem Lean Gedanken des Toyota-Production-Systems, wurde Anfang der 2000er Jahre zum Einsatz in produzierenden Unternehmen formalisiert, ist weitreichend innerhalb der Produktions- sowie Logistikplanung etabliert und dient dazu den Fluss von Materialien und Produkten innerhalb einer Produktion darzustellen (Wertstromanalyse) und neu zu gestalten (Wertstromdesign) [Arn-2019, S. 276f.]. In der klassischen Form enthält das Wertstrommanagement nicht die Dimension der Wandlungsfähigkeit, Erlach führt jedoch die WF als Zielaspekt des Wertstrommanagements erstmals 2020 mit in der dritten Auflage seiner Fachliteratur zum Thema Wertstromdesign auf [Erl-2020, S. 12]. Den Ansatz die ursprüngliche Form der Wertstromanalyse um die WF von Objekten und Prozessen innerhalb des Wertstroms zu erweitern, kann bereits 2011 in den Arbeiten von Abele et al. und Klemke et al. gefunden werden [Abe-2011, S. 307; Kle-2011, S. 924]. Beide nutzen dabei die Etabliertheit und bestehenden Strukturen des Wertstrommanagements, um diese mit Informationen zur WF zu vertiefen, betrachten jedoch den Wertstrom aus einer Produktionssicht mit den Produktionsmitteln im Fokus und integrieren TUL-Objekte nur als angrenzende Aspekte des Wertstroms.

Die adaptierte Form der Wertstromanalyse, welche innerhalb dieser Arbeit zur gesamtheitlichen Betrachtung der WF von PLS vorgeschlagen wird, orientiert sich an der Struktur der Systemmodellierung in Knoten-Kanten-Darstellung aus Kapitel 5.2.2. Ein beispielhafter Wertstrom ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Die Prozesskästen der

5 Methode zur quantifizierbaren Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Brownfield Förder- und Materialflusstechnik

TUL-Objekte enthalten neben der Bezeichnung und dem Objekttyp sowohl im oberen Teil die produktionslogistischen Eigenschaften, siehe Abbildung 5-3, wie z.B. Taktzeit, Durchsatz und Kapazität, als auch die WF-Eigenschaften in Form der rezeptorbezogenen Ist-WF aus 5.2.5. Dargestellt wird rein die Systemstruktur in Form des Knoten- und Kanten-Modells mit TUL-Objekten. Dieser Fokus auf die Logistikobjekte erleichtert die Analyse des Wertstroms aus Produktionslogistik-sicht. Es können mittels dieser Darstellung sowohl die Struktur, die logistisch-technischen, als auch wandlungsfähigkeits Eigenschaften des Systems verwendet werden, um Maßnahmen und Schwachstellen der bestehenden Produktionslogistik abzuleiten.

Beispiel-Lager		
Objekttyp	Lagertyp	
Technische System-eigenschaften	Kapazität	20
	Durchsatz	10
	Taktzeit	5
	...	
Rezeptorbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	62,0%
	Stückzahl	61,9%
	Zeit	61,6%
	Kosten	60,5%
	Qualität	61,0%
	Systemelement	59,9%
	Objektspez. WF	50,0%

Beispieltransport		
Objekttyp	Transporttyp	
Technische System-eigenschaften	Kapazität	10
	Durchsatz	15
	Taktzeit	5
	...	
Rezeptorbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	59,4%
	Stückzahl	52,9%
	Zeit	52,7%
	Kosten	54,0%
	Qualität	57,8%
	Systemelement	59,2%
	Objektspez. WF	50,0%

Beispiel-Umschlag		
Objekttyp	Umschlagtyp	
Technische System-eigenschaften	Kapazität	20
	Durchsatz	5
	Taktzeit	5
	...	
Rezeptorbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	87,8%
	Stückzahl	89,8%
	Zeit	89,5%
	Kosten	88,0%
	Qualität	87,4%
	Systemelement	88,0%
	Objektspez. WF	75,0%

Abbildung 5-8: Beispielhafte adaptierte Wertstromanalyse mit Wandlungsfähigkeitseigenschaften

Die WF und somit die Analyse und Bewertung dieser ist ein dynamischer, stets veränderlicher Prozess. Zudem müssen die Ergebnisse nach *GA1 – Aktualität* stets auf dem neusten Stand sein. Aus diesem Grund muss die Anwendung der Methode aus diesem Kapitel kontinuierlich und iterativ durchlaufen werden. Der iterative Ablauf wurde bereits unter dem Thema der Entwicklung unterschiedlicher Szenarien für die Soll-WF angesprochen, Abschnitt 5.2.4. Derselbe Grundsatz gilt auch für die Ableitung und Bewertung bzw. Vergleich von Maßnahmen zur Optimierung der Schwachstellen des PLS. Die kontinuierliche Anwendung der Methode zur regelmäßigen Bewertung und Umsetzung von Maßnahmen sollte dabei einem PDCA-Kreis¹², abgebildet in Abbildung 5-9, folgen. Diesen Ansatz, speziell zur Umsetzung der Maßnahmen vertritt auch Velkova in ihrer Dissertation [Vel-2014, S. 95f.]. Der PDCA-Ablauf startet dabei mit der Definition und Auswahl von Maßnahmen, PLAN, sowie der anschließenden Umsetzung dieser Maßnahmen zur Gestaltung der WF, DO. Dieses neue PLS sowie das Unternehmensumfeld muss anschließend kontinuierlich überwacht, CHECK, und bei essenziellen Veränderungen mittels der Methode neu hinsichtlich Schwachstellen analysiert werden, ACTION.

¹² Kurzform des Plan-Do-Check-Action Ablaufs zur kontinuierlichen Verbesserung von Prozessen und Systemen, siehe ISO 50001.

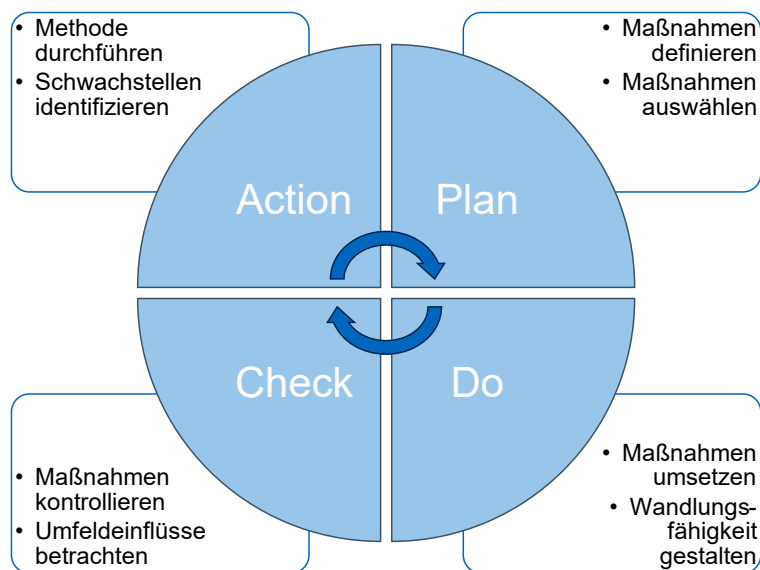


Abbildung 5-9: PDCA-Zyklus der Methode, angelehnt an [Vel-2014, S. 96]

5.3 Anwendungs-Tool der Bewertungsmethode

5.3.1 Grundinformationen und Ablauf

Zur Erleichterung der Anwendung der soeben vorgestellten Methode wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Anwendungstool entwickelt. Das Anwendungstool besteht aus einem informativen Teil mit Anwendungshinweisen und Erklärungen rund um das Thema Wandlungsfähigkeit in der Produktionslogistik sowie einer excelbasierten Modellierungs- und Berechnungsunterstützung, siehe Abbildung 5-11.

Erstere, deren Bestandteil insbesondere die Grundlagen aus Kapitel 2.2 & 3 dieser Arbeit sind, dient dazu Planungs- und Anwendungsexperten der Produktionslogistik mit geringem bisherigem Wissensstand zur WF für eine Analyse und Bewertung dieser zu befähigen. Entsprechende Informationen wurden mit dem Ziel generiert dem Anwender während einer Bewertung zu unterstützen und sollten vor einer erstmaligen Anwendung ausführlich studiert werden. Neben den Informationsblättern wurde für das Anwendungstool eine Nutzungsanleitung angefertigt, welche den Anwendern durch die Funktionsweise und den Ablauf des Anwendungstools führt. Darüber hinaus gibt diese weitere fachliche Unterstützung rund um die Modellierung von und Bewertung der WF von Produktionslogistiksystemen. Die Anleitung und Informationsblätter sind im digitalen Anhang dieser Arbeit zu finden und auf Nachfrage beim Autor dieser Arbeit bzw. dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss und Logistik der TU München erhältlich.

5 Methode zur quantifizierbaren Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Brownfield Förder- und Materialflusstechnik

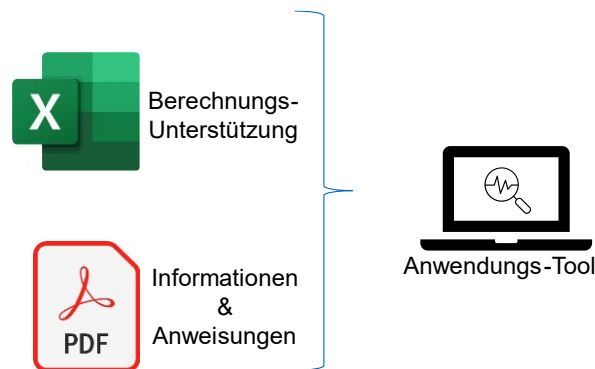


Abbildung 5-11: Zusammensetzung des Anwendungs-Tools

Das Methodentool besteht aus einer Kombination von Excel-Blättern und unterstützt den Anwender in der Modellierung des PLS, der Beschreibung der WO, der Bewertung dieser sowie einer anschließenden Analyse. Die Struktur des Anwendungstools orientiert sich an der vorgestellten Methode und somit an Abbildung 5-1. Dementsprechend existieren 4 Bereiche, welche nun kurz in ihrer Anwendung erläutert werden. Eine ausführliche Beschreibung ist Teil der Nutzungsanleitung.

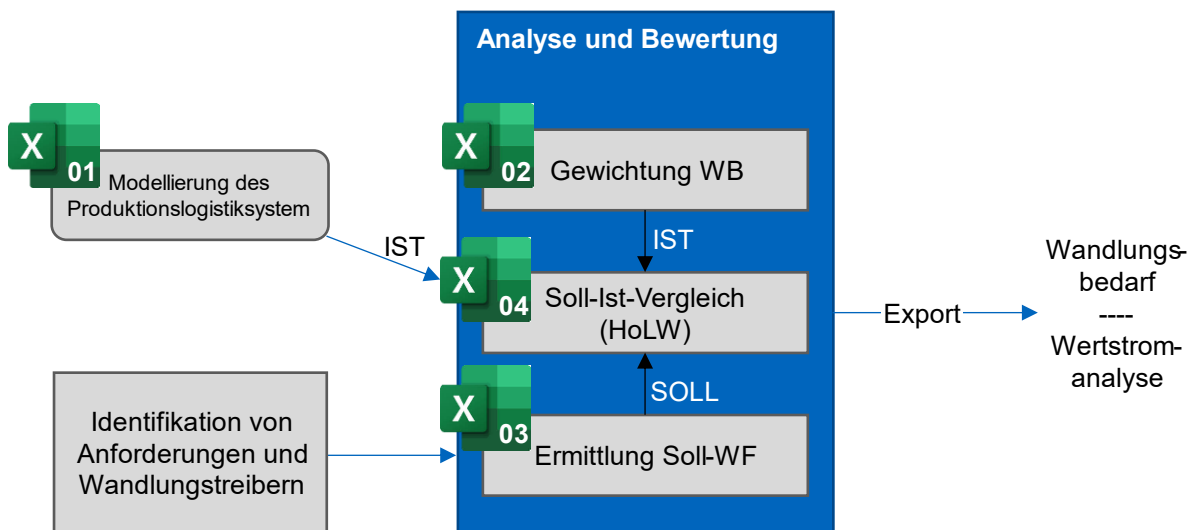


Abbildung 5-10: Struktur und Zusammenhang der Arbeitsmappen aus dem Anwendungstool

5.3.2 Detailbeschreibung

Das Anwendungstool besteht auf Seiten der Berechnungsunterstützung aus vier Excel-Arbeitsmappen, welche über Makros und Verweise miteinander verbunden sind. Der Aufbau aus 4 individuellen Arbeitsmappen dient zum einen für die Erstellung unterschiedlicher Szenarien und Teilsysteme und ermöglicht eine einfachere Kollaboration zwischen mehreren Anwendern. Innerhalb der vierten Arbeitsmappen können dabei die Ergebnisse aus den vorigen drei Arbeitsmappen integriert und miteinander verbunden werden. Am Ende der vierten Arbeitsmappe besteht die

Möglichkeit die Ergebnisse zu exportieren und so ein Szenario abzuschließen sowie die Darstellung der adaptierten Wertstromanalyse aus Kapitel 5.2.6 zu erhalten. Die Verbindung aus den Arbeitsmappen in Anlehnung an Abbildung 5-1 zeigt Abbildung 5-10. Alle Arbeitsmappen sind dabei identisch aus einem ersten Informations- und Zusammenfassungsblatt sowie einem oder mehrerer Arbeitsblätter aufgebaut. Die Informationsblätter geben sowohl relevante fachliche Information und beschreiben den Ablauf und die Benutzung der jeweiligen Arbeitsmappe.

01 – Modellierung des Produktionslogistiksystems

Im ersten Arbeitsblatt wird das PLS modelliert. Dazu können sowohl neue Objekttypen inkl. WB-Ausprägungen angelegt oder die bereits bestehenden Objekttypen aus dem Forschungsprojekt WALaTra ausgewählt werden, siehe Abbildung 5-12. Zudem kann jedes TUL-Objekt im PLS einzeln definiert, die technisch-logistischen Eigenschaften festgelegt und die WB-Ausprägungen durch Auswahl des Objekttyps übernommen werden.

Grundsatzinformationen der Transport-, Lager-, und Kommissionierobjekte			
Objektnummer	Objektbezeichnung	Objektkategorie	Objekttyp
Automatisch erzeugte Beschreibung	Bezeichnung des Wandlungsobjektes (z.B. Mustermann Stapler-Vormontage)	(Transport-, Lager- oder Kommissioniersystem) Auswahl erfolgt mit der Objekterstellung automatisch	Typ des Objektes (Bestimmt die Ausprägungen der Wandlungsbefähiger basierend auf Tabellenblatt "WO-Objekte")
L01	AnfangsLager	Lagersystem	Blocklager Stapler/Kran Ein- bzw. Auslagerung
T01	AnfangsTransport	Transportsystem	FTS Hochregalstapler
K01	ZwischenUmschlag	Kommissioniersystem	Roboter stationär
T02	EndTransport	Transportsystem	Gabelstapler
L02	EndLager	Lagersystem	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung

Abbildung 5-12: Beispielhafte Anlegung von PLO im Anwendungstool

Nach Definition der PLO kann die Struktur des PLS modelliert werden. Die Strukturdarstellung folgt wie in Kapitel 5.2.2 beschreiben einem Knoten- und Kanten-Modell. Für die Modellierung steht eine Logistikmatrix bereit in deren ersten Zeile bzw. Spalte alle Lager- und Umschlags- bzw. Kommissionierobjekte aufgelistet sind. Innerhalb der Matrix können anschließend die Transportobjekte zwischen den Start- und Ziel-Objekten eingetragen werden, beispielhaft in Abbildung 5-13 dargestellt.

nach:				
Logistikmatrix				
Matrix Initialisieren				
von:				
AnfangsLager		AnfangsTransport		
ZwischenUmschlag			EndTransport	
EndLager				

Abbildung 5-13: Beispielhafte Logistikmatrix im Anwendungstool

5 Methode zur quantifizierbaren Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Brownfield Förder- und Materialflusstechnik

Damit sind im ersten Blatt sowohl die die WO mit ihren Eigenschaften und Merkmalen als auch die Struktur des PLS festgelegt. Analog zu Kapitel 5.2.2 ist es empfehlenswert das PLS in Teilsysteme aufzubrechen und diese einzeln zu modellieren.

02 – Gewichtung der Wandlungsbefähiger

Anschließend müssen innerhalb der zweiten Arbeitsmappe die Gewichtungen der WB zu den WR abgeleitet werden. Dazu stehen die bereits aus Kapitel 5.2.3 bekannten Präferenzmatrizen zum direkten Vergleichen der WB zur Verfügung. Das Arbeitsblatt mit den Präferenzmatrizen, siehe Abbildung 5-14, kann beliebig vervielfältigt werden, um die Einschätzungen mehrerer Experten zusammenzuziehen. Nachdem alle Matrizen, Bereich „1“ ausgefüllt sind, werden die resultierenden Gewichtungen, Bereich „2“ im gleichen Arbeitsblatt gezeigt. Die gemittelten Gewichtungen aus allen vorhandenen Arbeitsblättern werden auf dem Informationsblatt dargestellt und stehen so innerhalb des Anwendungstools zur Weiterverwendung zur Verfügung.

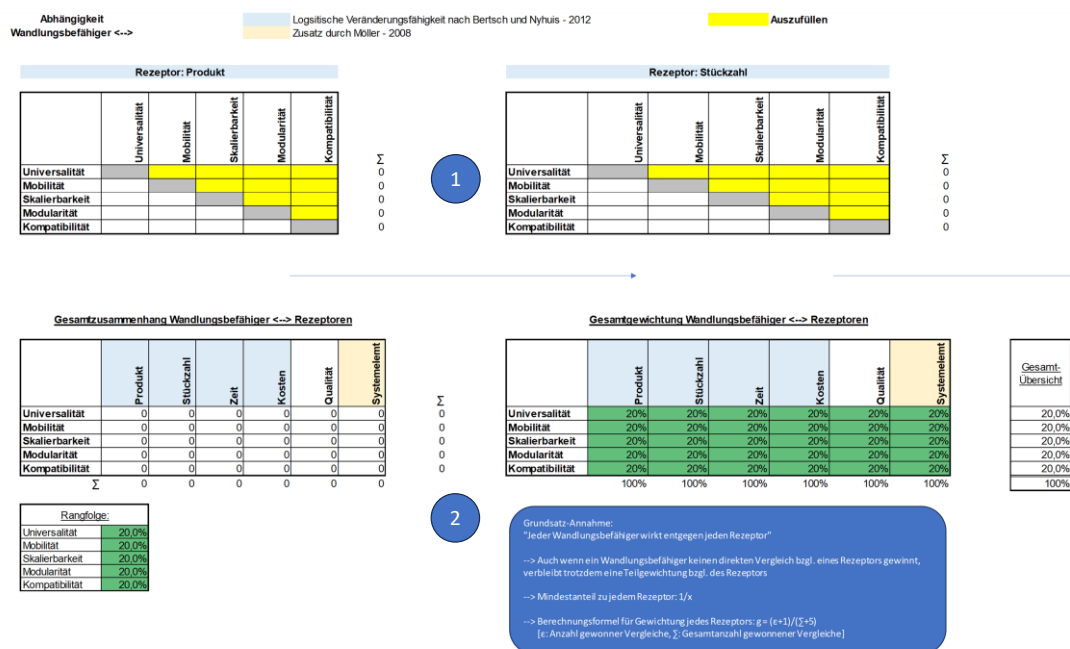


Abbildung 5-14: Arbeitsblatt zur Bestimmung der Wandlungsbefähiger-Gewichtungen

03 – Ermittlung der Soll-Wandlungsfähigkeit des Systems

Grundlage der Ermittlung der Soll-WF des Systems ist die in Kapitel 5.2.4 vorgestellte PESTEL-Analyse zu Identifizierung von Umfeldanforderungen und WT sowie die grundsätzliche Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien. Zur Ermittlung der rezeptorbezogenen Soll-WF sind erweiterbare rezeptorbezogene Fragebögen zur Einschätzung spezifischer Szenarien und Wahrscheinlichkeiten, siehe Abbildung 5-5, im Arbeitsbereich der Arbeitsmappe hinterlegt.

Analog zur Arbeitsmappe der WB-Gewichtung können auch an diesem Punkt die Fragebögen beliebig dupliziert werden, um die Einschätzungen mehrerer Experten zusammenzuziehen. Die gemittelten rezeptorbezogenen Soll-WF aus allen Fragebögen werden auf dem Informationsblatt angezeigt. Dieser Prozess kann und sollte hinsichtlich mehrerer Szenarien (z.B. Best-/Worst-Case, Erwartungsszenario, Stillhalte-Alternative) durchgeführt werden.

04 – Soll-Ist-Vergleich im House-of-logistischer-Wandlungsfähigkeit

Die Ergebnisse aus den ersten drei Arbeitsmappen werden abschließend in der vierten und letzten Arbeitsmappe zusammengeführt. Dabei können die erstellten Arbeitsmappen durch Importvorgänge integriert werden. Die Reihenfolge der Importvorgänge folgt dem regulär innerhalb der Methode definierten Vorgehen. Die Ergebnisse sowie die ausgewählten Dateipfade werden ebenfalls übernommen und angezeigt. Des Weiteren können innerhalb der Arbeitsmappe die letzten verbleibenden Faktoren definiert werden. Dies ist zunächst das Verhältnis aus der WB-Basisgewichtung zur, in Arbeitsmappe 02 erarbeiteten, WB-Eigengewichtung. Eine weitere Eingabebox fragt zudem die Bedeutung der Rezeptoren aus Anforderungssicht auf einer 1-10 Skala sowie die Priorität der Rezeptoren aus interner Produktionslogistikssicht auf einer 1,0-1,2-1,5 Skala ab.

Der Soll-Ist-Vergleich ist anschließend wie in Kapitel 5.2.5 erklärt im HoLW verfügbar. Dazu kann das zu betrachtende PLO ausgewählt werden, wodurch die WB-Ausprägungen in das HoLW übertragen werden. Der Aufbau des HoLW ist identisch zu der beschriebenen Vorlage aus Abbildung 5-7.

Abschließend können die Ergebnisse mittels eines Exportvorgangs in eine eigene Excel-Datei gewandelt werden. Zur Übersicht werden die HoLW jedes hinterlegten WO in einem eigenen Tabellenblatt dargestellt. Des Weiteren ist eine reduzierte Form der Wertstromanalyse aus 5.2.6 im ersten Tabellenblatt verfügbar. Dabei wird die in der Arbeitsmappe 01 festgelegte Struktur des PLS aus Start-Transport-Ziel-Tripeln jeweils in eine eigene Wertstromdarstellung dieser Tripel, siehe Abbildung 5-8, überführt sowie die technisch-logistischen Eigenschaften und die innerhalb des HoLW ermittelten rezeptorbezogenen Ist-WF der PLO in den Objektkästen dargestellt.

Mit diesem Schritt ist der volle Umfang des Anwendungstools ausgenutzt und es verbleibt die kontinuierliche Anwendung und das Exerzieren unterschiedlicher Szenarien und Teilsysteme als Aufgabe und Möglichkeit zur Analyse des PLS.

6 Anwendung und Evaluierung

6.1 Beschreibung des Evaluierungs-Vorgehens

Aufgrund der bereits in Kapitel 4.1 beschriebenen fehlenden Verfügbarkeit von Produktionslogistikdaten oder konkreten Projektumfängen wurde als verbleibender Ansatz entschieden die in Kapitel 5.2 und 5.3 vorgestellte Methode und das Anwendungstool anhand eines fiktiven Anwendungsfalls zu evaluieren. Dieser wurde, inspiriert von aktuellen Industrieherausforderungen, selbst entwickelt und stellt die reduzierte Form eines Automobilwerkes dar. Die Fabrik, dargestellt in Abbildung 6-1, steht aufgrund der aktuellen und kommenden Integration elektrischer und hybrider Antriebsformen in die bestehenden Produktionsstrukturen Herausforderungen gegenüber. Die Testpersonen stellen innerhalb dieses Anwendungsfalls die Produktionslogistikleitung dar und sind mit der zentralen Aufgabe angeordnet das eigene PLS auf WF mittels der vorhandenen Methode und Anwendungstools zu untersuchen und Schwachstellen zu identifizieren. Die gesamte Beschreibung des Anwendungsfalls ist im Anhang B verfügbar.

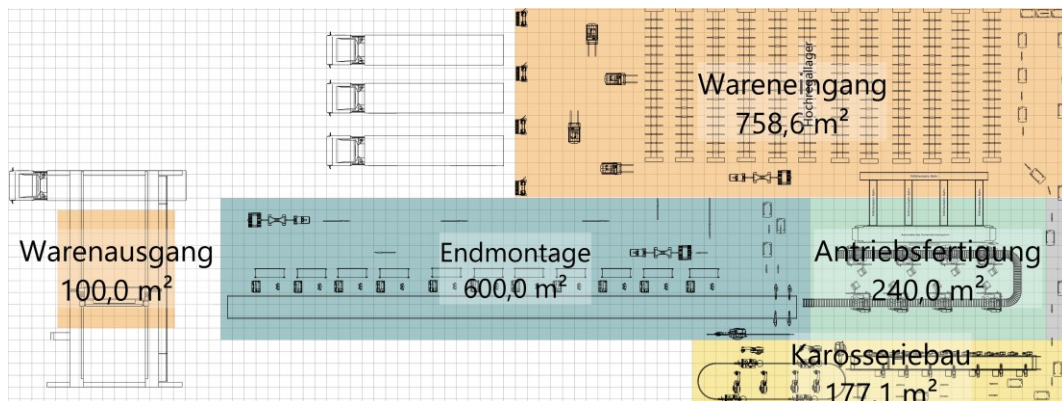


Abbildung 6-1: Layout des Anwendungsfall innerhalb der Validierung

Für den Anwendungsfall standen zwei Kollegen der Munich Consulting Group GmbH mit fachlichem Hintergrund aus dem Bereich Fabrik- und Logistikplanung zur Verfügung. Um den zeitlichen Aufwand für die Kollegen zu begrenzen und zeitgleich direkte Eindrücke zur Anwendung der Methode und des Tools zu erhalten wurde eine semi-strukturiert geführte Erprobung des Anwendungsfalls gewählt. Dabei wurde den Kollegen zunächst eine kurze persönliche Einführung in das Themengebiet der WF sowie in die Struktur und Inhalte der Methode gegeben, siehe Folien im Anhang B. Anschließend wurde die Funktionsweise und der Aufbau des Anwendungstools anhand der Arbeitsmappen und Nutzungsanleitung vorgestellt. Alle Dokumente lagen den Testpersonen sowohl in Papier als auch in digitaler Form als PDF bereit. Die

Zeitdauer dieser Einführung wurde für einen Zeitraum von einer halben Stunde eingeplant und betrug inkl. Rückfragen sowie Übergänge rund 38 Minuten.

Die Durchführung des Testcases erfolgte anschließend eigenständig an je einem PC, wobei bei Fragen der Autor dieser Arbeit jederzeit zur Verfügung stand und die Testpersonen sich in Hörreichweite voneinander in einem Raum befunden haben. Das Eingreifen bei offenen Themen erfolgte in passiver Form durch mündliche Konversation und reduziert auf informative und fachliche Unterstützungen. Die Dauer des Anwendungsfalls wurde für einen Zeitraum von 1,5 Stunden eingeplant und betrug inkl. Rückfragen und kleinerer technischer Probleme ca. 01:45h. Abschließend an die Durchführung des Anwendungsfalls wurden die beiden Testpersonen gebeten einen Fragebogen auszufüllen, welcher der Evaluierung diente. Dieser beinhaltete neben vordefinierten Fragestellungen inkl. Antwortmöglichkeiten zur Methode und dem Tool noch Freifelder mit Bezug auf die Methode, dem Tool und dem Anwendungsfall.

6.2 Resultate

Innerhalb des Tests lag der Fokus auf der Anwendbarkeit und Verständlichkeit der Methode, worauf wiederum auch die Fragebögen innerhalb der Evaluierung konzipiert waren. Des Weiteren konnten aufgrund des fiktiven Anwendungsfalls keine vollkommen realitätsgetreue Anwendungsumgebung geschaffen werden. Zusätzlich ist es das Ziel der Wandlungsfähigkeit Systeme gegenüber veränderten Anforderungen in unbekanntem Ausmaß robust zu machen, wodurch es keine eindeutigen Lösungen für Probleme sowohl in der Realität als auch in künstlichen Anwendungen gibt. Aus diesen Gründen werden innerhalb dieses Abschnitts nicht die Ergebnisse aus den bearbeiteten Arbeitsmappen dargestellt, sondern nur die Erfahrungen der beiden Testpersonen zur Anwendung von Methode und Anwendungstool präsentiert. Hinsichtlich der Erfahrungen standen zwei wesentliche Quellen zur Verfügung. Das begleitende Besprechungsprotokoll während der Anwendung sowie die ausgefüllten Fragebögen, welche inkl. der Analyse-Ergebnisse im Anhang B enthalten sind.

Während der Anwendung konnten grundsätzliche Beobachtungen gemacht werden. Die beigelegte Nutzungsanleitung wurde, vmtl. bedingt durch das enge Zeitfenster von 1,5h sowie der Länge dieser von 22 Seiten, nur geringfügig bis garnicht zu Rate gezogen. Eine Übertragung der Notwendigkeit und des Nutzens der Anleitung in einen realen Anwendungsfall kann daraus nicht geschlussfolgert werden. Beide Testpersonen gingen direkt dazu über die WO zu erstellen und hatten merkliche Probleme mit der Abstraktion des Systems in ein Knoten- und Kanten-Modell aus PLO

ohne Berücksichtigung von Fertigungsprozessen. Die Beschreibung des Anwendungsfall mit nicht-eindeutigen Bezeichnungen der TUL-Objekttypen, welche die Realitätsnähe steigern sollte, führte zu weiteren Problemen sowie z.T. zur Auswahl von ähnlichen, jedoch nicht angedachten Objekttypen. Des Weiteren zeigte sich, dass in der detaillierten Erarbeitung und Erfassung der WO die Grundlage für die effiziente Weiterverwendung gebildet wird. Zwischen beiden Testpersonen lag schlussendlich eine Zeitdifferenz von rund 20 Minuten, die maßgeblich aus der unterschiedlichen Bearbeitungszeit der ersten Arbeitsmappe resultierte. In Bezug auf das Arbeiten mit dem Anwendungstool bestanden lediglich kleinere Rückfragen und Anmerkungen, z.B. eine wünschenswerte alphabetische Sortierung der Objekttypen in der DropDown-Auswahl [Bok-2023, S. 9]. Das Fehlen eines begleitenden Beispiels bei der Einführung in das Tool bzw. die Methode wurde angemerkt, und als Verbesserungsinput vorgeschlagen. Innerhalb der Nutzungsanleitung, wäre jedoch ein kurzes Beispiel vorhanden gewesen, worauf in der Einweisung auch hingewiesen wurde.

Innerhalb des Vorstellungsteils [Bok-2023, S. 1ff.] traten, soweit aktiv geäußert, nur geringe Anmerkungen zum inhaltlichen Verständnis der WF auf. Wobei in einem kleineren Umfang das Thema der tendenziell reduzierten WF bei Steigerung des Automatisierungsgrades besprochen wurde. Auch im weiteren Verlauf traten nur geringfügig Fragen zur WF auf. Im Bereich der WR und Gewichtung der WB wurde vor allem der hohe geforderte Abstraktionsgrad für einen Test angemerkt, welcher die Bearbeitung dieser Schritte komplex gestaltet [Bok-2023, S. 14f.].

Aus dem Besprechungsprotokoll, speziell der großen Anzahl an Rückfragen zu den Systemelementen und deren Verbindungen [Bok-2023, S. 9ff.], sowie aus dem Freifeldbereich des Umfragebogens ergibt sich, dass die Modellierung des Systems sowie der Objekte den größten und komplexesten Anteil an der Durchführung der Methode eingenommen hat. Dies führte dazu, dass die ursprünglich angedachte Zeit von 1,5h über 20min überschritten und ohne tiefere Analysen der Ergebnisse beendet wurde. Der verlängerte Umfang lag zum einen an der grundlegenden Komplexität des Anwendungsfalls, welchen beide Testpersonen sowohl innerhalb des Besprechungsprotokolls als auch in ihren Freifeldern anmerken, als auch darin, dass die Erklärung der Systemmodellierung in Logistikmatrix- und Knoten-Kanten-Modell-Form unzureichend war [Bok-2023, S. 13]. Eine weitere Erkenntnis aus der Anwendung des Tools ist, dass eine korrekte aktuelle Version von Microsoft Excel auf dem Arbeitsrechner installiert sein muss, damit die Arbeitsmappen korrekt funktionieren [Bok-2023, S. 9]. Auf Nachfrage bzgl. einer Aufteilung und anschließenden Teilsystem-Modellierung zur Reduzierung der Komplexität der Methode wurde angemerkt, dass bei der erstmaligen Anwendung sowie unter

6 Anwendung und Evaluierung

Berücksichtigung der Unbekanntheit des Anwendungsfalls das Verständnis dieser im Vordergrund lag [Bok-2023, S. 12].

Die Auswertung der Umfrageergebnisse in Abbildung 6-2 zeigt, dass in vielen Fällen die Antworten der beiden Testpersonen übereinstimmen und nie mehr als 2 Stufen voneinander abweichen. Die Antworten behalten auch bei Abweichung eine ähnliche Tendenz bei und können somit, unter der Restriktion der reduzierten statistischen Aussagekraft aufgrund der geringen Grundgesamtheit, als weitestgehend deckend angesehen werden.

Methode		Legende				
		0	1	2	3	4
Moritz Bokan-Heller	X					
Jan Thiessen	X					

Nr.	Thema	Ausprägung				
		0	1	2	3	4
1)	Wie bewerten Sie die Komplexität der Methode?			X		X
2)	Wie viel zusätzliches Vorwissen benötigt ein Fachteam im Bereich der Produktion/Logistik, um diese Methode anzuwenden?				X X	
3)	Wie Aussagekräftig schätzen Sie die erhaltenen Ergebnisse ein?			X		X
4)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie eine regelmäßige Anwendung der Methode im Regelbetrieb eines Unternehmens ein?			X X		
5)	In welchem Umfang verbleiben nach der Anwendung der Methode noch offenen / nicht betrachtete Themen?	X		X		
6)	Wie Bewerten Sie die Menge an erhaltenen Ergebnissen bzw. Kennzahlen? [0 zu gering, 2 richtige Anzahl, 5 zu groß]			X X		
7)	Wie bewerten Sie die Allgemeingültigkeit der Methode innerhalb der Produktionslogistik?			X X		

Nr.	Thema	Ausprägung				
		0	1	2	3	4
1)	Wie bewerten Sie den zeitlichen Aufwand zur Durchführung der Methode/des Tools?					X X
2)	Wie bewerten Sie die Menge an Informationsmaterial zur Durchführung der Methode/des Tools? [0 zu gering, 2 richtige Anzahl, 4 zu groß]			X	X	
3)	Wie bewerten Sie die Menge an anwendungsfallspezifischen Anpassungsmöglichkeiten innerhalb der Methode/des Tools? [0 zu gering, 2 richtige Anzahl, 4 zu groß]			X X		
4)	Wie sehr unterstützt das Anwendungstool in der Umsetzung der Methode?			X		X
5)	Wie bewerten Sie die technische Ausgereiftheit des Anwendungstools? [0 sehr schlecht, 2 OK, 4 sehr gut]			X	X	
6)	Wie bewerten Sie die optische Ausgereiftheit des Anwendungstools? [0 sehr schlecht, 2 OK, 4 sehr gut]			X		X
7)	In welchem Umfang hätten Sie weitere Kriterien mit in die Bewertung aufnehmen wollen?		X X			

Abbildung 6-2: Übersicht der Ergebnisse des Fragebogens zur Test-Anwendung

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Grundlegende Diskussion des methodischen Ansatzes

Die Methode wurde mit dem Ziel entwickelt eine technische Bewertung der WF von bestehender Förder- und Materialflusstechnik in PLS durchzuführen und daraus Schwachstellen und Verbesserungsbedarfe abzuleiten. Diese Bewertung sollte eigenständig anhand von technischen Merkmalen und Eigenschaften durchgeführt werden können ohne Bedarf an externer Unterstützung. Zur Erarbeitung der Methode wurde zunächst eine umfangreiche und systematische Literaturrecherche durchgeführt, welche in Kapitel 2.2 und 3 anschließend aufgearbeitet wurde. Diese Literaturansätze wurden anschließend im Kapitel 5 miteinander kombiniert und mit etablierten Methoden und Vorgehensweisen aus dem Ingenieurs- und Logistikbereich sowie eigenen Überlegungen erweitert. Sämtliche Ansätze zur Erarbeitung der Methode resultierten somit aus theoretischen Gedankengängen und Grundlagen, ohne direkten Praxisbezug. Dieser fehlende Bezug zu realen Anwendungsfällen und Problemen resultiert aus einem fehlenden Projektumfang. Innerhalb der bestehenden Projekte des Partnerunternehmens dieser Arbeit, der Munich Consulting Group GmbH, welche von kleinen und mittelständischen Unternehmen dominiert sind, wurde das Thema der WF zwar angemerkt, aber von allen Projektparteien zu Gunsten höherpriorer Probleme nicht weiter betrachtet. Dies deutet auf ein fehlendes Grundverständnis zur Relevanz der WF bei kleineren Unternehmen hin.

Der hohe Theorieanteil erschwert weiterhin die Evaluierung und Übertragung der Methode in die Praxis. Erfahrungen und Anmerkungen aus unterschiedlichen Anwendungsfällen sind unabdingbar für eine Validierung und Anpassung der Methode, weshalb der aktuelle Arbeitsstand, aufgrund des hohen wissenschaftlichen Anteils auf Literaturbasis, als breite Grundlage mit spezifischer Vertiefung auf Förder- und Materialflussobjekte im ersten Entwurfsstand angesehen werden kann. Weitere Iterationen zu Verbesserung und Anpassung der Methode sowie des begleitenden Tools sind für die tiefere Etablierung und Praxisausrichtung notwendig und müssen im Anschluss an diese Arbeit erfolgen. Zentrales Element innerhalb der Arbeit ist die Adaptierung des QFD bzw. House-of-Quality auf die WF, um die Ausprägungen der WB gezielt an den Anforderungen, den WR, auszurichten. Ähnliche Ansätze dazu können in der Flexibilitätsforschung gefunden werden, innerhalb der WF stellt dies, basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche, jedoch eine wissenschaftliche Neuheit dar. Die Validität dieses Ansatzes konnte dessen ungeachtet nicht evaluiert werden und verbleibt somit eine theoretische Überlegung, welche sich auf den

Grundsätzen der WF und der bestehenden Literatur stützt. Weiterer Schwachpunkt in der Validierung verbleiben die Randbereiche der Methode, in welchen sowohl die exakte Maßnahmenableitung als auch Erfassung von Umfeldfaktoren zu großen Teilen unbetrachtet blieben.

Die Arbeit wurde mit Ausrichtung auf PLS und der darin enthaltenen PLO entwickelt. Dies hat jedoch maßgeblich nur auf die Modellierungsform der betrachteten Systeme Auswirkungen. Sowohl die Gewichtung der WB als auch Bestimmung der Soll-WF und abschließenden Soll-Ist-Vergleich ist weitestgehend ohne Bezug auf die Produktionslogistik entwickelt und hergeleitet worden. Ausnahme bildet an dieser Stelle die reduzierte Wertstromanalyse, welche rein TUL-Prozesse innerhalb des Wertstroms darstellt. Aufgrund dieser breiten Basis mit spezifischer Ausrichtung und auf PLS kann die Methode über eine Erweiterung der Modellierungsumfänge grundlegend auf den vollen Wertstrom inkl. Produktionsprozesse und damit auf die gesamte technische Dimension einer Fabrik übertragen werden. Dies verbleibt jedoch eine Überlegung, welche es zu bestätigen gilt.

Das Anwendungstool in Form mehrerer Excel-Arbeitsmappen konnte schnell und zielgerichtet entwickelt werden und ist, unter Berücksichtigen einer aktuellen Microsoft Excel-Version, ohne Installations- oder Setup-Prozesse auf gängigen Arbeits-PCs ausführbar. Zudem ist die Microsoft Excel Benutzeroberfläche und ihre Möglichkeiten im Praxisumfeld weit verbreitet und Bedarf grundsätzlich keiner weiteren Einführung vor der Benutzung. Das Anwendungstool besitzt in aktueller rudimentärer Form jedoch noch Optimierungsbedarf, deren Umfang durch die Rahmenbedingungen von Microsoft Excel begrenzt sind. Aus diesem Grund sollte eine Weiterentwicklung in eine konkrete Softwareanwendung angestoßen werden, welche durch die Übertragbarkeit von VBA auf VB-Code grundlegend gegeben ist, aber weiterer Programmier- und Testumfängen bedarf. Zusätzliche Erweiterung, wie z.B. eine Ausgabe der WO mit größtem Handlungsbedarf, sind durch eine grundsätzlich modulare Softwarestruktur durchführbar und wurden aufgrund der zeitlichen Limitierung der Arbeit nicht umgesetzt werden.

Zusammenfassend bilden sowohl Methode als auch Anwendungstool eine spezifische Ausarbeitung einer breiten Literaturbasis, deren Validität in weiteren Anwendungsfällen und Forschungsvorhaben geprüft werden muss. Die Ansätze sind jedoch so gestaltet, dass diese auf andere Bereiche innerhalb der Wandlungsfähigkeit von Fabrik und Produktion übertragen und erweitert werden können, was wiederum der Allgemeingültigkeit zugutekommt.

7.2 Diskussion der Anforderungserfüllung der Methode

Der Erfüllungsgrad der in Abschnitt 4.2 erarbeiteten und definierten Anforderungen an die Methode wird innerhalb dieses Abschnitts anhand der gewählten Ansätze und dem Anwendungsfall aus Kapitel 6 diskutiert. Die Abstufung erfolgt auf einer definierten Skala [nicht erfüllt, größtenteils nicht erfüllt, bedingt erfüllt, größtenteils erfüllt, erfüllt].

Grundsätzliche inhaltliche Anforderungen

GA1 – Aktualität: Die Herleitung der Methode basierte auf aktuellen Erkenntnissen des Forschungsstandes zur Wandlungsfähigkeit und integriert maßgeblich Publikationen, mit einem Veröffentlichungsdatum von weniger als 10 Jahren. Durch den in Abschnitt 5.2.6 vorgestellten PDCA-Zyklus sind Anwender der Methode zudem angehalten diese regelmäßig einzusetzen und somit den Ergebnisstand aktuell zu halten. Aus diesen Gründen wird diese Anforderung als erfüllt angesehen.

GA2 – Übersichtlichkeit: Die Struktur der Methode folgt dem etablierten Ansatz des Regelkreises der Wandlungsfähigkeit und verwendet zu Darstellung der Ergebnisse adaptierte Formen der verbreiteten Methoden des Wertstrommanagements und des House-of-Qualitys. Da das Vorgehen zur Bewertung und Betrachtung der WF in der Industrie nur begrenzt bekannt und das Anwendungstool nur rudimentär implementiert ist, verbleiben in der Anwendung jedoch offene Punkte zum Zusammenhang der einzelnen Bereiche. Demzufolge wird diese Anforderung als bedingt erfüllt eingestuft.

GA3 – Aussagekräftigkeit: Die Methode liefert sowohl Informationen zu Wandlungsbedarfen, den Einfluss der WR sowie den WB mit größten Optimierungspotenzial. Innerhalb der Anwendung wurde die Aussagekräftigkeit im Mittel als Groß und der Umfang an offenen Punkten als klein eingestuft. Eine direkte Ausleitung der Maßnahmen ist jedoch ohne wirtschaftliche Betrachtungen nicht effizient und die Ergebnisse sind maßgeblich von der Einschätzung zur Gewichtung der WB sowie der Soll-WF abhängig. Aus diesen Gründen wird diese Anforderung als größtenteils erfüllt eingestuft.

GA4 – Allgemeinverständlichkeit: Die Bewertung stützt sich auf dem Grundverständnis der Modellierung und dem Betrieb von PLS, welcher im Fachbereich der Produktionslogistik prinzipiell vorhanden ist. Die Anwendung der Methode erfordert jedoch, auch nach Sicht der Testpersonen, ein hohes Maß an zusätzlichem Vorwissen und Informationsmaterial sowie einer Einführung und Beispielen. Diesen Faktoren wurde versucht mittels der Informationsblätter in den Arbeitsmappen sowie der Nutzungsanleitung entgegenzuwirken. Es verbleibt jedoch weiterhin ein erheblicher

Aufwand zur Einarbeitung in die Thematik der Wandlungsfähigkeit, da diese in der Praxis nur in geringem Umfang verbreitet ist. Deshalb wird diese Anforderung als bedingt erfüllt angesehen.

GA5 – Mengenmäßige Überschaubarkeit: Die Methode gibt pro Wandlungsobjekt 17 ermittelte Kennzahlen zurück, welche jedoch in direkten Verhältnissen zueinanderstehen und unterschiedliche Betrachtungen des gleichen Ergebnisses ermöglichen. Eine zunehmende Verdichtung der Kennzahlen führt zudem zu einem Verlust an der praktischen Relevanz und Anwendbarkeit. Innerhalb der Probeanwendung der Methode wurde des Weiteren die Menge an Kennzahl als genau richtig bewertet. Aus diesen Gründen wird diese Anforderung als erfüllt angenommen.

GA6 – Ganzheitliche Bewertung: Die Methode erfasst auf Seiten der Produktionslogistik technische Elemente und Eigenschaften der Förder- und Materialflussobjekte ohne Berücksichtigung räumlicher oder organisatorischer Aspekte. Des Weiteren ist der nachgelagerte Einfluss von monetären Aspekten innerhalb der Methode außen vor und wird nicht in die Bewertung miteinbezogen. Durch die Überführung der Ergebnisse in Wertstromdarstellung mit den technisch-produktionslogistischen Eigenschaften, wird jedoch eine Brücke zwischen der WF und dem übergeordneten PLS geschlagen. Zusätzlich geben die Testpersonen aus dem Anwendungsfall nur einen niedrigen Bedarf zur Integration weiterer Kriterien in die Bewertung mit an. Demzufolge wird die Anforderung Ganzheitlichkeit als bedingt erfüllt eingestuft.

Anwendungsbezogene Anforderungen

AA1 – Einfache Anwendbarkeit: Durch die Verwendung etablierter Ansätze, wie der Wertstromdarstellung oder dem HoQ wurde versucht die Anwendbarkeit der Methode zu verbessern. Zusätzlich wurde das Anwendungstool entwickelt, um sowohl eine Berechnungs- als auch Informationsunterstützung darzustellen. In der Probeanwendung wurde jedoch sowohl die Komplexität als auch der zeitliche Aufwand der Methode als hoch bewertet. Das Anwendungstools hat sich jedoch zur Unterstützung bewährt und wurde im Bewertungsbogen als positiver Zusatz mit kleineren Verbesserungsmöglichkeiten vermerkt. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte ist die Anforderung der einfachen Anwendbarkeit nur bedingt erfüllt.

AA2 – Situative Anpassbarkeit: Innerhalb des Anwendungstools sowie der Bewertungsmethode können sowohl individuelle Gewichtungen verwendet als auch zusätzliche Objekttypen angelegt werden. Weitere Randbedingungen mit Einfluss auf die Soll-WF des Systems können zudem in der entsprechenden Arbeitsmappe ergänzt

und bewertet werden. Auf Angabenseite sind lediglich innerhalb des Anwendungstools die Gewichtungs- und Ausprägungs-Skalen anwendungsbedingt limitiert sowie die Ausführung der technischen Eigenschaften der WO. Die Testpersonen sahen weiterhin die Anzahl anwendungsfallsspezifischer Anpassungsmöglichkeiten als korrekt an. Aus diesen Gründen wird diese Anforderung als erfüllt eingestuft.

AA3 – Allgemeingültigkeit: Bereits im vorigen Kapitel 7.1 wurde die breite theoretische Basis aus etablierten Logistik- und Ingenieursmethoden sowie WF-Forschung diskutiert. Diese wurde zwar für PLS innerhalb des Anwendungstool spezialisiert, beinhaltet wie beschrieben jedoch die Möglichkeit auf weitere Bereiche der Fabrik bzw. Produktion erweitert zu werden. Dies gilt es jedoch noch durch Studien und weiterer Forschung zu beweisen. Dasselbe gilt für die Annahme, dass Anforderungen stets an das Gesamt- bzw. Teilsystem innerhalb der Produktionslogistik gestellt werden, diesen Anforderungen anschließend jedoch objektspezifisch begegnet wird. Innerhalb der Anwendung wurde die Allgemeingültigkeit der Methode von den Testpersonen als mittel bewertet. Unter diesen Gesichtspunkten wird die Allgemeingültigkeit als größtenteils erfüllt angenommen.

AA4 – Erweiterbarkeit der Bewertung: Innerhalb des Ablaufs der Methode sind Möglichkeiten zur Erweiterung enthalten. Zum einen können in die Ermittlung der WB-Ausprägungen mit dem Merkmalskatalog aus Anhang A weitere Merkmale integriert werden. Zweitens bieten die Faktoren zur Bedeutung und Relevanz der Rezeptoren die Möglichkeit zusätzliche Einflussfaktoren an das PLS zu betrachten und zu gewichten. Die Methode wurde jedoch für eine technische Bewertung konzipiert und ist in ihrer Grundstruktur nicht dazu ausgelegt organisatorische, räumliche oder monetäre Aspekte direkt zu berücksichtigen. Dies ist jedoch im Nachgang möglich und durch die individuelle Betrachtung dieser Dimensionen werden die Einzelergebnisse nicht weiter abstrahiert. Deswegen wird diese Anforderung als größtenteils erfüllt eingestuft.

Eine Übersicht zu den Anforderungen und in welchem Grad diese durch die Methode und das Anwendungstool erfüllt werden konnten zeigt Abbildung 7-1. Aus dieser kann entnommen werden, dass die Anforderungen im Mittel Großteils erfüllt werden. Ein ähnliches Ergebnis spiegelt auch die Diskussion aus Abschnitt 7.1 wider. Die Methode liefert somit eine gute Grundlage mit Verbesserungspotenzial, auf welcher in folgend Forschungsumfängen aufgebaut werden kann.

7 Diskussion der Ergebnisse

Grundsätzlich Inhaltliche Anforderungen

Legende				
Nicht Erfüllt	Großteils nicht Erfüllt	Bedingt Erfüllt	Großteils Erfüllt	Erfüllt

Nr.	Thema	Ausprägung			
GA1)	Aktualität				X
GA2)	Übersichtlichkeit			X	
GA3)	Aussagekräftigkeit			X	
GA4)	Allgemeinverständlichkeit			X	
GA5)	Mengenmäßige Überschaubarkeit				X
GA6)	Ganzheitliche Bewertung			X	

Anwendungsbezogene Anforderungen

Nr.	Thema	Ausprägung			
AA1)	Einfache Anwendbarkeit			X	
AA2)	Situative Anpassbarkeit				X
AA3)	Allgemeingültigkeit			X	
AA4)	Erweiterbarkeit der Bewertung				X

Abbildung 7-1: Übersicht der Anforderungserfüllung der Bewertungsmethode und des Anwendungstools

7.3 Beantwortung der Forschungsfragen

Nachdem in den beiden vorigen Unterkapiteln sowohl die Methode grundsätzlich als auch die Anforderungserfüllung dieser diskutiert wurde verbleibt noch die Beantwortung der Forschungsfragen aus Kapitel 1.2. Dies erfolgt innerhalb dieses Abschnitts.

R1) Welche Dimensionen umfasst die Wandlungsfähigkeit in der Produktionslogistik?

Die Wandlungsfähigkeit in der Produktionslogistik umfasst die Dimensionen der Wandlungstreiber, Wandlungsobjekte und Wandlungsbefähiger. Im Zentrum der WF stehen die Objekte und Teilsysteme der Produktionslogistik, welche sich verändern müssen. Der Impuls des Wandels wird durch die WT von internen und externen Anforderungen initiiert und über die WR auf die Produktionslogistik übertragen. Dabei sind speziell die Faktoren Produkt, Stückzahl, Zeit und Kosten für PLS ausschlaggebend. Den WR wirken die WB entgegen, welche den WO ermöglichen den Wandel durchzuführen. Sie verleihen den WO somit das technische (Wandelbarkeits-) Potenzial wechselnden Anforderungen gerecht zu werden. Eine Übersicht der Dimensionen der Wandlungsfähigkeit in der Produktionslogistik zeigt Abbildung 7-2.

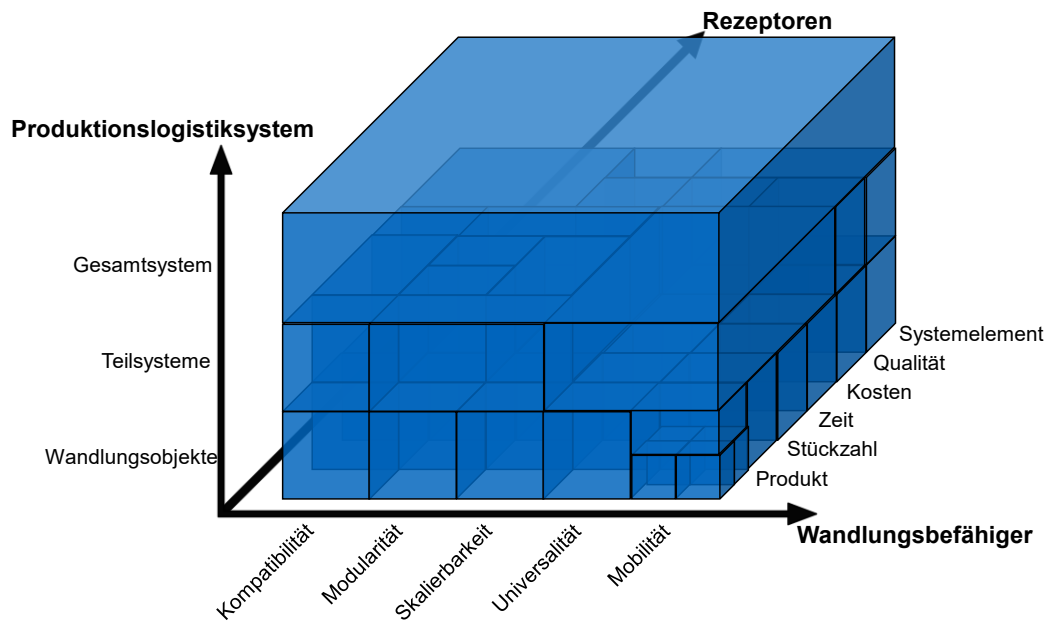


Abbildung 7-2: Dimensionen der Wandlungsfähigkeit in der Produktionslogistik

R2) Wie können diese Dimensionen in Kennzahlen transformiert und auf die unterschiedlichen Ebenen der Produktionslogistik übertragen werden?

Die Kennzahlen der Dimensionen bilden die genannten und in Abbildung 7-2 dargestellten Wandlungsrezeptoren und Wandlungsbefähiger. In der Dimension der Produktionslogistik kann den Wandlungsobjekten im System keine Kennzahl, sondern nur eine strukturbezogene Position, sowie Eigenschaften und Merkmale zugeordnet werden. Neben den WO ist zudem die Struktur des PLS sowie die Definition von Teilsystemen essenzieller Bestandteil zur späteren Analyse der Wandlungsfähigkeit. Aus diesen Merkmalen kann über einen Merkmalskatalog die WB-Ausprägungen für jedes Wandlungsobjekt ermittelt werden. Näheres dazu ist in den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3. erklärt. Die Rezeptoren können aus den Umfeldanforderungen abgeleitet werden und bilden eine Soll-WF für ihren jeweiligen Bereich ab. Dabei bleibt die Ermittlung der Soll-WF aus den Wandlungstreibern ein nicht-triviales Problem, welches nur am Rande dieser Masterarbeit betrachtet wurde und in 5.2.4 erläutert ist.

R3) Wie können, basierend auf diesen Kennzahlen, Evaluierungsmethoden eingesetzt werden, um Engpässe und Ineffizienzen der Wandlungsfähigkeit von Förder- und Materialflusstechnik in Brownfield-PLS zu ermitteln?

Die Bewertungsmethode im Zentrum dieser Arbeit stellt eine adaptierte Form des House-of-Quality dar, in welchem die Anforderungen an die WF (die Wandlungsrezeptoren) mit den Eigenschaften der WF (die Wandlungsbefähiger) für jedes WO verglichen werden, dargestellt in Abbildung 7-3. Für diesen Vergleich werden zunächst die WB über Gewichtungen in die rezeptorbezogenen Ist-WF

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Masterthesis war es die Wandlungsfähigkeit von Unternehmen der diskreten Fertigung genauer zu untersuchen, damit Wandlungsbedarfe abgeleitet und Schwachstellen optimiert werden können. Dazu wurden zunächst Grundlagen zu Produktionslogistiksystemen, der WF und Bewertungsansätzen erarbeitet sowie ein detaillierter Stand der Technik und Forschung erstellt. Aus dieser Grundlage konnte der Bedarf für eine aufwandsarme, merkmalsbasierte quantitative Methode zur technischen Bewertung der WF von Förder- und Materialflusstechnik abgeleitet werden. Zusätzlich wurden inhaltliche und anwendungsbezogene Anforderungen an diese Methode erfasst und definiert.

Auf Basis bestehender Literaturansätze sowie etablierter Methoden zur Analyse von Produktionsprozessen und Produkten wurde anschließend ein Vorgehen inkl. Anwendungstool abgeleitet in dessen Zentrum der Abgleich aus den Anforderungen an mit den Eigenschaften des wandlungsfähigen PLS steht. Dieses Vorgehen modelliert dazu zunächst das bestehende System mit allen enthaltenen Elementen und Merkmalen und ermittelt aus diesen Merkmalen die Wandlungsbefähiger-Ausprägungen für jedes PLO. Dem gegenüber stehen die Soll-Ausprägungen der WF in Form der Wandlungsrezeptoren, welche aus einer Umfeldbetrachtung mittels eines Fragenkatalogs abgeleitet werden. Im, in dieser Arbeit entwickelten, House-of-logistischer-Wandlungsfähigkeit werden abschließend über definierte Gewichtungen die WB in die jeweiligen rezeptorbezogenen Wandlungsdimensionen transformiert, wodurch ein Soll-Ist-Vergleich in der Struktur eines Regelkreises möglich ist. Dadurch lassen sich sowohl Wandlungsschwachstellen der Eigenschaften des Systems als auch Wandlungsbedarfe durch Anforderungen an das System ableiten, mit denen eine zielgerichtete Optimierung des PLS und der darin enthaltenen Objekte möglich ist.

Diese Methode wurde anschließend mittels zweier Fabrik- und Logistikplanungs-Experten und einem fiktiven Anwendungsfall evaluiert. Anhand dieser Beispielapplikation zeigten sich die Potentiale der methodischen Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionslogistiksystemen. Jedoch wurde auch der zum Teil fehlende Praxisbezug, die hohe grundsätzliche Komplexität des Themas Wandlungsfähigkeit und die technische Ausbaufähigkeit des Anwendungstools deutlich. Ebenso verbleibt die Validierung der Methode ein offener Punkt, den es durch folgende Forschungstätigkeiten zu schließen gilt.

8.2 Ausblick

Die Wandlungsfähigkeit von Systemen hat in den letzten Jahren für produzierende Unternehmen erneut deutlich an Relevanz zugenommen. Aus der Anforderung die Logistik gemischter Produktionslinien für elektrische, hybride und klassische Antriebsformen in unbekanntem Stückzahlen bei einem Nutzfahrzeughersteller zukunftssicher zu gestalten, entstand das Dissertationsprojekt, welches auch diese Arbeit initiierte. In anderen Industriesektoren bringen mitunter neue Lieferkettengesetze, technologische Entwicklungen und politische Spannungen ebenfalls Unsicherheiten und Impulse in bestehende Produktionskonzepte und Fabriken. Die Beherrschung dieser Einflüsse stellt für Unternehmen neben der Herausforderung jedoch zeitgleich auch eine Möglichkeit zur Sicherung der eigenen Marktposition sowie Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit dar.

Aus diesen Gründen ist die technische sowie wirtschaftliche Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Prozessen für Unternehmen eine zwingende Notwendigkeit, deren Qualität nachhaltig den Unternehmenserfolg definiert. Ein Ansatz inklusive Anwendungsunterstützung für die technische Betrachtung von Förder- und Materialflusssystemen wurde innerhalb dieser Arbeit entwickelt, welcher Unternehmen eine effektive Ausrichtung der eigenen Systeme entlang der gestellten Anforderungen ermöglichen soll.

Neben der praktischen Erprobung und iterativen Verbesserung sowie Erweiterung dieses Ansatzes auf die gesamte Produktionslogistik sowie die Fabrikdimensionen Organisation und Raum besteht vor allem in den angrenzenden Bereichen dieser Arbeit noch erheblicher Forschungsbedarf. Speziell der Prozess der frühzeitigen Erkennung und langfristigen Prognose von Wandlungstreibern sowie die Bildung einer Soll-Wandlungsfähigkeit aus diesen verbleibt ein bis dato offener Punkt, der die Grundlage für die angemessene Dimensionierung der Wandlungsfähigkeit legt. Im Hinblick der Dimensionierung der Systeme muss zudem die Integration von technischen und wirtschaftlichen Ansätzen in eine gesamtheitliche Bewertung erfolgen, welche diese Aspekte nicht als getrennte Gegenspieler, sondern eine einheitlichen Zielgröße sieht, deren gleichzeitige Optimierung im Zentrum der Wandlungsfähigkeitsbetrachtung steht.

Ein tiefgreifenderes Verständnis sowie standardisierte und erprobte Methoden zur Betrachtung der WF können diese nachhaltig in das Zentrum moderner Unternehmensführung rücken. Analog zum Qualitätsmanagement in den 1990er Jahren besteht das Potential die WF zu einer etablierten Zielgröße innerhalb des neuentstehenden magischen Vierecks neben Kosten, Zeit und Qualität zu machen.

Literaturverzeichnis

- [Abe-2011] Abele, E.; Albrecht, F.; Schröder, L.: Wandlungsfähige Produktion in der Medizintechnik. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 106 (2011) Nr. 5, S. 306–309.
- [Alb-2013] Albrecht, F.; Faatz, L.; Abele, E.: Multidimensional Evaluation of the Changeability of Interlinked Production Processes with Material Flow Simulation. In: Procedia CIRP, Jg. 7 (2013), S. 139–144.
- [Arn-2019] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [Bar-2022] Bartol, F.: Analyse und Bewertung der Veränderungsfähigkeit von Fabrikssystemen. Master's Thesis. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, Garching, 2022.
- [Bau-2014] Bauer, J.: Produktionslogistik/Produktionssteuerung kompakt – Schneller Einstieg in die Produktionslogistik mit SAP-ERP. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [Bau-2020] Bauernhansl, T. (Hrsg.): Entwicklung, Aufbau und Demonstration Einer Wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [Ber-2005] Bergholz, M.; Schuh, G.: Objektorientierte Fabrikplanung. Dissertation, RWTH Aachen University, 2005.
- [Ber-2011] Bertsch, S.; Nyhuis, P.: Wandlungsfähige Produktionslogistik. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 106 (2011) Nr. 9, S. 630–634.
- [Ber-2012] Bertsch, S.; Nyhuis, P.: Gestaltung und Nutzung produktionslogistischer Wandlungsfähigkeit. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 107 (2012) Nr. 6, S. 437–442.
- [Bet-2023] Bethäuser, L.: Entwicklung eines Gestaltungsrahmens zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit der Produktionslogistik bei einem Nutzfahrzeughersteller. Master's Thesis. Fakultät FK09 Wirtschaftsingenieurwesen, Hochschule München, München, 2023.

- [Bok-2023] Bokan-Heller Moritz; Thiessen Jan: München. Expertengespräch am 07.11.2023.
- [Bön-2017] Böning, C.: Abschlussbericht QuaMFaB – Quantitative, mehrdimensionale ad hoc Fabrikbewertung mittels mathematischer Modellierung von fabrikplanungsrelevanten Eigenschaften, IGF-Vorhaben Nr. 18111 N, 2017.
- [Bor-2022] Borgmann, F.; Kalbe, N.; Günter, A.: Resiliente und wandlungsfähige Produktion von morgen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 117 (2022) Nr. 3, S. 104–108.
- [Bro-1998] Brodbeck, K.-H.: ABC der Wissenschaftstheorie für Betriebswirte (1998)
- [Brü-2020] Brüggemann, H.; Bremer, P.: Grundlagen Qualitätsmanagement – Von den Werkzeugen über Methoden zum TQM. Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg, 2020.
- [Buc-2022] Buchwald, S.: Anforderungsanalyse zur wandlungsfähigen Logistik in der Nutzfahrzeugindustrie unter Ermittlung und Bewertung von Wandlungstreibern und -befähigern. Master's Thesis. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2022.
- [Bue-2019] Buerkli, D.: “What gets measured gets managed” — It’s wrong and Drucker never said it. In: Centre for Public Impact (2019)
- [Bur-2021] Burggräf, P.; Schuh, G.: Fabrikplanung. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2021.
- [Büs-2004] Büssow, C.: Kennzahlenbasierte Prozessbewertung in Logistiksystemen. In: Büssow, C.; Baumgarten, H. (Hrsg.): Prozessbewertung in der Logistik. Dt. Univ.- Verl. DUV, Wiesbaden, 2004, S. 43–84.
- [Cau-2008] Caulkin, S.: The rule is simple: be careful what you measure. In: The Guardian (2008)
- [Cis-2002] Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 97 (2002) Nr. 9, S. 441–445.

- [Dae-2002] Daenzer, W. F.; Habermeyer, R. (Hrsg.): Systems Engineering – Methodik und Praxis. Verl. Industrielle Organisation, Zürich, 2002.
- [Dey-1977] Deym, A. von (Hrsg.): Organisationsplanung – Planung durch Kooperation. Siemens Abt. Verl., Berlin, 1977.
- [DIN-1313] Deutsches Institut für Normung: Größen. DIN Nr. 1313, 1998.
- [DIN-55350] Deutsches Institut für Normung: Begriffe zum Qualitätsmanagement. DIN Nr. 55350, 2021.
- [Dra-2006] Drabow, G.: Modulare Gestaltung und ganzheitliche Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme. PZH Produktionstechn. Zentrum, Garbsen, 2006.
- [Dür-2001] Dürrschmidt, S.: Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion. Utz, München, 2001.
- [Ehr-2015] Ehrenmann, F.: Kosten- und zeiteffizienter Wandel von Produktionssystemen – Ein Ansatz für ein ausgewogenes Change Management von Produktionsnetzwerken. Springer Gabler, Wiesbaden, 2015.
- [Erl-2020] Erlach, K.: Wertstromdesign – Der Weg zur schlanken Fabrik. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [Fle-2018] Fleischmann, B.: Begriffliche Grundlagen der Logistik. In: Tempelmeier, H. (Hrsg.): Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018, S. 1–16.
- [Fot-2022] Fottner, J.; Galka, S.; Habenicht, S.; Klenk, E.; Meinhardt, I.; Schmidt, T.: Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen – Fahrzeugsysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2022.
- [Gil-2011] Gille, C.; Zwißler, F.: Bewertung von Wandlungstreibern. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 106 (2011) Nr. 5, S. 310–313.
- [Gla-2011] Gladen, W.: Einführung. In: Gladen, W. (Hrsg.): Performance Measurement. Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2011, S. 1–60.
- [Gru-2021] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung – Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. Hanser, München, 2021.

- [Gud-2011] Gudehus, T.: Logistik – Grundlagen - Strategien - Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Häd-2002] Häder, M.: Delphi-Befragungen – Ein Arbeitsbuch. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2002.
- [Har-1995] Hartmann, M.: Merkmale zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen für die mehrstufige Serienfertigung bei turbulenten Aufgaben. Ges. für Innovative Systeme, Barleben, 1995.
- [Haw-2020] Hawer, S.: Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis unscharfer Daten, Technische Universität München, 2020.
- [Heg-2007] Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. PZH Produktionstechn. Zentrum, Garbsen, 2007.
- [Hei-2006] Heinecker, M.: Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme. Utz, München, 2006.
- [Hei-2015] Heine, F.: Bewertung des Wandlungspotenzials und Analyse des Wandlungsbedarfs in Kommissioniersystemen. Shaker, Aachen, 2015.
- [Hel-2016] Helfrich, H.: Wissenschaftstheorie für Betriebswirtschaftler. Springer Gabler, Wiesbaden, 2016.
- [Her-2003] Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. VDI-Verl., Düsseldorf, 2003.
- [Hom-2018] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Dregger, J.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [IFA-2011] IFA: WaProTek - Wandlungsförderliche Prozessarchitekturen. <https://www.ifa.uni-hannover.de/de/bp-detail/detail/projects/waprotek-wandlungsfoerderliche-prozessarchitekturen>, Aufruf am 15.08.2023.
- [IPH-2019] IPH: Wandlungsfähigkeit und Automatisierungsgrad für Lager-, Kommissionier- und Transportsysteme | IPH. https://www.iph-hannover.de/de/forschung/forschungsprojekte/?we_objectID=4810, Aufruf am 14.09.2023.

- [Jün-1989] Jünemann, R.: Materialfluß und Logistik – Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer, Berlin, Heidelberg, 1989.
- [Kel-2022] Kellner, F.; Lienland, B.; Lukesch, M.: Produktionswirtschaft – Planung, Steuerung und Industrie 4.0. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2022.
- [Kle-2011] Klemke, T.; Mersmann, T.; Wagner, C.; Goßmann, D.; Nyhuis, P.: Bewertung und Gestaltung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 106 (2011) Nr. 12, S. 922–927.
- [Krü-1998] Krüger, W.: Management permanenten Wandels. In: Glaser, H.; Schröder, E. F.; Werder, A. (Hrsg.): Organisation im Wandel der Märkte. Gabler Verlag; Imprint: Gabler Verlag, Wiesbaden, 1998, S. 227–249.
- [Küh-2021] Kühnapfel, J. B.: Vorgehen bei der Durchführung einer Nutzwertanalyse. In: Kühnapfel, J. B. (Hrsg.): Scoring und Nutzwertanalysen. Springer Gabler, Wiesbaden, Heidelberg, 2021, S. 17–100.
- [Lin-2016] Lindemann, U. (Hrsg.): Handbuch Produktentwicklung. Hanser, München, 2016.
- [Möl-2008] Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Utz, München, 2008.
- [Mül-2020] Müller, M.: Abschlussbericht WALaTra – Entwicklung einer Methode zur Planung und Bewertung des Lager-, Kommissionier- und Transportsystems vor dem Hintergrund der Wandlungsfähigkeit und der Automatisierung, Hannover, 2020.
- [Nof-2005] Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F.: Einleitung. In: Wiendahl, H.-P., et al. (Hrsg.): Planung modularer Fabriken. Hanser, München, Wien, 2005, S. 1–15.
- [Nyh-2007] Nyhuis, P.; Heinen, T.; Brieke, M.: Adequate and economic factory transformability and the effects on logistical performance. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Jg. 19 (2007) Nr. 3, S. 286–307.
- [Nyh-2010a] Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. GITO-Verl., Berlin, 2010.

- [Nyh-2010b] Nyhuis, P.; Klemke, T.; Wagner, C.: Wandlungsfähigkeit - Ein systemischer Ansatz. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. GITO-Verl., Berlin, 2010, S. 3–21.
- [Nyh-2013] Nyhuis, P.; Deuse, J.; Rehwald, J. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktion: heute für morgen gestalten. PZH-Verl., Garbsen, 2013.
- [Ost-1993] Ost, S.: Entwicklung eines Verfahrens zur differenzierten Flexibilitätsanalyse und -bewertung. Dissertation. Arbeitsbereich Werkzeugmaschinen und Automatisierungstechnik, Tu Hamburg-Harburg, Hamburg, 1993.
- [Paw-2007] Pawellek, G.: Produktionslogistik – Planung – Steuerung – Controlling. Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l., 2007.
- [Paw-2014] Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung – Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. Springer-Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Pfe-2014] Pfeifer, T.; Schmitt, R.; Masing, W. (Hrsg.): Masing Handbuch Qualitätsmanagement. Hanser, München, Wien, 2014.
- [Pfo-2018] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [Poh-2013] Pohl, J.: Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen, Technische Universität München, 2013.
- [Puh-2020] Puhani, J.: Typisierung und Darstellung von Daten. In: Puhani, J. (Hrsg.): Statistik. Springer Gabler, Wiesbaden, Heidelberg, 2020, S. 5–22.
- [Rab-2009] Rabl, M.: Quality Function Deployment. In: Gaubinger, K.; Rabl, M.; Werani, T. (Hrsg.): Praxisorientiertes Innovations- und Produktmanagement. Gabler, Wiesbaden, 2009, S. 127–142.
- [Rei-1997] Reinhart, G.: Innovative Prozesse und Systeme - Der Weg zur Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. In: Wildemann, H. (Hrsg.): Marktführerschaft: Reorganisation und Innovation. TCW Transfer-Centrum-Verl., München, 1997, S. 10–21.

- [Rei-2000] Reinhart, G.; Wildemann, H. (Hrsg.): Virtuelle Fabrik – Wandlungsfähigkeit durch dynamische Unternehmenskooperationen. TCW Transfer-Centrum, München, 2000.
- [Rei-2023] Reitz, D. G.: Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Identifikation und Bewertung des Wandlungsbedarfs in der Produktionslogistik. Master's Thesis. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2023.
- [Rop-2009] Ropohl, G.: Allgemeine Technologie : eine Systemtheorie der Technik. Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.
- [Ros-2009] Rosentritt, C.; Gamm, N.; Seiter, M.; Zeibig, S.: Wertbeitrag einer wandlungsfähigen Logistik - Konzept und Praxisbeispiel. In: Controlling, Jg. 21 (2009) Nr. 8-9, S. 452–458.
- [Saa-1980] Saaty, T. L.: Multicriteria decision making – The analytic hierarchy process ; planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill, New York, 1980.
- [Sch-1995] Schmigalla, H.: Fabrikplanung – Begriffe und Zusammenhänge. Hanser, München, Wien, 1995.
- [Sch-2014] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb – Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Ste-2014] Steffens, A.: Logistische Wandlungsbefähiger – Entwicklung eines kontextbasierten Gestaltungsmodells für die industrielle Logistik. Univ.-Verl. der TU, Berlin, 2014.
- [Sto-2022] Stocker, T. C.; Steinke, I.: 2 Einführung in die deskriptive Statistik. In: Stocker, T. C.; Steinke, I. (Hrsg.): Statistik. De Gruyter Oldenbourg, Berlin, 2022, S. 23–30.
- [Sud-2008] Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. Utz, München, 2008.
- [Tem-2018] Tempelmeier, H.: Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018.

- [Ton-1998] Toni, A. de; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility: A literature review. In: International Journal of Production Research (1998) Nr. 36.6, S. 1587–1617.
- [TU -2016] TU Dresden: Übersicht Bewertungsverfahren. <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibv/bsr/ressourcen/dateien/studium/lehmaterial-2016-2017/UEbersicht-Bewertungsverfahren.pdf?lang=de>, Aufruf am 07.08.2023.
- [Ull-2018] Ullrich, A.: Eigenschaften wandlungsfähiger Systeme. GITO Verlag, 2018.
- [VDI-2525] Verein Deutscher Ingenieure: Praxisorientierte Logistikkennzahlen für kleine und mittelständische Unternehmen. VDI Nr. 2525, 1999.
- [VDI-2689] Verein Deutscher Ingenieure: Leitfaden für Materialflussuntersuchungen. VDI Nr. 2689, 2019.
- [VDI-5200-1] Verein Deutscher Ingenieure: Fabrikplanung. VDI Nr. 5200-1, 2011.
- [VDI-5200-2] Verein Deutscher Ingenieure: Fabrikplanung. VDI Nr. 5200-2, 2011.
- [VDI-5201] Verein Deutscher Ingenieure: Wandlungsfähigkeit - Beschreibung und Messung der Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen - Beispiel Medizintechnik. VDI Nr. 5201, 2017.
- [Vel-2014] Velkova, J.: Methode zur Selbstbewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. Shaker Verl., Aachen, 2014.
- [Vol-2020] Vollmuth, J. H.: Kennzahlen. Haufe-Lexware GmbH & Co. KG, Freiburg, 2020.
- [Vol-2023] Vollmuth, P.: Wandlungsfähige Logistikkonzepte. <https://www.mec.ed.tum.de/fml/forschung/aktuelle-forschungsprojekte/wandlungsfahige-logistikkonzepte/>, Aufruf am 12.09.2023.
- [War-2021] Wartzack, S.: Auswahl- und Bewertungsmethoden. In: Bender, B.; Gericke, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2021, S. 307–334.

- [Weh-2020] Wehking, K.-H.: Technisches Handbuch Logistik 1 – Fördertechnik, Materialfluss, Intralogistik. Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [Wes-1999] Westkämper, E.: Die Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. In: wt Werkstatttechnik 89, Jg. 1999 (1999) Nr. 4, S. 131–139.
- [Wes-2000] Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. In: wt Werkstattstechnik online, Jg. 90 (2000) Nr. 1-2, S. 22–26.
- [Wes-2009] Westkämper, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen – Das Stuttgarter Unternehmensmodell (German Edition). Springer, Dordrecht, 2009.
- [Wie-2002] Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunfts-fähigen Fabrik. In: wt (wt Werkstattstechnik online92), Jg. 2002 (2002) Nr. 4, S. 122–127.
- [Wie-2014] Wiendahl, H.-P.: Handbuch Fabrikplanung – Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Hanser; Cando, München, Wien, München, 2014.
- [Wöh-2021] Wöhrle, A.; Boecker, M.; Brandl, P.; Grunwald, K.; Kolhoff, L.; Noll, S.; Ribbeck, J.; Sagmeister, M.: Qualitätsmanagement - Qualitätsentwicklung. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, Baden-Baden, 2021.
- [Zac-2017] Zacher, S.; Reuter, M.: Regelungstechnik für Ingenieure – Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen : mit 96 Beispielen und 32 Aufgaben. Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg, 2017.
- [Zäh-2004] Zäh, M. F.; Müller, N.; Prash, M.; Sudhoff, W.: Methodik zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 99 (2004) Nr. 4, S. 173–177.
- [Zäh-2005] Zäh, M.; Möller, N.; Vogel, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor’s New Clothes or Key Factor for Future Success? In: Zäh, M.; Reinhart, G. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). Utz, München, 2005, S. 3–10.

- [Zan-1970] Zangemeister, C.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. Dissertation. Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Berlin, Technische Universität Berlin, 1970.
- [Zwi-2013] Zwißler, F.; Gebhardt, M.: Vorgehen zur kostentechnischen Beurteilung wandlungsfähiger Gestaltungsalternativen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 108 (2013) Nr. 5, S. 315–319.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Wandlungsfähigkeit im Zielbild wirtschaftlicher und wettbewerbsfähiger Unternehmen in Anlehnung an [Wie-2014, S. 15]	2
Abbildung 1-2: Übersicht zur Struktur der Arbeit und den Inhalten der Kapitel	4
Abbildung 2-1: Konzepte der Systemtheorie in Anlehnung an [Rop-2009, S. 76]	6
Abbildung 2-2: Anwendung Systemtheorie auf Fabrikplanung in Anlehnung an [Paw-2014, S. 29] und [Bur-2021, S. 17] sowie Transformationsprozess der Produktion in Anlehnung an [Sch-2014, S. 120]	7
Abbildung 2-3: Knoten- und Kantenmodell von Logistiksystemen in Anlehnung an [Pfo-2018, S. 6]	8
Abbildung 2-4: Logistikkette eines produzierenden Unternehmens mit Aufgaben der Produktionsplanung in Anlehnung an [Weh-2020, S. 91]	9
Abbildung 2-5: Funktionale Aufteilung von Fördertechnik, Materialfluss und Logistik in Anlehnung an [Weh-2020, S. 12]	10
Abbildung 2-6: Klassen der Veränderungsfähigkeit in Anlehnung an [Wie-2002, S. 126]	11
Abbildung 2-7: Abgrenzung der Veränderungspotenziale von produzierenden Unternehmen in Anlehnung an [Wes-2000, S. 23]	13
Abbildung 2-8: Wandlungsfähigkeit in Abhängigkeit vom Unternehmensumfeld in Anlehnung an [Rei-2000, S. 4]	14
Abbildung 2-9: Wandlungsfähigkeit und Flexibilität von Produktionssystemen nach [Zäh-2005, S. 4]	14
Abbildung 2-10: Wandlungstreiber und Wandlungsbedarf von Produktionssystemen als Regelkreis in Anlehnung an [Her-2003, S. 46]	15
Abbildung 2-11: Rezeptormodell der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Möl-2008, S. 25]	16
Abbildung 2-12: Wandlungsobjekte in den Ebenen und Dimensionen der Fabrik in Anlehnung an [Her-2003, S. 66] und [Heg-2007, S. 72]	17

Abbildung 2-13: Primäre Wandlungsbefähiger und deren Definitionen in Anlehnung an [Wie-2014, S. 133]	18
Abbildung 2-14: Ablauf Paarweiser Vergleich a) und Bewertungsmatrix in Anlehnung an [War-2021, S. 315; War-2021, S. 322]	22
Abbildung 2-15: Nutzwertanalyse a) und AHP-Technik b) in Anlehnung an [Büs-2004].	22
Abbildung 3-1: Regelkreis der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Nyh-2010b, S. 9]	26
Abbildung 3-2: Qualitative Kosten-Nutzen Betrachtung der Wandlungsfähigkeit	34
Abbildung 3-3: Übersicht zu bestehenden Literaturansätzen und deren Merkmalen	38
Abbildung 3-4: Fokusbereich dieser Arbeit (blau hinterlegt) in Relation zum Regelkreis der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Nyh-2010b, S. 9]	40
Abbildung 5-1: Grundstruktur der Bewertungsmethode mit Kapitelnummern	44
Abbildung 5-2: Übersicht zu den Arbeitsschritten sowie dem Top-Down Bottom-Up Vorgehen aus den Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3	47
Abbildung 5-3: Beispielhafte Systemmodellierung mit Objekten, Eigenschaften und Merkmalen	49
Abbildung 5-4: Basisgewichtung der Wandlungsbefähiger zu den Rezeptoren	53
Abbildung 5-5: Erweiterbarer Fragekatalog zur Ermittlung der Soll-Wandlungsfähigkeit, beispielhaft für den Rezeptor „Produkt“ dargestellt.	56
Abbildung 5-6: Grundstruktur des House-of-Quality in Anlehnung an [Lin-2016, S. 634]	58
Abbildung 5-7: Leeres House-of-logistischer-Wandlungsfähigkeit mit Basisgewichtungen	59
Abbildung 5-8: Beispielhafte adaptierte Wertstromanalyse mit Wandlungsfähigkeitseigenschaften	63
Abbildung 5-9: PDCA-Zyklus der Methode, angelehnt an [Vel-2014, S. 96]	64

Abbildung 5-10: Struktur und Zusammenhang der Arbeitsmappen aus dem Anwendungstool	65
Abbildung 5-11: Zusammensetzung des Anwendungs-Tools	65
Abbildung 5-12: Beispielhafte Anlegung von PLO im Anwendungstool	66
Abbildung 5-13: Beispielhafte Logistikmatrix im Anwendungstool	66
Abbildung 5-14: Arbeitsblatt zur Bestimmung der Wandlungsbefähiger-Gewichtungen	67
Abbildung 6-1: Layout des Anwendungsfall innerhalb der Validierung	69
Abbildung 6-2: Übersicht der Ergebnisse des Umfragebogens zur Test-Anwendung	72
Abbildung 7-1: Übersicht der Anforderungserfüllung der Bewertungsmethode und des Anwendungstools	78
Abbildung 7-2: Dimensionen der Wandlungsfähigkeit in der Produktionslogistik	79
Abbildung 7-3: Adaptiertes House-of-Quality zur Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Produktionslogistiksystemen und -objekten	80
Abbildung 8-1: Erfolgsfaktoren des Wandels in Anlehnung an [Her-2003, S. 50]	D-1
Abbildung 8-2: Logistisches Wandlungsfähigkeits-Controlling in Anlehnung an [Ber-2011, S. 632]	D-2
Abbildung 8-3: Gestaltungsmethode und Gestaltungsmöglichkeiten für produktionslogistische Wandlungsfähigkeit in Anlehnungen [Ber-2012, S. 438] und [Ber-2012, S. 441]	D-3
Abbildung 8-4: Gestaltungsmodell logistischer Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Ste-2014, S.128]	D-4
Abbildung 8-5: Kostentechnische Klassifizierung der Veränderungsfähigkeit in Anlehnung an [Haw-2020, S. 126]	D-5
Abbildung 8-6: Bewertungsmethode der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Dra-2006, S. 96]	D-6
Abbildung 8-7: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten in Anlehnung an [Heg-2007, S. 106]	D-7

Abbildung 8-8: Indikatorsystem der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Ull-
2018, S. 190]

D-8

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Förderliche Wechselwirkungen der Wandlungsbefähiger nach [Ste-2014, S. 158]	31
--------------	---	----

A Methode und Anwendungstool

Wandlungsbefähiger-Ausprägungen WALaTra-Projekt IPH 2020 [Mül-2020]

Transportsysteme mit WB-Ausprägungen nach [Mül-2020, S. 24]

Transportsysteme								
Code	Typ	Name	Universalität	Mobilität	Skalierbarkeit	Modularität	Kompatibilität	Objektspezifisches Wandlungspotenzial
TUL01	Transportsystem	Bandförderer	0,46	0	0,25	0	0,94	0,5
TUL02	Transportsystem	Rollenförderer mit Antrieb	0,67	0	0,25	0	0,94	0,5
TUL03	Transportsystem	Kreisförderer	0,67	0	0,25	0	0,89	0,5
TUL04	Transportsystem	Umlaufförderer	0,67	0	0,25	0	0,89	0,75
TUL05	Transportsystem	(Trag-) Kettenförderer	0,67	0	0,25	0	0,89	0,5
TUL06	Transportsystem	Rollenbahn	0,5	0	0,75	0,25	0,89	1
TUL07	Transportsystem	Röllchenbahn	0,25	0	0,75	0,25	0,89	1
TUL08	Transportsystem	Kugelbahn	0,25	0	0,75	0,25	0,89	1
TUL09	Transportsystem	Handgabelhubwagen	0,75	1	0,25	0	0,89	1
TUL10	Transportsystem	Elektrohubwagen	0,79	1	0,25	0	0,81	0,75
TUL11	Transportsystem	Gabelstapler	0,88	1	0,75	0,5	0,67	0,75
TUL12	Transportsystem	Hubmaststapler	0,88	1	0,75	0,5	0,67	0,75
TUL13	Transportsystem	Schubmaststapler	0,88	1	0,75	0,5	0,67	0,75
TUL14	Transportsystem	Hochregalstapler	0,92	1	0,75	0,5	0,67	0,75
TUL15	Transportsystem	Kommissionierstapler	0,92	1	0,75	0,5	0,67	0,75
TUL16	Transportsystem	Schlepper	0,88	1	1	0,75	0,69	0,75
TUL17	Transportsystem	Handkarren	0,63	1	0	0,75	0,89	1
TUL18	Transportsystem	Fahrerlose Transportsysteme	0,71	1	0,75	1	0,86	1
TUL19	Transportsystem	Regalbediengerät	0,71	0,13	0,75	0	0,83	0,5
TUL20	Transportsystem	Verschiebewagen	0,63	0	0,25	0	0,83	0,75
TUL21	Transportsystem	Gleiswagen	0,67	0	0,25	0	0,83	0,75
TUL22	Transportsystem	Trolleybahn	0,33	0	0,25	0,25	0,64	0,5
TUL23	Transportsystem	Brückenkran	0,29	0	0	0,25	0,61	0,5
TUL24	Transportsystem	Hängekran	0,46	0,13	0,25	0,25	0,61	0,5
TUL25	Transportsystem	Elektrohängebahn	0,5	0,38	0,5	0,25	0,56	0,5
TUL26	Transportsystem	Stapelkran	0,46	0,5	0,25	0,25	0,5	0,25
TUL27	Transportsystem	FTS Hochregalstapler	0,75	0,38	0,75	0,25	0,89	0
TUL28	Transportsystem	FTS Schlepper	0,75	0,38	0,75	0,25	0,89	0
TUL29	Transportsystem	FTS Vertikalkommissionierstapler	0,75	0,38	0,75	0,25	0,89	0

Lagersysteme mit WB-Ausprägungen nach [Mül-2020, S. 54]

Lagersysteme								
Code	Typ	Name	Universalität	Mobilität	Skalierbarkeit	Modularität	Kompatibilität	Objektspezifisches Wandlungspotenzial
TUL30	Lagersystem	Blocklager manuelle Ein- bzw. Auslagerung	0,35	0,8125	0,75	0	0,75	1
TUL31	Lagersystem	Blocklager Stapler/Kran Ein- bzw. Auslagerung	0,75	0,9375	0,75	0	0,6875	1
TUL32	Lagersystem	Reihenlager manuelle Ein- bzw. Auslagerung	0,35	0,8125	0,75	0,25	0,78125	1
TUL33	Lagersystem	Reihenlager Stapler/Kran Ein- bzw. Auslagerung	0,8	0,9375	0,75	0,25	0,71875	1
TUL34	Lagersystem	Fachbodenregal	0,6	0,4375	0,75	0,5	0,875	1
TUL35	Lagersystem	Kragarmregal manuelle Ein- bzw. Auslagerung	0,6	0,4375	0,75	0,5	0,8125	1
TUL36	Lagersystem	Kragarmregal Stapler/Kran Ein- bzw. Auslagerung	0,75	0,4375	0,75	0,5	0,84375	1
TUL37	Lagersystem	Kragarmregal automatische Ein- bzw. Auslagerung	0,8	0,4375	0,75	0,5	0,90625	0,75
TUL38	Lagersystem	Waben-/Kassettenregal	0,65	0,4375	0,5	0,5	0,84375	1
TUL39	Lagersystem	Verschieberegal manuelle Ein- bzw. Auslagerung	0,3125	0,25	0,75	0,6875	0,75	0,75
TUL40	Lagersystem	Verschieberegal Stapler/Kran Ein- bzw. Auslagerung	0,4375	0,25	0,75	0,6875	0,75	0,75
TUL41	Lagersystem	Palettenregal Stapler/Kran Ein- bzw. Auslagerung	0,9	0,5	0,75	0,75	0,9375	1
TUL42	Lagersystem	Palettenregal automatische Ein- bzw. Auslagerung	0,5	0,75	0,75	0,84375	0,75	0,75
TUL43	Lagersystem	Einfahrregal	0,65	0,375	0,5	0,5	0,9375	1
TUL44	Lagersystem	Durchlauf-/Einschubregal	0,65	0,375	0,5	0,5	0,9375	1
TUL45	Lagersystem	Hochregallager Stapler/Kran Ein- bzw. Auslagerung	0,4375	0,75	0,5	0,875	0,75	0,75
TUL46	Lagersystem	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	0,4375	0,75	0,5	0,75	0,5	0,5
TUL47	Lagersystem	Umlaufregal/Paternoster	0,8	0,25	0,25	0,75	0,78125	0,5
TUL48	Lagersystem	Automatisches Kleinteilelager	0,65	0,0625	0,25	1	0,8125	0,5
TUL49	Lagersystem	Turmregal	0,65	0,3125	0,5	0,5	0,71875	0,75

Kommissioniersysteme mit WB-Ausprägungen nach [Mül-2020, S. 54]

Kommissioniersysteme								
Code	Typ	Name	Universalität	Mobilität	Skalierbarkeit	Modularität	Kompatibilität	Objektspezifisches Wandlungspotenzial
TUL50	Kommissioniersystem	Pick-by-Paper	0,6	1	1	0	0,75	1
TUL51	Kommissioniersystem	Pick-by-Scan	0,75	1	1	0,75	0,9375	0,75
TUL52	Kommissioniersystem	Pick-by-Voice	0,6	1	0,75	0,75	0,875	0,5
TUL53	Kommissioniersystem	Pick-by-Vision	0,6	1	0,75	0,75	0,84375	0,5
TUL54	Kommissioniersystem	Pick-by-RFID MzW	0,8	1	1	1	0,9375	0,75
TUL55	Kommissioniersystem	Pick-by-Light WzM	0,6	0,625	0,75	1	0,875	0,5
TUL56	Kommissioniersystem	Pick-by-Light MzW	0,55	0,625	0,75	1	0,875	0,5
TUL57	Kommissioniersystem	Pick-by-Balance WzM	0,65	0,625	0,75	1	0,875	0,5
TUL58	Kommissioniersystem	Pick-by-Balance MzW	0,6	0,625	0,75	1	0,875	0,5
TUL59	Kommissioniersystem	Roboter stationär	0,75	0,25	0,25	0,75	0,71875	0,5
TUL60	Kommissioniersystem	Roboter instationär	0,7	0,375	0,5	0,75	0,71875	0,25
TUL61	Kommissioniersystem	Automat	0,55	0,5	0,25	0,75	0,6875	0,5

Abkürzungen:

FTS Fahrerlosestransportsystem

MzW Mann zur Ware

WzM Ware zum Mann

RFID Radio Frequency Identification

Merkmalskatalog zur Bestimmung der Wandlungsbefähiger-Ausprägungen, WALaTra-Projekt IPH [Mül-2020, S. 23]

Wandlungsbefähiger	Wandlungsmerkmale	Ausprägungen/Ausführungen														Bewertung								
		nicht erfüllt	0kg-100kg	>250 kW	externe Stromversorgung	Verbindung vorhanden	vereinzelte erfüllt	100kg-400kg	125 kW-250 kW	teilweise erfüllt	400kg-700kg	50 kW-125kW	externe Versorgung (Standardanforderung)	größtenteils erfüllt	700kg-1000kg	0 kW - 50 kW	erfüllt	> 1000kg	0 kW (interne Versorgung)	keine externe Versorgung	keine Verbindung	Punkte	Prozentuale Wandlungsfähigkeit	
Universalität	Produkt- und Variantenflexibilität																						0,8	60%
	Nenntagfähigkeit						x																0,3	
	Standardisierung Lagermittel																						0,8	
	Standardisierung Lagerhilfsmittel																						0,8	
Mobilität	Automatisierbarkeit								x														0,5	44%
	Verbindungsgrad																						0	
	Montier- und Demontierbarkeit																						0,8	
Skalierbarkeit	Stapelhöhe										x												0,5	75%
	Mobilität/ örtliche Bewegbarkeit										x												0,5	
Kompatibilität	Lagerreserve																						0,8	88%
	Systemarchitektur										x												0,5	
Objekts. Wandlungs.	Bedienbarkeit																	x					1	100%
	Dokumentation																						0,8	
	Elektroversorgung																						1	
	Versorgung weitere Medien																						1	
	Art der Anschlüsse																						1	
	Anzahl der Anschlüsse																						1	
	Softwareschnittstellen																						0,3	
Anschlussflexibilität																						1		
Objekts. Wandlungs.	Inbetriebnahme																						1	

Experte 1, eine Einschätzung:

Gesamtzusammenhang Wandlungsbefähiger <--> Rezeptoren

	Produkt	Stückzahl	Zeit	Kosten	Qualität	Systemelement
Universalität	3	0	0	0	2	1
Mobilität	1	1	2	1	1	2
Skalierbarkeit	0	4	2	1	0	0
Modularität	2	2	2	3	2	3
Kompatibilität	2	0	0	2	2	3
	8	7	6	7	7	9

Rangfolge:	
Modularität	14
Kompatibilität	9
Mobilität	8
Skalierbarkeit	7
Universalität	6

Gesamtgewichtung Wandlungsbefähiger <--> Rezeptoren

	Produkt	Stückzahl	Zeit	Kosten	Qualität	Systemelement	∅
Universalität	31%	8%	9%	8%	25%	14%	16,0%
Mobilität	15%	17%	27%	17%	17%	21%	19,0%
Skalierbarkeit	8%	42%	27%	17%	8%	7%	18,1%
Modularität	23%	25%	27%	33%	25%	29%	27,0%
Kompatibilität	23%	8%	9%	25%	25%	29%	19,8%

Gesamtzusammenhang Wandlungsbefähiger <-> Rezeptoren

	Produkt	Stückzahl	Zeit	Kosten	Qualität	Systemelement
Universaltät	0	0	0	3	4	2
Mobilität	0	1	1	1	0	0
Skalierbarkeit	1	4	4	3	0	0
Modularität	1	2	2	2	0	0
Kompatibilität	1	3	2	1	0	4
	3	10	9	10	4	6

Σ 9 3 12 7 11

Gesamtgewichtung Wandlungsbefähiger <-> Rezeptoren

	Produkt	Stückzahl	Zeit	Kosten	Qualität	Systemelement	∅
Universaltät	13%	7%	7%	27%	56%	27%	22,6%
Mobilität	13%	13%	14%	13%	11%	9%	12,3%
Skalierbarkeit	25%	33%	36%	27%	11%	9%	23,5%
Modularität	25%	20%	21%	20%	11%	9%	17,8%
Kompatibilität	25%	27%	21%	13%	11%	45%	23,8%

Experte 2, erste Einschätzung:

Rangfolge:	
Skalierbarkeit	12
Kompatibilität	11
Universaltät	9
Modularität	7
Mobilität	3

Experte 2, zweite Einschätzung:

Gesamtzusammenhang Wandlungsbefähiger <--> Rezeptoren

	Produkt	Stückzahl	Zeit	Kosten	Qualität	Systemelement
Universalität	1	1	1	3	0	1
Mobilität	2	4	3	1	0	0
Skalierbarkeit	0	2	2	3	2	0
Modularität	1	0	0	1	1	2
Kompatibilität	2	1	0	2	1	4
	6	8	6	10	4	7

Σ
7
10
9
5
10

Rangfolge:	
Mobilität	10
Kompatibilität	10
Skalierbarkeit	9
Universalität	7
Modularität	5

Gesamtgewichtung Wandlungsbefähiger <--> Rezeptoren

	Produkt	Stückzahl	Zeit	Kosten	Qualität	Systemelement	Ø
Universalität	18%	15%	18%	27%	11%	17%	17,7%
Mobilität	27%	38%	36%	13%	11%	8%	22,5%
Skalierbarkeit	9%	23%	27%	27%	33%	8%	21,3%
Modularität	18%	8%	9%	13%	22%	25%	15,9%
Kompatibilität	27%	15%	9%	20%	22%	42%	22,6%

Gesamtzusammenhang Wandlungsbefähiger <--> Rezeptoren

	Produkt	Stückzahl	Zeit	Kosten	Qualität	Systemelemt
Universalität	3	1	1	3	3	1
Mobilität	0	0	0	0	0	1
Skalierbarkeit	1	4	4	3	1	0
Modularität	1	2	2	2	2	2
Kompatibilität	3	2	1	1	3	2
	8	9	8	9	9	6

Σ
12
1
13
11
12

Gesamtgewichtung Wandlungsbefähiger <--> Rezeptoren

	Produkt	Stückzahl	Zeit	Kosten	Qualität	Systemelemt	Ø
Universalität	31%	14%	15%	29%	29%	18%	22,6%
Mobilität	8%	7%	8%	7%	7%	18%	9,2%
Skalierbarkeit	15%	36%	38%	29%	14%	9%	23,6%
Modularität	15%	21%	23%	21%	21%	27%	21,7%
Kompatibilität	31%	21%	15%	14%	29%	27%	23,0%

Einschätzung des Autors:

	Rangfolge:
Skalierbarkeit	13
Universalität	12
Kompatibilität	12
Modularität	11
Mobilität	1

Fragenkataloge zur Ermittlung der Soll-WF des Produktionslogistiksystems


Fragenkatalog zum Wandlungsrezeptor Stückzahl:

Wandlungsrezeptor Stückzahl		<u>Legende</u>				
Fragebogen		0	1	2	3	4
		Gering ←————→ Groß				
Nr.	Thema	Ausprägung				
1)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie das Eintreten einer Stückzahländerung ein?					
2)	Wie umfangreich sind die aktuell vom System abzuleistenden Stückzahlschwankungen?					
3)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie eine wesentliche Stückzahlsteigerung ein?					
4)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie eine wesentliche Stückzahlreduzierung ein?					
5)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie komponentenbezogene Stückzahlschwankungen ein? (z.B. Umstellung von Fügeprozessen --> Reduzierung/Steigerung der Verbindungselemente)					
6)						
7)						
8)						
9)						
10)						
11)						
12)						
13)						
14)						
Gesamtergebnis		0%				


Fragenkatalog zum Wandlungsrezeptor Zeit:

Wandlungsrezeptor Zeit		<u>Legende</u>				
Fragebogen		0	1	2	3	4
		Gering ←————→ Groß				
Nr.	Thema	Ausprägung				
1)	Wie umfangreich schätzen Sie die Auswirkungen zukünftiger Änderungen in der Taktung der Produktion ein?					
2)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie das Eintreten einer Durchlaufzeitänderungs-Anforderung ein?					
3)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie die Anforderung einer wesentlichen Durchlaufzeitssteigerung ein?					
4)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie die Anforderung einer wesentlichen Durchlaufzeitsreduzierung ein?					
5)	Welches Ausmaß nehmen Sie hinsichtlich zukünftiger Änderungen im Bezug auf Zeitenoptimierung bestehender Prozesse an?					
6)						
7)						
8)						
9)						
10)						
11)						
12)						
13)						
14)						
Gesamtergebnis		0%				

Fragenkatalog zum Wandlungsrezeptor Kosten:

Wandlungsrezeptor Kosten		Legende				
		0	1	2	3	4
Fragebogen						
Nr.	Thema	Ausprägung				
1)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie die Anforderung einer wesentlichen Logistikkostenänderung in Relation zu den Produktkosten ein? (z.B. Zielvorgabe: max. Kostenanteil an den Produktkosten 5% statt zuvor 15%)					
2)	Welches Ausmaß nehmen Sie hinsichtlich zukünftiger Änderungen im Bezug auf Kostenoptimierung bestehender Prozesse an?					
3)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie die Anforderung einer wesentlichen Logistikkostenänderung im Bezug auf den Betrieb des Systems ein?					
4)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie die Anforderung einer wesentlichen Logistikkostenänderung im Bezug auf die Anschaffungskosten des Systems ein? (z.B. Aufgrund von Liquidität Invest-Begrenzungen)					
5)						
6)						
7)						
8)						
9)						
10)						
11)						
12)						
13)						
14)						
Gesamtergebnis						0%

Fragenkatalog zum Wandlungsrezeptor Qualität:

Wandlungsrezeptor Qualität		Legende				
		0	1	2	3	4
Fragebogen						
Nr.	Thema	Ausprägung				
1)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie die Anforderung einer wesentlichen Qualitätsänderung ein?					
2)	Welches Ausmaß nehmen Sie hinsichtlich zukünftiger Qualitätsoptimierungen bestehender Prozesse an?					
3)						
4)						
5)						
6)						
7)						
8)						
9)						
10)						
11)						
12)						
13)						
14)						
Gesamtergebnis						0%

Fragenkatalog zum Wandlungsrezeptor Systemelement:

Wandlungsrezeptor Systemelement		<u>Legende</u>				
Fragebogen		0	1	2	3	4
Nr.	Thema	Ausprägung				
1)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie das Eintreten einer wesentlichen technischen Neuerung für eines Ihrer Systemelemente ein?					
2)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie die Einführung neuer Normen/Standards im Bezug auf Ihre Systemelemente ein?					
3)	Welches Ausmaß nehmen Sie hinsichtlich zukünftiger Änderungen in der Anzahl und Art Ihrer Systemelemente an?					
4)						
5)						
6)						
7)						
8)						
9)						
10)						
11)						
12)						
13)						
14)						
Gesamtergebnis					0%	

B Evaluation

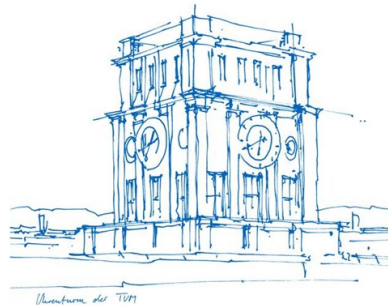
Einführungspräsentation

Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss Logistik
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München



Kurzvorstellung Thematik + Methodik

Stefan Loy
München, 07. November 2023



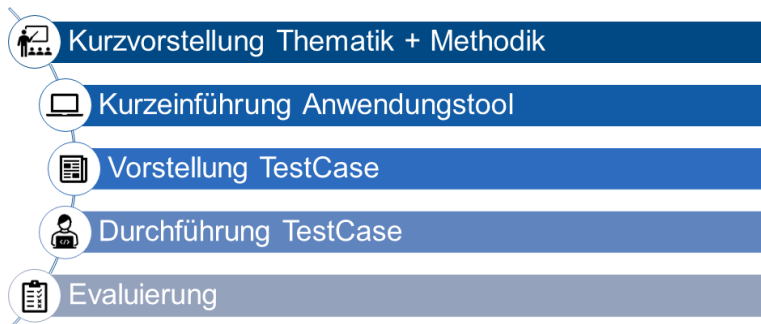
Uhrsturm der TUM

Masterthesis Bewertung Wandlungsfähigkeit Produktionslogistik | fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik | TU München



1

Agenda



Masterthesis Bewertung Wandlungsfähigkeit Produktionslogistik | fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik | TU München



2

Was bedeutet Wandlungsfähigkeit?



Initiator:

- VUCA-Welt

Rezeptoren nehmen Umwelt auf

Wandlungsfähigkeit und Flexibilität:

- Wandlungsfähigkeit:** Strukturelle Veränderungsfähigkeit eines Produktionssystems zur **aktiven Begegnung dynamischer Umfeldveränderungen**
- Aber:** Erhöhte Anschaffungs- und Betriebskosten

Folgen:

- Wandlungsfähigkeit wirkt über **Wandlungsbefähiger** den Rezeptoren entgegen:

Universalität ▲&■
Mobilität ➡
Skalierbarkeit ↑
Modularität 🧩
Kompatibilität ↓

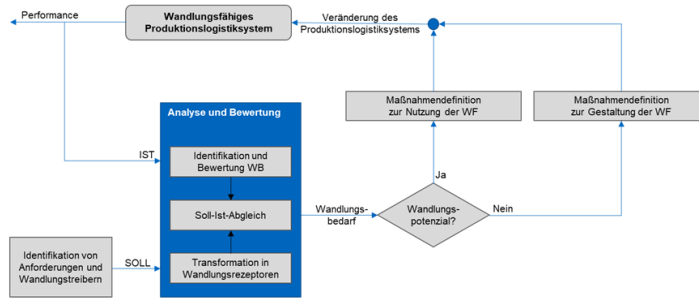
- Wandlungsfähigkeit ermöglicht **schnelle und kosteneffiziente Anpassung**, ABER: **bindet Investitionen**

Masterthesis Bewertung Wandlungsfähigkeit Produktionslogistik | fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik | TU München



3

Regelkreis der Wandlungsfähigkeit



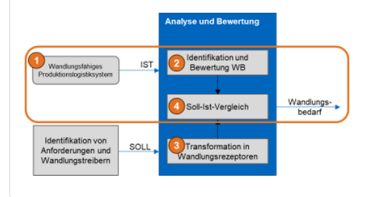
Grundlagen:

- Abgleich der Wandlungsfähigkeit entspricht dem **Prinzip eines Regelkreises**
- Teil der **Methodik** ist der **blau hinterlegte Bereich**. **Maßnahmendefinition** und Umsetzung liegt **außen vor**

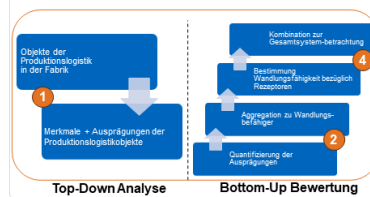
Masterthesis Bewertung Wandlungsfähigkeit Produktionslogistik | fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik | TU München

Wie bewertet/misst man Wandlungsfähigkeit?

Regelkreis der Wandlungsfähigkeit:



Bewertung der Wandlungsfähigkeit:



Methodenbeschreibung:

- **Im Zentrum** steht der **Abgleich** zwischen **Wandlungsbefähigern** und den **Rezeptoren**
 - **Gewichtung** der Wandlungsbefähiger bzgl. der Rezeptoren
- Methode folgt dem **Top-Down → Bottom-Up Prinzip**
- **Ganzheitliche Systembetrachtung** in **Wertstromdarstellung**

Masterthesis Bewertung Wandlungsfähigkeit Produktionslogistik | fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik | TU München



Danke für eure Aufmerksamkeit

Anwendungsfall der Evaluierung

TestCase | Methoden-/Tool-Bewertung

**Anwendungstool zur technischen Bewertung der
Wandlungsfähigkeit von Produktionslogistiksystemen**

0. Grundlagen

Sie sind verantwortlich für die Produktionslogistik eines Automobilherstellers im Mittelklassensegment. Aufgrund der fortsteigenden Integration von hybriden und elektrischen Antriebskonzepten in das aktuelle Produktportfolio steht Ihre Firma unter großen Wettbewerbsdruck. Sowohl aus regulatorischer als auch kundenbezogener Sicht ist es zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich den potenziellen Absatz sicher zu prognostizieren. Deswegen herrscht innerhalb der Produktion ein Make-To-Order Prinzip und gemischte Produktionslinien. Das aktuelle Produktportfolio besteht aus einem SUV sowie einer Limousine welche jeweils mit allen Antriebsvarianten ausgestattet und im Interieur nach Kundenwunsch angepasst werden können. Ihre Entwicklungsabteilung arbeitet bereits an neuen Fahrzeugmodellen für die aktuellen Produkte, deren SOP ist jedoch noch nicht sicher bestimmt. Einzig bekannter Fixpunkt ist die Erweiterung des Portfolios um einen Hatchback, welcher Inhouse produziert werden soll. Zudem wird in der Werksleitung diskutiert, ob die Fertigungstiefe stärker extern zu Komponentenlieferanten verlagert werden soll, damit in den aktuellen räumlichen Gegebenheiten mehr Endmontage-Prozesse bei höheren Stückzahlen durchgeführt werden könnten.

Ihre Vorgesetzten stellen Ihnen die Aufgabe die aktuelle Produktionslogistik hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit zu bewerten und Schwachstellen sowie Optimierungspotenziale zu identifizieren. Dies stellt den ersten Schritt dar, um abschließend zusammen mit den Werks- und Produktionsverantwortlichen Maßnahmen zu definieren, um die Produktion in den unsicheren Zeiten profitabel zu halten. Zur Durchführung der Bewertung haben Sie von Ihrem Vorgänger eine Methode sowie ein dazugehöriges Anwendungstool überlassen bekommen, welches Sie nun zum ersten Male einsetzen müssen. Neben der Methode steht Ihnen noch ein weiterer Kollege beratend zur Seite, welcher die Methode zusammen mit Ihrem Vorgänger entwickelt, aber auch selbst noch nicht angewendet hat.

1. Produktionslogistiksystem

Die aktuelle Produktion gliedert sich in 3 Teilbereiche auf. Den Karosseriebau, die Endmontage sowie eine vorgelagerte Antriebsfertigung, zu sehen in Abbildung 1-1. Die Produktion erfolgt in Form einer Fließfertigung ohne zwischengelagerte Puffer. Das Hauptgebäude besteht aus der Endmontage, der Antriebsfertigung sowie den Wareneingang. An der rechten Seite der Antriebsfertigung ist ein Transportweg in den Karosseriebau vorbehalten.

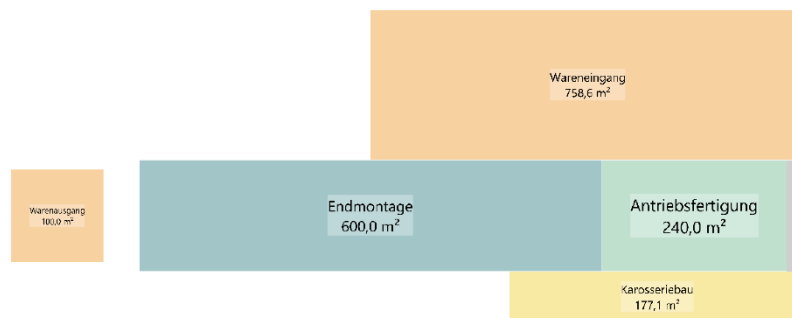


Abbildung 1-1: Flächenlayout Fahrzeugproduktion

In einem Gebäudeanbau werden die Fahrzeugkarossen aus vorgepressten Rahmenkomponenten mit Hilfe von Industrierobotern auf einer Linie hergestellt. Zwischen den Arbeitsstationen wird die Karosse mit einem Kettenförderer transportiert. Die Komponenten werden in einem externen Presswerk hergestellt und für die Produktion von 2 Wochen im Wareneingangslager zwischengelagert. Zwischen dem Wareneingangslager, welches zugleich das Hauptlager darstellt und als Automatik-Hochregallager ausgeführt ist, und den Arbeitsstationen im Karosseriebau führen FTS mit Hänger den Materialfluss durch. Die Komponenten werden an den Arbeitsstationen mittels Einschubregalen zwischengelagert. Das Wareneingangslager wird mittels Hochregalstapler aus dem Wareneingang versorgt. Dieser arbeitet bei der Warenannahme mit einem Scanner-System, um den Produkten den korrekten Arbeitsplatz im Hauptlager zuzuweisen. Im Karosseriebau werden die Karossen neben der Fertigung auch lackiert. Dazu werden die Karossen durch einen stationären Roboter von dem Kettenförderer auf eine Elektrohängebahn umgesetzt. Am Ende der Elektrohängebahn schlägt ein auf einer Linearachse platzierter Roboter die fertig lackierten Karossen auf die Produktionslinie der Endmontage um.

Vor der Endmontage liegt die Montage der Antriebseinheiten. Die Verbrennungsmotoren werden extern produziert und direkt vom Wareneingangslager mittels eines Fahrerlosen Transportsystems zur Hochzeitsanlage transportiert. Die Hochzeitsanlage kann vereinfacht als ein stationärer Roboter angesehen werden. Die Produktion der elektrischen Antriebe erfolgt InHouse. Dazu werden in mehreren automatischen Arbeitsprozessen entlang einer Linie die benötigten Komponenten (Stator, Rotor, etc.) gefertigt und zusammengebaut. Die Fertigung und Montage erfolgt auf einem angetriebenen Rollenförderer, welcher die Komponenten zwischen den Arbeitsstationen transportiert. Das benötigte Material wird mittels eines automatischen Kommissioniersystems zugeführt, welches durch eine Rollenbahn aus dem Wareneingangslager versorgt wird. Am Ende der Linie steht die Hochzeitsanlage.

Die Hochzeitsanlage führt die Karosse sowie die Antriebseinheit zusammen und stellt den Start der Endmontagelinie dar. Ab diesem Zeitpunkt bewegt sich das Fahrzeug auf einem Bandförderer durch die manuellen Montagestationen. Die Montagestationen werden mit einem Routenzug versorgt. Um das Personal im Montageprozess zu unterstützen ist ein Pick-by-Light System mit dynamischer Wareneinführung an den Arbeitsplätzen installiert worden. Die fertigen Fahrzeuge werden in Form eines Blocklagers am Ende der Linie außerhalb des Produktionsgebäudes zwischengelagert und durch einen Brückenkran abschließend zum Versand auf LKWs und Güterzüge transportiert.

Das gesamte Layout inkl. Produktionslogistikobjekten ist in Abbildung 1-2 gezeigt und im Ordner als PDF-Ausdruck verfügbar.

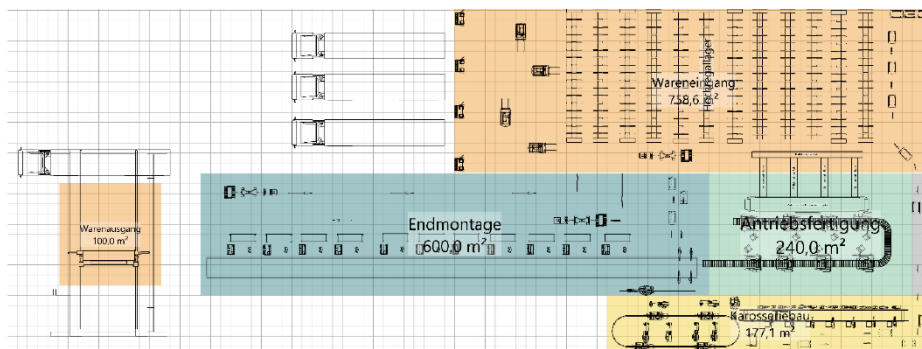


Abbildung 1-2: Fahrzeugproduktion inkl. Produktionslogistikobjekte

Protokoll Anwendungstest

Kontextgemäße und inhaltsgemäße Transkription der Evaluation des Anwendungstools sowie der Methode der Masterarbeit „Entwicklung einer Methode zur quantifizierbaren Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Förder- und Materialflusstechnik in Brownfield-Produktionslogistiksystemen zur Ermittlung von Wandlungs-Schwachstellen und -Bedarfen“

Datum: 07.11.2023, Büro der Munich Consulting Group GmbH in München

Uhrzeit: 10:05 bis 12:24

Teilnehmer: Jan Thiessen, Moritz Bokan-Heller, Stefan Loy

Stefan Loy:

OK ich würde das Ganze dann jetzt für den nächsten Zeitraum aufzeichnen seid ihr damit einverstanden?

Jan Thiessen:

Ja

Moritz Bokan-Heller:

Ja

Stefan Loy:

Die Agenda in Kürze: Kurzvorstellung Thematik + Methodik, Kurzeinführung Anwendungstool, Vorstellung TestCase, Durchführung TestCase, Evaluierung.

Also starten wir gleich rein. Was bedeutet überhaupt Wandlungsfähigkeit? Wo kommt das her? Das ist ein Forschungsbereich, der sich seit den 90er Jahren entwickelt hat. Indem man einfach aufgrund der verschiedenen Umweltfaktoren mit diesen ganzen Themen unter dem Begriff VUCA, also Volatility, Uncertainty, Complexity und Ambiguity aus der Unternehmenswelt neue Herausforderungen zu bewältigen hatte. Es hat sich daraufhin entwickelt, dass man sich entsprechend verstärkt, damit auseinandersetzen muss wie man die eigene Produktion, eigene Fabrik oder auch das ganze eigene Unternehmen so n bisschen wandlungsfähiger gestaltet.

Konkret Wartungsfähigkeit ist per Definition die strukturelle Veränderungsfähigkeit eines Produktionssystems zur aktiven Begegnung dynamischer Umfeldveränderungen. Im Vergleich zur Flexibilität was ja relativ bekannt ist und auch oft so im allgemeinen Sprachgebrauch verwendet wird, ist die Flexibilität auf feste Korridore und feste Bereiche begrenzt, während Wandlungsfähigkeit an und für sich Lösungsneutral ist und an und für sich auch nicht zwingend beschränkt.

Das große Thema an dem Bereich Wandlungsfähigkeit ist, dass wenn man Wandlungsfähigkeit in die eigene Produktion, die eigene Fabrik bzw. das eigene Produktionslogistiksystem integriert, dies mit erhöhten Anschaffungs- und Betriebskosten

einhergeht, weswegen natürlich ein gewisser Abgleich wichtig ist inwieweit Wandlungsfähigkeit überhaupt benötigt wird.

Grundsätzlich haben wir bei dem Thema Wandlungsfähigkeit eigentlich 2 Seiten auf der einen Seite stehen die Wandlungsrezeptoren diese nehmen die genannten Umweltfaktoren auf. Grundsätzlich existieren, wenn man an die ganz klassischen politischen, ökonomischen, wettbewerbstechnischen Faktoren denkt unterschiedliche Inputs, die an das Unternehmen rangehen und diese Inputs, die spiegeln sich dann am Ende des Tages anhand von sechs Rezeptoren wider. Diese Rezeptoren nehmen diese Umwelthanforderungen auf und transferieren das in ganz konkrete Anforderungen an das Unternehmen.

Das ist einmal die Technologie bzw. Systemelement, das beschreibt einfach nur, dass sie innerhalb des Systems selbst gewisse Teile und Technologien verändern können. Dann gibt es Zeit, Kosten, Qualität, Produkt und Stückzahl. Speziell die Faktoren Zeit, Kosten sowie Produkt und Stückzahl sind innerhalb der Produktionslogistik laut dem Forschungsansatz von Bertsch und Nyhuis sehr, sehr relevant und sollten detailliert betrachtet werden.

Demgegenüber stehen Objekteigenschaften, die die Produktionslogistikobjekte mitbringen. Das sind abstrahierte Kombinationen von technischen Merkmalen. Das ist die Universalität eines Objektes, die Mobilität, die Skalierbarkeit, die Modularität und Kompatibilität. Die genaue Beschreibung hinter den Wandlungsbefähigern und Behandlungsrezeptoren stehen dann auch noch mal im Kontext zur Verfügung.

Zusammengefasst ermöglicht, die Wandlungsfähigkeit eine schnelle und kosteneffiziente Anpassung. Aber wie gesagt, bindet dies auch Investitionen.

Moritz Bokan-Heller:

Kurze Zwischenfragen. Die gebundenen Investitionen und das bezieht sich ja nur darauf, dass ich quasi etwas installiere, was besonders wandlungsfähig ist. Wenn ich das aber nicht installiere, bin ich ja eigentlich wandlungsfähiger, oder? Am flexibelsten sind ja irgendwie nicht fixierte Strukturen, die einfach von ganz, ganz vielen Händen und Füßen bewegt werden.

Stefan Loy:

Nehmen wir ein Beispiel. Ein Bandförderer, der auf Rollen montiert ist, stellt typischerweise eine kostenintensivere Sonderanfertigung im Vergleich zu einem ganz klassisch im Boden verankerten Bandförderer dar. Das ist jetzt ganz ein spezielles Beispiel hinsichtlich Mobilität, bei welcher, die allgemeine Lösung kostengünstiger sind. Zusammengefasst: Man muss mehr investieren in eine Anlage, damit diese wandlungsfähiger sind.

Moritz Bokan-Heller:

Sobald ich in meinem Transportprozess jedoch Personen verwende, welche Güter auf Rollen bewegen, bin ich je nach Lohnniveau jedoch aber auch kostengünstiger und zeitgleich wandlungsfähiger oder nicht?

Stefan Loy:

Ja, das ist natürlich dann eine Spezialthematik, die man sich anschauen muss, weil natürlich je nachdem wieviel tatsächlich transportiert werden muss, das ja gar nicht von Menschenhand möglich ist. Nehmen wir als Beispiel eine Fahrzeugkarosserie, da bräuchte man 5-6 Menschen, damit das Ganze bewegt werden kann. Mit reduzierten Automatisierungsgrad wird prinzipiell höhere wandlungsfähigkeit erreicht. Die kosten-/leistungstechnische Beurteilung stellt sich nach Anwendungsfall entsprechend komplex dar.

Moritz Bokan-Heller:

2

Ok, das passt.

Stefan Loy:

Wenn wir jetzt einmal ganz kurz auf die Möglichkeit schauen, wie man überhaupt die Wandlungsfähigkeit betrachten kann, ist der Standardansatz der Regelkreis der Wandlungsfähigkeit. Prinzipiell ist ein Regelkreis eine Methode, in der eine Führungsgröße mit einer Ist-Größe verglichen wird. Eine Abweichung führt dazu, dass man im System Maßnahmen definiert und damit das System so ändert, dass die Führungsgröße eingehalten wird.

In unserem Fall haben wir als zentrales System ein wandlungsfähiges Produktionslogistiksystem, was eine gewisse Performance bietet, und gewisse Eigenschaften mit sich bringt. Diese Eigenschaften sind die Wandlungsbefähiger, welche entgegen den Wandlungsrezeptoren, also den Systemanforderungen verglichen werden.

Entsprechend aus diesem Soll-Ist-Abgleich, entsteht ein Wandlungsbedarf und je nachdem, ob mein System den Wandlungsbedarf decken kann mit den Eigenschaften, die es besitzt. Nutze ich diese Eigenschaften, um das System dahingehend zu verändern, dass diese Anforderungen erfüllt werden können.

Ein kurzes Beispiel. Mein System bietet mir prinzipiell die Möglichkeit, durch strukturelle Veränderungen 50% Stückzahl zu erhöhen. Ich habe als Anforderungen meine Stückzahlen müssten 40% erhöht werden, heißt an und für sich ist mein System dazu in der Lage und ich entsprechend durch strukturelle Veränderungen meines Systems die 40% geforderte Stückzahlerhöhung erreichen. Wenn mein System dazu nicht fähig ist, muss ich das System so umgestalten, speziell auch durch Investitionen, dass es die Anforderung von 50% erfüllt oder gar 60%-70% Steigerung ermöglicht.

In dem Bereich, wo sich meine Methode befindet, ist der Bereich mit dem Abgleich aus Soll und Ist und entsprechend einer Ableitung an wieviel muss denn noch geändert werden? Das ganze Thema Maßnahmen Definition ist erstmal außen vor. Auch das ganze Thema, wie genau Anforderungen und Wandlungstreiber in eine solche Anforderung transformiert werden, können ist auch außen vor.

Moritz Bokan-Heller:

Tatsächlich ist das Beispiel ein valides Problem. In vielen Zuliefererverträgen der Automobilindustrie ist verankert, dass der Zulieferer seine Systeme mit 2 Wochen Vorlauf auf +- 25% Ausbringung anpassen muss. Entsprechend muss das System entweder standardmäßig auf Maximalausbringung gestaltet sein und eine Reduzierung wird bspw. durch Schichtanpassung vorgenommen oder eine entsprechende Umstrukturierung muss in dem vereinbarten Zeitraum möglich sein.

Stefan Loy:

An dem Punkt auch noch wichtig zu erwähnen ist, dass 3 Bereiche existieren, in denen die Wandlungsfähigkeit eigentlich in einem Unternehmen wirkt. Das sind einmal räumliche Themen, speziell räumliche Begrenztheit, sowie natürlich auch soziale bzw. organisatorische Aspekte, wie z.B. eine Schichtanpassung. Abgesehen davon gibt es noch technische Bereich und die Technik ist das, was wir uns jetzt speziell anschauen bzw. was die Methode betrachtet.

Wenn man dann einmal in die Methode selbst geht, also der blaue Kasten von der Folie vorher, existieren 4 Schritte, die wir durchführen. Einmal das Produktionslogistiksystem modellieren, entsprechend daraus Wandlungsbefähigte identifizieren und bewerten, zeitgleich die Wandlungsrezeptoren auch in eine quantitative Skala bringen und dann schlussendlich der Vergleich aus den beiden Bereichen.

Wie machen wir das? Einmal der obere Kasten hier auf der rechten Seite noch mal dargestellt und mit Einzelschritten versehen. Wir verwenden einen TopDown-BottomUp Ansatz. Die gesamte Produktionslogistik, wird in ihre einzelnen Objekte, Teilsysteme und Merkmale aufgeteilt. Anschließend nutzen wir die Objekte mit ihren Merkmalen dazu, dass diese zu Wandlungsbefähigern aggregiert und dann die Wandlungsbefähiger gegenüber den Rezeptoren gewichtet und zusammengeführt werden. Gesamtheitlich können wir dann anschließend das System mittels einer adoptierten Wertstromdarstellung betrachten.

Das wäre es so weit grundsätzlich mal zur Methode an und für sich. Fragen an dieser Stelle?

[keine Fragen, kurze Pause zum Wechsel in die Tool-Vorstellung. Zeitstempel 0:12h]

Stefan Loy:

In diesem Ordner habe ich einmal jemals für euch einzelne Unterordner angelegt. Prinzipiell ist jeder eurer Ordner gleich gestaltet und wenn man einfach mal reinklickt, haben wir die 3 Bereiche TestCase-Beschreibung, Anwendungstool und anschließende Evaluierung.

Nun zunächst zum Anwendertool an sich. Das ist eine Kombination aus 4 Arbeitsmappen, die in jedem dieser Ordner liegt. Die Reihenfolge ist entsprechend der Nummerierung abzuarbeiten. Im letzten Ordner werden dann die Arbeitsmappen aus Ordnern 1 bis 3 zusammengeführt.

Wenn wir nur beispielsweise reinhüpfen in einen Ordner, dann ist das ein normales Excel Arbeitsblatt mit Makros. Entsprechend muss die Makroausführung bestätigt und erlaubt werden. Alle Arbeitsmappen sind nach dem gleichen Prinzip aufgebaut. Es gibt ein Introblatt mit Hinweisen zur Verwendung ganz vorne sowie dann anschließende Arbeitsblätter hinten drangehangen. Die Hinweise müssen zuerst gelesen werden. Die nebenstehende Grafik hier gibt uns auch noch den Hinweis darauf, wo wir uns innerhalb der Methode aktuell befinden. Alle Arbeitsmappen sind gegen Veränderung abgesichert und es können nur ausgewählte Zellen bearbeitet werden

Neben den Informationsblättern existiert auch noch eine Nutzungsanleitung für das Gesamttool, welche ihr einerseits in Papier, als auch in digitaler PDF-Form euch beigelegt ist. Ich würde euch entsprechend bitten, zusammen mit mir einmal das ganze jetzt in Schriftform zu öffnen und wir gehen einmal ganz kurz, prinzipiell durch den Aufbau durch. Ich erkläre euch dann ausdrücklich einige ausgewählte Themen, der Test sollte sich aus der Benutzung selbst ergeben. Außerdem stehe ich euch durchgängig zur Seite.

Neben den Grundsätzlichen Hinweisen zu Disclaimern sowie den Aufbau mit 4 Arbeitsmappen und der Relevanz der Makro-Ausführungen gibt es an dieser Stelle noch die Information, dass ihr die Arbeitsmappen nach Ende der Bearbeitung speichern müsst, damit die Ergebnisse übertragen werden können.

Nun zu Arbeitsmappe Teil 1. Hier geht das prinzipiell erstmal um die Modellierung des Produktionslogistiksystems. Ihr könnt Einzelobjekte im Blatt „TUL-WObjekte“ anlegen, indem ihr einen Namen dafür eingibt. Anschließend öffnet sich ein Fenster, in dem ihr die die Objektkategorie auswählen könnt. Es gibt 3 Objektkategorien, Transport-, Lager- und Kommissioniersysteme.

Der Rest wird anschließend automatisch ausgefüllt und mit Festlegung des Objekttyps die Wandlungsbefähiger direkt übernommen. Solltet ihr der Meinung sein ein Objekttyp ist nicht vorhanden oder ihr würdet diesen gerne anlegen wollen ist das mit einem Klick auf die blaue Schaltfläche im letzten Tabellenblatt möglich. Ihr könnt dann im nun geöffneten Fenster die Objektinformationen eintragen und nach Klick auf Ok ist das Objekt im anderen Blatt auswählbar.

Jan Thiessen:

Auf welcher Skala muss man die Wandlungsfähigkeitsinformationen eintragen? Von 0 bis 1 oder von 0 bis 10?

Stefan Loy:

Eine Eingabe ist nur zwischen 0 und 1 möglich und abgesichert. Bei Klick auf Ok würde auf ein falsches Format hingewiesen werden. Die Eingabe ist als Prozentzahl bzw. einem Erfüllungsgrad zu verstehen.

Jan Thiessen:

Ok. Woher stammen die Ratings zu den Wandlungsbefähigern?

Stefan Loy:

Diese habe Ich aus einem bereits vorhandenen Forschungsprojekt [WALaTra des IPHs] übernommen. Dies enthielt nach erster Betrachtung bereits eine große Auswahl und einer technisch gut dokumentierten Herleitung der Ausprägungen.

Neben den Wandlungsbefähigern könnt ihr bei den Produktionslogistikobjekten noch technische Systemeigenschaften angeben, wie beispielsweise die Kapazität oder die Maximalgeschwindigkeit, also jetzt bei einem Lager in Form maximaler Ein/Auslagerungen aus dem System bzw. bei einem Transport entsprechend der Durchsatz.

Die technischen Angaben sind optional und werden auch innerhalb des TestCases nicht verwendet. Bei einer tiefergehenden Analyse des Systems, zwar durchaus relevant, in unserem theoretischen Anwendungsfall vorerst außen vor.

Nachdem ihr alle Objekte definiert habt, könnt ihr anschließend die Logistikmatrix im ersten Arbeitsblatt initialisieren. In dieser Matrix könnt ihr dann die Transporte eintragen und so das System modellieren.

Wie funktioniert das Ganze? Wir denken hier immer in einem Triple System. Wir haben ein Zielobjekt, ein Startobjekt, und zwischen Ziel und Start ist jeweils einen Transport. Ziel und Start können nur Kommissionier- und Lagersysteme sein. Bedeutet, wir haben am Ende des Tages eine Produktionslogistik, die einem Knoten-Kanten-System folgt. Wir haben die Knoten, das sind Lager- und Kommissioniersysteme und dazwischen laufen immer Transport ab.

So wird das ganze Produktionslogistiksystem schlussendlich modelliert. Es bleibt euch in dem Fall überlassen, ob ihr das Gesamtsystem in Teilsysteme teilen wollt und diese einzeln modelliert. Die Option bietet sich auch prinzipiell im Anwendungsfall.

In der Anleitung ist alles detailliert erklärt, was man machen kann, wie man es machen kann, sowie auch die Reihenfolge, in der man das Ganze machen sollte, hinterlegt mit einem kleinen Beispiel. Hier sieht man zum Beispiel, wir haben 3 Objekte ein Anfangslager, einen Zwischenumschlag und ein Endlager. Zwischen dem Anfangslager und den Zwischenumschlag gibt es ein Anfangstransport und zwischen dem Zwischenumschlag und dem Endlager einen Endtransport.

[Kurzer Übergang in die zweite Arbeitsmappe]

Stefan Loy:

Zweiter Schritt, nachdem wir das Produktionslogistiksystem modelliert haben, ist die Wandlungsbefähiger zu gewichten. Hier arbeiten wir prinzipiell mit Präferenzmatrizen, also es werden Wandlungsbefähiger gegeneinander bezüglich eines Rezeptors verglichen.

Bevor ihr das Macht, ist es wichtig, dass ihr euch sowohl die Definitionen der Rezeptoren wie auch der Wandlungsbefähiger ganz konkret anschaut. Dazu gibt es auf der ersten Folie die jeweiligen Beschreibungen.

Ihr habt in dieser Arbeitsmappe zudem die Option, dass ihr mehrere Blätter einfügt, wenn ihr mehrere Meinungen zusammenführen wollt. Der Übertrag in das erste Blatt erfolgt wie Klick auf die entsprechende Schaltfläche. In Rahmen unserer Anwendung bearbeitet ihr die Arbeitsmappe aber unabhängig separat.

Ihr bearbeitet die Mappe, in dem Ihr auf dem zweiten Arbeitsblatt die gelb markierten Zellen füllt. Dabei wählt innerhalb Zellen aus, ob ein Leserichtung Zeile zu Spalte ein Wandlungsbefähiger wichtiger „+“, gleich wichtig „0“ oder weniger wichtig „-“ ist. Der zweite Teil der Matrix fühlt sich automatisch aus, im unteren Bereich des Arbeitsblattes werden die Ergebnisse zusammengezählt.

Nachdem alle Matrizen ausgefüllt sind, ist Schritt 2 abgeschlossen.

[Kurzer Übergang in die dritte Arbeitsmappe]

Stefan Loy:

Schritt 3 ist dann anschließend die tatsächlich [Soll-]Wandlungsfähigkeit bzgl. der Rezeptoren zu bewerten, also in welchem Umfang muss ich denn Wandlungsfähig sein?

Entsprechend gleichen Funktionalität wie die der Arbeitsmappe aus Schritt 2. Man kann die Arbeitsblätter kopieren und dann anschließend wieder zusammentragen, wenn man sie gemeinsam bearbeiten will. Für unseren Anwendungsfall werdet ihr die Mappen wieder einzeln bearbeiten.

Auf den zu bearbeitenden Seiten gibt es dann bezüglich jedes Rezeptors Fragestellungen, in denen eure Einschätzung gefragt ist. Anhand eines theoretischen Anwendungsfall wie in unserem Beispiel ist das selbstverständlich komplexer, weswegen die genaue Beantwortung euch schwerfallen könnte.

Entsprechend hier wird immer gebeten, Ausprägungen oder Fragestellungen auf einer Skala von 0 bis 4. zu bewerten. Die Fragestellungen bitte ganz genau lesen, weil nicht 0 gut und 4 schlecht ist oder andersrum, unterschiedliche Antwortinhalte in der 0-4 Skala enthalten ist. Am Ende werden diese Fragestellungen gemittelt zu einem Gesamtergebnis für den Rezeptor.

Falls ihr der Meinung seid, irgendein Aspekt fehlt euch noch unbedingt. Als Beispiel bzgl. des Rezeptors Produkt. Ich will ganz unbedingt noch reinbringen, dass sich in meinem Produkt die Farbe sehr sicher ändern wird und das Auswirkungen auf die Produktionslogistik hat, dann kann ich hier reinschreiben, Farbe wird sich ändern mit Ausprägung 4. So können weitere Extrafaktoren mit integriert werden.

Nachdem die Fragestellungen für alle Rezeptoren abgeschlossen wurden, müssen die Ergebnisse wieder auf der ersten Seite zusammengeführt werden. Damit ist Schritt 3 abgeschlossen.

[Kurzer Übergang in der vierte Arbeitsmappe]

Stefan Loy:

Wenn wir sowohl das System modelliert haben, die Wandlungsbefähiger gewichtet haben und anschließend noch die Sollwandlungsfähigkeit ermittelt haben, können wir das Ganze in der letzten und größten Arbeitsmappe zusammenziehen.

Dieses Arbeitsblatt besteht wie die anderen aus ein Informationsteil vorne sowie weiteren Hinweisen im Importblatt. Im Importblatt können die anderen Arbeitsmappen Schritt für Schritt integriert werden. Dazu steht über die jeweiligen Schaltflächen ein Dateieexplorer bereit. Innerhalb des Dateieexplorers könnt ihr nun das korrekte Dateiformat auswählen und während des Imports wird die Datei auf Korrektheit überprüft.

Nach dem Import des Systemmodells sowie der Wandlungsbefähigergewichtung könnt ihr außerdem eure Gewichtung relativ zur Standardgewichtung gewichten. Das ist unter Punkt 3 möglich. Abschließend muss noch die Soll-Wandlungsfähigkeit in das Modell integriert werden.

Es gibt noch einmal einen letzten Punkt, und der besteht darin, dass ihr noch spezielle Gewichtungen für die Rezeptoren und für die Priorität der Rezeptoren verwendet. Dabei ist der linke Bereich eine Gewichtung aus Anforderungssicht, also welche Anforderungen stellt ihr an das Produktionssystem? Zudem auf der rechten Seite die Priorität der Rezeptoren. Das ist was, wo ihr euch innerhalb der Produktionslogistik befindet, also eigentlich ein zweiter Blick, einmal von außerhalb, von innerhalb der Produktionslogistik. Ein entsprechendes Eingabefenster hilft bei der Festlegung und überprüft die Gewichtungen auf die korrekte Skala.

Nachdem alle Angaben hinterlegt wurden, können die Objekte im House-of-Wandlungsfähigkeit analysiert werden. Dazu bietet euch das Auswahlmenü hier rechts oben. Jedes zuvor definierte Objekt an. Es werden automatisch die Eigenschaften hier importiert, und mit euren Gewichtungen zu einer Gesamtbewertung zusammengezogen.

Anschließend zeigen die Informationen auf der rechten Seite wie die Wandlungsfähigkeit in Bezug auf die Rezeptoren ausgeprägt ist. Falls hier etwas rot markiert ist, dann erfüllen die Eigenschaft des Objektes nicht die Anforderungen and das System. Anschließend kann anhand der Grafik unten noch ermittelt werden, an welchen Rezeptoren denn am besten gearbeitet werden muss. Die genaue Beschreibung des House-of-Wandlungsfähigkeit ist auch in der Anleitung auffindbar.

Nachdem ihr alles analysiert habt, könnt ihr die ganzen Ergebnisse mittels dieser Schaltfläche exportieren. Mit dem Export wird anschließend auch noch eine Darstellung des Gesamtsystems im Wertstromdarstellung angestoßen.

Grundlegende Frage an der Stelle zu dem Tool?

[Keine Fragen, Wechsel zum TestCase. Zeitstempel 0:33h]

Stefan Loy:

Wir haben als Beispielsystem, nachdem wir grundsätzlich aus dem Automobilumfeld kommen, eine reduzierte Form einer Fahrzeugfabrik. Die TestCase-Beschreibung habt ihr sowohl als PDF als auch in ausgedruckter Form.

Nun zum Grundlegenden. Sie sind jetzt verantwortlich für die Produktionslogistik eines Automobilherstellers im Mittelklasse Segment, und wie jeder aktuelle Automobilhersteller, befinden wir uns natürlich aktuell in der Zeit, in der das bestehende Produktsortiment unterschiedliche Antriebsformen integriert werden. Wir haben aktuell 2 Fahrzeugmodelle, einmal einen SUV und einmal eine mittelgroße Limousine. Nächstes Jahr ist SOP für einen kleinen Hatchback. Gleichzeitig arbeitet die Produktentwicklung immer noch an neuen Varianten.

Ihre Vorgesetzten stellen Ihnen die Aufgabe ihrer Produktionslogistik hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit zu bewerten und Schwachstellen und Optimierungspotenziale zu identifizieren. Das ist der erste Schritt, um anschließend mit dem Werks- und Produktionsverantwortlichen Maßnahmen zu definieren und die Produktion in den aktuellen unsicheren Zeiten profitabel zu halten.

Ihnen hat ihr Vorgänger bereits ein Anwendungstool hinterlassen. Dieses Anwendungstool werden sie jetzt zum ersten Mal einsetzen. Neben den Anwendungstools steht ihnen noch ein anderer Kollege beratend zur Seite, der das Tool mitentwickelt, aber selbst auch noch nicht auf das aktuelle System angewendet hat.

Das prinzipiell mal der Teil zu den grundlegenden Informationen zum Unternehmensumfeld sowie der aktuellen Situation dort.

Nun zum tatsächlichen System. Wir haben eine vereinfachte Fahrzeugfabrik, die aus einem Hauptgebäude besteht und einen kleinen Anbau für den Karosseriebau plus einen kleinen Warenausgang. Ganz klassisch draußen freistehend. Wir haben Fließfertigung ohne zwischengelagerte Puffer und wir haben ein Make-to-Order Prinzip innerhalb der Produktionslogistik. In den Gebäudeanbau werden die Karosserien produziert. Ich kann das Ganze am besten anhand des beiliegenden Layouts erklären. Dieses Layout ist nicht direkt maßstabsgetreu und soll durch das Prinzip verdeutlichen.

Wir haben hier unten den Karosseriebau, der aus dem Wareneingang mittels Schlepper FTS versorgt wird. Die FTS bringen die einzelnen Rahmenkomponenten hierhin, die dann vom Roboter verschweißt werden. Dazwischen existiert ein Schubregallager zur Zwischenlagerung. Am Ende von Karosseriebau wird die Karosserie noch lackiert, dafür wird vom Kettenförderer auf eine Elektrohängebahn umgesetzt.

Der zweite wichtige Teil vom Fahrzeug ist noch der Antrieb. Der elektrische Antrieb wird selbst produziert, das ist der Teil hier, das wird auch einzeln aus dem Wareneingang versorgt. Die genauen Details, welche Produktionslogistikobjekte verwendet werden, ist in der Beschreibung drin. Die Antriebe und Karosserie werden in der Hochzeitsanlage zusammengeführt, die vereinfacht einen stationären Umschlag-Roboter darstellt ist. Die Verbrennungsmotoren werden direkt von einem externen Werk produziert und auch per FTS ans Band liefert.

Anschließend wird am Montageband das Auto fertiggestellt. Das Montageband wird mit einem Routenzug versorgt und hat zusätzlich noch einen Pick-by-Light-System, um es den Mitarbeitern einfacher zu machen, bei dem Produktmix die korrekten Artikel zu greifen.

Am Warenausgang steht dann ein Blocklager bereit aus diesem mit einem Brückenkran dann die Autos auf einen Lkw beziehungsweise hier unten wäre theoretisch noch eine Gleisstrecke umgelagert werden können.

Das ist mal also prinzipiell der grundlegende Anwendungsfall. Die genaue Bezeichnung der Produktionslogistikobjekte ist in der Beschreibung eindeutig drin. Falls ihr der Meinung seid,

ein entsprechendes Objekt ist nicht vorhanden, könnte mich fragen wo das Objekt zu finden ist. Hinweis an dieser Stelle, alle Objekte sind an und für sich bereits modelliert.

Dementsprechend würde ich euch einmal bitten, diesen Anwendungsfall detailliert durchzulesen sowie die Arbeitsmappen bearbeiten.

Falls ihr Fragen habt kommt gerne auf mich zu.

[Beginn des Anwendungsfalls. Ab diesen Zeitpunkt nur noch vereinzelt Fragen. Zeitstempel 0:38h]

Jan Thiessen:

Die Auswahl der Objekttypen steht bei mir nicht zu Verfügung, nachdem ich die Kategorie festgelegt habe

Stefan Loy:

Ok, ich schau mir das ganze mal an. [Es wurde erkannt, das Hr. Thiessen eine veraltete Excel-Version besitzt. Nach Wechsel auf einen Rechner mit neuerer Version war das Problem behoben]

[Kleinere Pause, Hr. Bokan-Heller und Hr. Thiessen arbeiten intensiv am Modell]

Stefan Loy:

Kurzer Hinweis, es ist durchaus möglich das Gesamtsystem in Teilsysteme aufzugliedern.

[Kleinere Pause]

Moritz Bokan-Heller:

Wie ist das Zusammenspiel aus Hochregallager und Wareneingang? Das geht nicht klar aus der Beschreibung hervor.

Stefan Loy:

Das Hochregallager wird vom Wareneingang mit einem Stapler versorgt, ist aber an sich ein automatisches Hochregallager mit eigener Ein-/Auslagerung. Am Wareneingang werden die Lieferungen vom Personal zunächst mit Scanner erfasst, bevor so mittels Stapler transportiert werden.

[Kleinere Pause]

Jan Thiessen:

Es ist problematisch, dass die Objekttypen nicht alphabetisch geordnet sind. Das erschwert und verlängert die Suche.

[Größere Pause]

Jan Thiessen:

Welches System steht vor der Antriebsfertigung?

Stefan Loy:

Ein Automat. Die Beschreibungen sind nicht immer eindeutig, zwischen Objekttyp und Anwendungsfallbeschreibung, da dies realitätsnaher ist.

[Kleine Pause, kurzer Blick auf das aktuelle Modell von Hr. Thiessen]

Stefan Loy:

Empfehlung das Modell des Karosseriebaus genauer zu begutachten. [Hr. Thiessen bildet die zuvor weggelassenen Umschlagsroboter nach]

Weiter Hinweis, ein Routenzug ist umgangssprachlich als Schlepper bezeichnet.

[Längere Gesprächspause ohne konkrete Fragen/Themen]

Jan Thiessen:

Ohne chronologische Reihenfolge der Objekte in der Objektliste ist das Ausfüllen der Logistikmatrix deutlich komplexer

Moritz Bokan-Heller:

Die Beschreibung des Teilsystems der Antriebsfertigung und Montage ist zum Teilen nicht direkt eindeutig.

[Allgemeine Kommentare zur Komplexität des weiteren Vorgehens, falls die Logistikobjekte schlecht benannt sind. Kein offenes Gespräch]

Jan Thiessen:

Zwischen dem Wareneingangslager und dem Karosseriebau fördern die FTS. Aber es gibt keinen Transport zwischen den Einschubregalen und den Arbeitsstationen des Karosseriebaus. Außerdem habe ich die Arbeitsstation des Karosseriebaus nicht als Objekte verfügbar. Wie soll ich das modellieren?

Stefan Loy:

Die Arbeitsstationen des Karosseriebaus sind Arbeitsstationen und keine Logistikobjekte. Im vorderen Teil des Karosseriebaus werden die Karossen mittels eines Kettenförderers transportiert ohne Zwischenlager oder Umschlägen. Entsprechend ist für ein Strukturmodell der Produktionslogistik die Arbeitsstation und deren fertigungstechnische Ausführung nicht relevant. Die Materialanstellung am Band schließt entsprechend einen Teilbereich der Logistik ab.

[Unabhängige Kommentare zum aktuellen Status, kein offenes Gespräch]

Stefan Loy:

Im Blick auf das Layout hilft auch bei der strukturellen Modellierung neben der textuellen Beschreibung. Mittels des Layouts kann dem Materialfluss visuell gefolgt werden. Als Fixpunkte im Materialfluss existieren die Lager- und Umschlagspunkte. Diese helfen euch auch bei der Orientierung.

Moritz Bokan-Heller:

Im Tool ist die Umbenennung der Objekte nicht abgefangen. Die bestehenden Informationen werden bei Umbenennung zum Teil gelöscht, zum Teil beibehalten.

Anderes Thema, was bedeutet die Abkürzung WzM bzw. MzW bei den Kommissioniersystemen?

Stefan Loy:

Ware-zum-Mann bzw. Mann-zur-Ware.

10

[Kleine Pause]

Jan Thiessen:

Frage zur Logik der Transportmatrix. Von wo nach wo erfolgt der Transport?

Stefan Loy:

Der Transport erfolgt von links nach rechts. Bzw. dem Zeilenobjekt zum Spaltenobjekt.

[Hilfestellung mit vereinzelt Kommentaren seitens Stefan Loy zur Erarbeitung der Logistikmatrix von Jan Thiessen]

Moritz Bokan-Heller:

Ich habe die Produktionslogistikobjekte nun alle angelegt und die Mappe gespeichert. Jetzt muss ich die Logistikmatrix ausfüllen, oder?

Stefan Loy:

Ja genau. Auf den ersten Blick scheinst du jedoch zu wenige Logistikobjekte in deinem Arbeitsblatt zu haben. Hast du die Hochzeitsanlage modelliert.

Moritz Bokan-Heller:

Nein, noch nicht.

Jan Thiessen:

Nein, ich habe das nicht als Logistikobjekt erkannt.

Stefan Loy:

Im Text ist vermerkt, dass diese für den aktuellen Anwendungsfall vereinfacht als stationärer Umschlagsroboter dargestellt werden kann.

[Es entwickelt sich ein offenes Gespräch zwischen allen Teilnehmern aus denen die Logistikobjekte und Materialflüsse anhand des Layouts gezählt und zusammen erarbeitet werden. In Anbetracht der aktuell bereits vergangenen Zeit, 01:33h entsprechender folgender Gesprächsfluss]

Stefan Loy:

Wir können es ja einfacher und schneller machen, wenn wir kurz gemeinsam durchs System gehen. Wir haben den Startpunkt, das ist der Wareneingangsscanner. Vom Wareneingangsscanner lagern wir ins Hochregallager mittels der Stapler ein.

Dann machen wir den ersten Materialfluss. Hinten raus, am Wareneingang zu den Einschubregalen am Karosseriebau mittels FTS. Dann bewegen wir uns im ersten Teil von Karosseriebau mit einem Kettenförderer durch bis zum Umschlagspunkt und anschließend entlang der EHB.

Jan Thiessen:

Meine verallgemeinerten Objektbezeichnungen erschweren die aktuelle Arbeit enorm. Wichtigkeit der Objektbezeichnung war mir anfangs nicht bewusst.

Stefan Loy:

Bis zum Ende von Karosseriebau sind wir auf der EHB. Von dem Umschlagspunkt Karosseriebauende bis zum Endlager bewegen wir uns auf den Bandförderer auf dem Montageband. Damit wäre der erste Fluss fertig.

Zudem haben wir den Fluss vom Hochregallager zu den automatischen Kommissioniersystemen innerhalb der Antriebsfertigung über diese Rollenbahn. Dann haben wir den angetriebenen Rollenförderer von diesen Kommissioniersystemen zur Hochzeitsanlage. Von der Hochzeitsanlage zum Endlager erneut mittels Bandförderer in der Endmontage. So, das wäre dann der zweite Teil.

Dann haben wir noch den Transport vom Lager auch wieder zur Hochzeit mittels den FTS. Und anschließend der Transport von der Hochzeitsanlage zur Endmontage mittels Bandförderer. Aber das ist bereits im Materialfluss aus der Antriebsfertigung beinhaltet.

Abschließend haben wir noch die Versorgung der Endmontagelinie aus dem Lager mittels Routenzug. An der Montagelinie sind die Pick-By-Light Systeme mit WzM angebracht. Von dort erfolgt der Transport wieder per Bandförderer.

Damit ist das gesamte System abgebildet und ihr könnt die Mappe speichern.

Jan Thiessen:

Wäre eine automatische Erstellung des Systems möglich, wenn die Objekte in der Richtigen Reihenfolge zunächst eingetragen werden?

Stefan Loy:

Ja, wäre möglich. Jedoch nur für Teilbereiche und wenn die richtige Reihenfolge tatsächlich eingetragen wird.

Grundsätzliche Frage an euch. Hatte ihr zwischenzeitlich die Idee das System aufzuteilen und separat zu modellieren? Bspw. in Karosseriebau und Hauptmontage.

Jan Thiessen:

Aus dem Text nicht direkt. In einem realen Anwendungsfall wäre hier vmtl. eine andere Vorgehensweise realistischer und das System mehr als Teilbereiche bereits zerlegt. Liegt auch stark daran, dass der Fokus auf den Testfall und dem Anwendungstool bei mir lag.

Nachdem ich nun mit der Matrix fertig bin kann ich die Arbeitsmappe schließen und die zweite öffnen oder?

Stefan Loy:

Ja

[Hr. Thiessen schließt die erste und öffnet die zweite Arbeitsmappe. Hr. Bokan-Heller arbeitet noch an der Matrix]

Moritz Bokan-Heller:

In den verbleibenden ca. 15min des Termins werde ich nicht fertig werden.

Jan Thiessen:

Was genau wird jetzt in der zweiten Arbeitsmappe bewertet?

Stefan Loy:

Hier werden die Gewichtungen der Wandlungsbefähiger, also die Eigenschaften, zu den Rezeptoren, also den Anforderungen gewichtet. Ein Verständnis zu den Begriffen ist hier allgemein relevant, weswegen die Informationen deutlich durchgelesen werden müssen.

Aufgrund der bereits vorhandenen Basisgewichtung könnte dieser Arbeitsschritt jedoch auch übersprungen werden. Für die Eigengewichtung ist standardmäßig eine Gleichgewichtung hinterlegt.

Jan Thiessen:

In Anbetracht der Zeit werde ich nur einen Teil der Matrizen ausfüllen. Grundsätzlich aus dem Stegreif auch komplex eine Gewichtung festzulegen.

[Längere Arbeitsphase mit einzelnen Kommentaren und Detailabfragen zu den Wandlungsbefähigern]

Jan Thiessen:

Dann kann ich die Arbeitsmappe jetzt speichern, oder?

Stefan Loy:

Vorher musst du noch einmal auf dem ersten Blatt die Gewichtungen zusammenziehen. Dann kannst du die Arbeitsmappe speichern.

[Hr. Thiessen schließt Arbeitsmappe 2 und öffnet Arbeitsmappe 3. Hr. Bokan-Heller arbeitet noch an der Logistikmatrix aus Arbeitsmappe 1]

Jan Thiessen:

Wie genau ist die Fragestellung zu verstehen?

Stefan Loy:

Hypothetischer Gedankengang in die Zukunft. An diesem Beispiel und auf unsere Fahrzeugfabrik bezogen, wie wahrscheinlich ist es, dass in der Zukunft sich an den physischen Produktmerkmalen was ändert. Eine Beantwortung der Fragen ist anhand eines theoretischen Anwendungsfalls natürlich immer etwas komplex.

Jan Thiessen:

Ja stimmt.

[Kurze Pause]

Moritz Bokan-Heller:

Die Zusammenfassung von Kommissionier- und Umschlagssystemen verwirrt mich immer noch etwas.

Stefan Loy:

Ja ist vermerkt, dass an dieser Stelle mehr Hinweise/Erklärungen benötigt werden.

[Kurze Pause, Hr. Thiessen und Hr. Bokan-Heller arbeiten am Anwendungsfall]

Jan Thiessen:

Ich habe alle Fragen beantwortet kann ich die Arbeitsmappe jetzt wieder speichern und schließen?

Stefan Loy:

Bitte vorher einmal noch auf dem ersten Blatt die Ergebnisse zusammenziehen bzw. übertragen.

[Hr. Thiessen schließt die Arbeitsmappe 3 und öffnet Arbeitsmappe 4. Hr. Thiessen liest die Hinweise der Arbeitsmappe und importiert das Modell der Produktionslogistik und die Ergebnisse der Wandlungsbefähigergewichtung. Hr. Bokan-Heller arbeitet noch an der Logistikmatrix aus Arbeitsmappe 1. Aktueller Zeitstempel: 1:58h]

Stefan Loy:

Nun musst du an der Stelle noch angeben, inwieweit deine Gewichtungen im Vergleich zu Basisgewichtung gezählt werden.

Jan Thiessen:

Ich wähle 20% zu 80%, da ich mehr auf die Standardgewichtung vertraue.

Wieso ist das als Schritt 3 im Blatt vermerkt?

Stefan Loy:

Es ist Teil vom Methodenschritt 2, der Gewichtung, jedoch Arbeitsschritt 3 innerhalb der Arbeitsmappe. Eine Umbenennung auf Schritt 2-x wäre aber an dem Punkt eigentlich auch eine gute Idee.

[Hr. Thiessen importiert die Sollwandlungsfähigkeit. Anschließend öffnet er das Eingabefenster für die Priorisierungen]

Jan Thiessen:

Also auf der linken Seite nun die Gewichtungen und auf der rechten die Prioritäten?

Stefan Loy:

Ja. Für die prototypische Anwendung kannst du aber auch alle Eingaben auf 1 Stellen. Damit ist alles gleichpriorisiert.

[Hr. Thiessen schließt die Vorarbeiten ab und wechselt auf das Tabellenblatt des House-of-Wandlungsfähigkeit zur Analyse. Hr. Bokan-Heller arbeitet sich durch Arbeitsblatt 2]

Jan Thiessen:

Ok hier am Beispiel der Einschubregale. Was sieht man in den Grafiken?

Stefan Loy:

In der Mittleren Grafik ist der Soll-Ist-Vergleich gezeigt. Orange ist das Soll, Blau ist das Ist.

Jan Thiessen:

Bei der Qualität erfüllt das genau die Anforderungen. Bei Stückzahl fast gleich. Produkt nicht ganz, ja, und deswegen sind die dann hinten höher gewichtet oder?

Stefan Loy:

Ja. Im ganz rechten Graph sowie bei den rot hinterlegten Zellen siehst du insgesamt, auch mit der Priorisierung und Gewichtung nochmal hinzugezählt, wie sich gesamthaft deine Rezeptoren zueinander verhalten. In dem Falle wegen der Abweichung bei den Stückzahlen und Produkt sind diese hoch.

An der unteren Grafik siehst du dann auch noch, wie wichtig die Wandlungsbefähiger insgesamt sind

Jan Thiessen:

Das heißt, in dem Fall müsste ich an der Mobilität arbeiten oder ist ein großer Wert das worauf man achten muss?

Stefan Loy:

Die Größe des Wertes gibt die an welchen Hebel du hast.

Jan Thiessen:

Gut bei der Mobilität bei einem Einschubregalen ist klar, dass man da keinen großen Hebel hat. Das passt.

[Hr. Thiessen klickt sich durch weitere Objekte und analysiert die Ergebnisse. Hr. Bokan-Heller arbeitet in Mappe 3. Aktueller Zeitstempel 02:03h]

Stefan Loy:

Mit Blick auf die aktuelle Zeit, könnten wir an dieser Stelle auch pausieren.

Jan Thiessen:

Ich würde das jetzt als PDF gerne exportieren.

Stefan Loy:

Export zunächst nur in eine Excel möglich. Anschließend kann die Excel dann in eine PDF gewandelt werden.

Jan Thiessen:

Ok, dann exportiere ich das und speichere es auf dem Desktop ab.

[Export wird gestartet. Es gibt eine Fehlermeldung „400“. Das Exportdokument ist jedoch gespeichert. Die Ursache der Fehlermeldung kann an dem Punkt nicht direkt ermittelt werden]

Jan Thiessen:

Ok, das ist jetzt die Ergebnis-Excel. Da sind die Analysen der Objekte drin?

Stefan Loy:

Ja. Kannst du mal ganz nach vorne gehen? Das allererste Tabellenblatt. Hier hast du die vorigen Start, Transport, Ziel Kombinationen in Wertstromdarstellung. Das sind ja quasi in sich geschlossene Teilsysteme.

Jan Thiessen:

Ok, das entspricht dann ja auch praktischen den Teilwarenstrom.

Hier könnte ich dann noch etwas verändern?

Stefan Loy:

Es gibt keine Themen, an denen es an dem Punkt zu drehen gibt. Aber die Ergebnisse sind nicht gegen Veränderung gesperrt.

Jan Thiessen:

[Klickt sich durch die Blätter der Arbeitsmappe] Aber man sieht, dass fast überall die Mobilität am wenigsten ausschlaggebend ist.

Stefan Loy:

Das liegt an der allgemeinen geringen Gewichtung der Mobilität zu den Rezeptoren.

[Hr. Thiessen speichert und schließt das Dokument. Hr. Bokan-Heller importiert Ergebnisse in das House-of-Wandlungsfähigkeit. Zeitstempel 02:07h]

Jan Thiessen:

Hat das jetzt deine Erwartung entsprochen der Test oder hast du das anders erwartet?

Stefan Loy

Ich hab auch dazugelernt, dass der Test unter Umständen zu umfangreich war und deswegen den Fokus weg vom Anwendungstool verschoben hat. Möglicherweise hätte ein Modell des Systems euch in der Anwendung geholfen

Jan Thiessen:

Ja, das ist in Ordnung, das ist so ein zeittechnisches Thema. In der Realität hätte man das Systemmodell auch erarbeiten müssen.

Was machst du jetzt mit diesen Auswertungen des Anwendungsfalls?

Stefan Loy:

Das wären theoretisch die fertigen Auswertungen an dem Punkt, wo man sagen kann, bei den Objekten, wo es viel Bedarf gibt, die untersucht man noch mal detaillierter und definiert dann Maßnahmen.

Die Ergebnisse sind natürlich rein theoretische Natur. Eine echte Anwendung würde ja auch einen größeren zeitlichen Umfang einnehmen. In der Anleitung steht, mehrere Leute sollen das machen, gemeinsam Lösungen finden, unterschiedliche Gewichtungen zusammenziehen und Optionen vergleichen.

Jan Thiessen:

Es ist auch ein relativ aufwändiger Prozess, wenn das Ergebnis dann hier bei dem Scanner zum Beispiel so aussieht, also ist ja dann relativ stark von den Gewichtungen abhängig. Also Ergebnis ist, das muss nicht so stark angepasst werden. Andererseits, weil der Prozess für dieses Ergebnis wahrscheinlich recht aufwendig, dass ich auch hätte, so sagen können bei einem Scannersystem und den können wir den natürlich dann einfach weglassen.

Stefan Loy:

Bei dem Beispiel Scanner ein klar berechtigter Einwand. Am Ende unterstützt aber auch hier ein quantifizierbarer Wert die Entscheidung.

Jan Thiessen:

Genau. Wenn ich natürlich eine Gewichtung noch ein bisschen genauer mache, als ich die jetzt gemacht hab beziehungsweise mehrere Modelle angewendet werden, kannst du natürlich auch reingehen und sagen, OK, ich spiel das ganze jetzt einfach mal durch und tausche ein paar Objekte wirklich gegeneinander aus.

[Hr. Thiessen beendet die Analyse und packt zusammen. Hr. Bokan-Heller arbeitet am House-of-Wandlungsfähigkeit. Zeitstempel: 02:10h]

Stefan Loy:

Jan und Moritz bitte am Ende noch die Umfrageblätter ausfüllen. Entsprechend offen und direkt auch im Freitextfeld sein. Das ist wichtig für die Ergebnisse und abschließende Evaluation.

Moritz Bokan-Heller:

Ok, ich habe alle Themen jetzt importiert und zusammengetragen. Jetzt erfolgt was?

Stefan Loy:

Du kannst dich im Blatt zum House-of-Wandlungsfähigkeit durch die Objekte klicken und abschließend die Ergebnisse exportieren.

[Kurze Fehlerbehebung, da Hr. Bokan-Heller anfangs das Ausgangsblatt zu den SOLLANforderungen ohne hinterlegten Werten importiert hat. Behebung durch Import der tatsächlich ausgefüllten Arbeitsmappe. Zeitstempel 02:15h]

Jan Thiessen:

Ok, dann gehe ich jetzt und beantworte die Umfrage nach der Mittagspause.

Moritz Bokan-Heller:

Ok, dann speichere ich die Ergebnisse und klicke mich später am Tag durch die Ergebnisse und beantworte abschließend die Umfrage. Kannst du vorher noch die Ergebnisse auf Sinnhaftigkeit kontrollieren?

Stefan Loy:

Ja speichere es und mach das später. Das passt in Anbetracht der Zeit.

Die tatsächlichen Ergebnisse sind zunächst nebensächlich. Da geht es vielmehr um die Frage, ob dich das Tool bei der Anwendung der Methode unterstützt. Zweitens, ob die Ergebnisse irgendwas bringen und drittens, wie die Anwendung der Methode überhaupt an und für sich war.

Hiermit erkläre ich, dass die in diesem Transkript gemachten Zusammenfassungen und kontextgemäßen Niederschriften die tatsächlichen Gesprächsinhalte korrekt widerspiegeln. Zudem bestätige ich die Korrektheit der außergesprächlichen Situationsbeschreibung.

Des Weiteren erkläre ich mich mit der Verwendung und Veröffentlichung meines vollen Namens einverstanden. Dieses Einverständnis kann jederzeit formlos zurückgezogen werden.



München, 08.11.2023

Ort, Datum
Stefan Loy

München, 08.11.23

Ort, Datum
Moritz Bokan-Heller

München 13.11.23

Ort, Datum
Jan Thiessen

Umfragebogen – Jan Thiessen

Umfrage zur Evaluierung von Methode/Anwendungstool					
Methode	Legende				
	0	1	2	3	4
Fragebogen	Gering Groß				
Nr.	Thema	Ausprägung			
1)	Wie bewerten Sie die Komplexität der Methode?	2			
2)	Wie viel zusätzliches Vorwissen benötigt ein Fachteam im Bereich der Produktion/Logistik, um diese Methode anzuwenden?	3			
3)	Wie Aussagekräftig schätzen Sie die erhaltenen Ergebnisse ein?	2			
4)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie eine regelmäßige Anwendung der Methode im Regelbetrieb eines Unternehmens ein?	2			
5)	In welchem Umfang verbleiben nach der Anwendung der Methode noch offenen / nicht betrachtete Themen?	0			
6)	Wie Bewerten Sie die Menge an erhaltenen Ergebnissen bzw. Kennzahlen? [0 zu gering, 2 richtige Anzahl, 5 zu groß]	2			
7)	Wie bewerten Sie die Allgemeingültigkeit der Methode innerhalb der Produktionslogistik?	2			

Anwendungstool					
Fragebogen	Legende				
	0	1	2	3	4
Fragebogen	Gering Groß				
Nr.	Thema	Ausprägung			
1)	Wie bewerten Sie den zeitlichen Aufwand zur Durchführung der Methode/des Tools?	4			
2)	Wie bewerten Sie die Menge an Informationsmaterial zur Durchführung der Methode/des Tools? [0 zu gering, 2 richtige Anzahl, 4 zu groß]	3			
3)	Wie bewerten Sie die Menge an anwendungsfall-spezifischen Anpassungsmöglichkeiten innerhalb der Methode/des Tools? [0 zu gering, 2 richtige Anzahl, 4 zu groß]	2			
4)	Wie sehr unterstützt das Anwendungstool in der Umsetzung der Methode?	2			
5)	Wie bewerten Sie die technische Ausgereiftheit des Anwendungstools? [0 sehr schlecht, 2 OK, 4 sehr gut]	3			
6)	Wie bewerten Sie die optische Ausgereiftheit des Anwendungstools? [0 sehr schlecht, 2 OK, 4 sehr gut]	4			
7)	In welchem Umfang hätten Sie weitere Kriterien mit in die Bewertung aufnehmen wollen?	1			

Freifeld	
Nr.	Thema
1)	Verbesserungspotentiale in der Methode bzw. dem Anwendungstool
	Recht hoher Zeitaufwand nötig, wenn es eine große Fertigung gibt. Für kleinere Teibereiche deutlich besser anzuwenden
2)	Allgemeine Kommentare zum Evaluierungs-TestCase
	2 Statt 3 Warenströme hätten für eine einföhrung in das Programm gereicht
3)	Allgemeine Kommentare zu der Methode bzw. dem Anwendungstool
	Anwendungstool wirkt sehr stabil Programmiert und ist "Kindersicher". Anleitung ist sehr Hilfreich. Optische aufmachung gefällt mir sehr. Darstellung der Ergebnisse gut gemacht und hilfreich. Sehr aufwändig gestaltet im positiven sinne. Hat man die Funktionen einmal verstanden und das tool benutzt fällt eine zweitbenutzung sehr leicht

Umfragebogen – Moritz Bokan-Heller

Umfrage zur Evaluierung von Methode/Anwendungstool

Methode		Legende				
		0	1	2	3	4
Fragebogen						
Nr.	Thema	Ausprägung				
1)	Wie bewerten Sie die Komplexität der Methode?	4				
2)	Wie viel zusätzliches Vorwissen benötigt ein Fachteam im Bereich der Produktion/Logistik, um diese Methode anzuwenden?	3				
3)	Wie Aussagekräftig schätzen Sie die erhaltenen Ergebnisse ein?	4				
4)	Wie Wahrscheinlich schätzen Sie eine regelmäßige Anwendung der Methode im Regelbetrieb eines Unternehmens ein?	2				
5)	In welchem Umfang verbleiben nach der Anwendung der Methode noch offenen / nicht betrachtete Themen?	2				
6)	Wie bewerten Sie die Menge an erhaltenen Ergebnissen bzw. Kennzahlen? [0 zu gering, 2 richtige Anzahl, 5 zu groß]	2				
7)	Wie bewerten Sie die Allgemeingültigkeit der Methode innerhalb der Produktionslogistik?	2				

Anwendungstool		Legende				
		0	1	2	3	4
Fragebogen						
Nr.	Thema	Ausprägung				
1)	Wie bewerten Sie den zeitlichen Aufwand zur Durchführung der Methode/des Tools?	4				
2)	Wie bewerten Sie die Menge an Informationsmaterial zur Durchführung der Methode/des Tools? [0 zu gering, 2 richtige Anzahl, 4 zu groß]	2				
3)	Wie bewerten Sie die Menge an anwendungsfall-spezifischen Anpassungsmöglichkeiten innerhalb der Methode/des Tools? [0 zu gering, 2 richtige Anzahl, 4 zu groß]	2				
4)	Wie sehr unterstützt das Anwendungstool in der Umsetzung der Methode?	4				
5)	Wie bewerten Sie die technische Ausgereiftheit des Anwendungstools? [0 sehr schlecht, 2 OK, 4 sehr gut]	2				
6)	Wie bewerten Sie die optische Ausgereiftheit des Anwendungstools? [0 sehr schlecht, 2 OK, 4 sehr gut]	2				
7)	In welchem Umfang hätten Sie weitere Kriterien mit in die Bewertung aufnehmen wollen?	1				

Freifeld	
Nr.	Thema
	Verbesserungspotentiale in der Methode bzw. dem Anwendungstool
1)	Berücksichtigung eines Beispiels beim modellieren der Logistikmatrix hat mir gefehlt, oder eine Visuelle Darstellung die zeigt, welche Prozessbausteine ich berücksichtigen müsste. Wobei ich nicht genau sagen kann, ob in der Testcase-Beschreibung dies berücksichtigt ist, da wir, um den zeitlichen Aufwand gering zu halten, bei der Bearbeitung von Stefan Loyd direkt betreut wurden.
	Allgemeine Kommentare zum Evaluierungs-Testcase
2)	Der Testcase ist ausreichend komplex ausgewählt, sodass eine Vorstellung möglich ist, wie kompliziert die Bewertung eines realen Produktionslogistik-Systems wäre. Wünschenswert wäre gewesen, dass der Testcase bei der Erstellung der Logistikelemente weniger Frei gewesen wäre. Umgang mit dem Tool ist komplex. Ich hätte mir mehr als die zwei Stunden Bearbeitungszeit gewünscht.
	Allgemeine Kommentare zu der Methode bzw. dem Anwendungstool
3)	Auf dem aktuellen Stand kann die Methode bzw. das Anwendungstool nicht ohne Betreuung in der Praxis genutzt werden. Für die vergleichsweise einfache Darstellung funktioniert das Tool erstaunlich gut. Viele Fehlermöglichkeiten wurden antizipiert und seitens Programmierung abgefangen.

Ergebnisse des Anwendungstests – Jan Thiessen:

Übersicht der Analyse - Wertstromdarstellung

Wareneingangslager WE		
Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	56,6%
	Stückzahl	58,1%
	Zeit	58,0%
	Kosten	57,9%
	Qualität	56,6%
	Systemelement	59,2%



FTS Karosseriebau		
Objekttyp	Fahrerlose Transportsysteme	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	84,9%
	Stückzahl	85,3%
	Zeit	84,9%
	Kosten	85,1%
	Qualität	84,9%
	Systemelement	87,8%



Einschubregale		
Objekttyp	Durchlauf-Einschubregal	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	62,9%
	Stückzahl	58,0%
	Zeit	56,6%
	Kosten	58,4%
	Qualität	62,9%
	Systemelement	63,5%

Wareneingangslager WE		
Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	56,6%
	Stückzahl	58,1%
	Zeit	58,0%
	Kosten	57,9%
	Qualität	56,6%
	Systemelement	59,2%



Rollenbahn Endmontage		
Objekttyp	Rollenbahn	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	51,4%
	Stückzahl	51,4%
	Zeit	50,2%
	Kosten	48,7%
	Qualität	51,8%
	Systemelement	49,5%



Endmontage kommissioniersystem		
Objekttyp	Automat	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	56,9%
	Stückzahl	52,3%
	Zeit	50,5%
	Kosten	53,7%
	Qualität	57,1%
	Systemelement	59,7%

Wareneingangslager WE		
Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	56,6%
	Stückzahl	58,1%
	Zeit	58,0%
	Kosten	57,9%
	Qualität	56,6%
	Systemelement	59,2%



Montage Routenzug		
Objekttyp	Schlepper	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	84,4%
	Stückzahl	87,0%
	Zeit	86,6%
	Kosten	86,8%
	Qualität	84,2%
	Systemelement	82,7%



montage pick by light		
Objekttyp	Pick-by-Light WzM	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	76,9%
	Stückzahl	78,8%
	Zeit	77,0%
	Kosten	77,0%
	Qualität	77,6%
	Systemelement	79,7%

Wareneingangslager WE		
Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	56,6%
	Stückzahl	58,1%
	Zeit	58,0%
	Kosten	57,9%
	Qualität	56,6%
	Systemelement	59,2%



FTS Karosseriebau		
Objekttyp	Fahrerlose Transportsysteme	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	84,9%
	Stückzahl	85,3%
	Zeit	84,9%
	Kosten	85,1%
	Qualität	84,9%
	Systemelement	87,8%



Hochzeit		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	59,6%
	Stückzahl	52,9%
	Zeit	50,5%
	Kosten	55,0%
	Qualität	60,1%
	Systemelement	60,0%

Einschubregale		
Objekttyp	Durchlauf-Einschubregal	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	62,9%
	Stückzahl	58,0%
	Zeit	56,6%
	Kosten	58,4%
	Qualität	62,9%
	Systemelement	63,5%



Kettenförderer Karosserie		
Objekttyp	(Trag-) Kettenförderer	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	43,7%
	Stückzahl	33,3%
	Zeit	32,1%
	Kosten	35,5%
	Qualität	43,3%
	Systemelement	41,2%



karosserie umschlagung start		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	59,6%
	Stückzahl	52,9%
	Zeit	50,5%
	Kosten	55,0%
	Qualität	60,1%
	Systemelement	60,0%

Warenannahme scner		
Objekttyp	Pick-by-Scan	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	86,8%
	Stückzahl	86,9%
	Zeit	89,6%
	Kosten	87,7%
	Qualität	86,5%
	Systemelement	87,5%

Hochregaltapler Wareneingang		
Objekttyp	Hochregaltapler	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	76,5%
	Stückzahl	74,0%
	Zeit	75,0%
	Kosten	76,1%
	Qualität	75,6%
	Systemelement	74,1%

Wareneingangslager WE		
Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	56,6%
	Stückzahl	58,1%
	Zeit	58,0%
	Kosten	57,9%
	Qualität	56,6%
	Systemelement	59,2%

Endmontage kommissioniersystem		
Objekttyp	Automat	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	56,9%
	Stückzahl	52,3%
	Zeit	50,5%
	Kosten	53,7%
	Qualität	57,1%
	Systemelement	59,7%

Endmontage Fördersystem		
Objekttyp	Rollenförderer mit Antrieb	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	44,9%
	Stückzahl	34,1%
	Zeit	32,8%
	Kosten	36,3%
	Qualität	44,4%
	Systemelement	42,7%

Hochzeit		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	59,6%
	Stückzahl	52,8%
	Zeit	50,5%
	Kosten	55,0%
	Qualität	60,1%
	Systemelement	60,0%

karosserie umschlängung start		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	59,6%
	Stückzahl	52,9%
	Zeit	50,5%
	Kosten	55,0%
	Qualität	60,1%
	Systemelement	60,0%

Lackierei Fördertechnik		
Objekttyp	Elektrohängebahn	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	45,0%
	Stückzahl	43,5%
	Zeit	43,8%
	Kosten	43,6%
	Qualität	44,7%
	Systemelement	43,7%

Karossee lackierung ende umschlag		
Objekttyp	Roboter instationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	63,8%
	Stückzahl	61,2%
	Zeit	59,6%
	Kosten	61,7%
	Qualität	64,3%
	Systemelement	64,0%

Karossee lackierung ende umschlag		
Objekttyp	Roboter instationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	63,8%
	Stückzahl	61,2%
	Zeit	59,6%
	Kosten	61,7%
	Qualität	64,3%
	Systemelement	64,0%

Bandförder Montage		
Objekttyp	Bandförderer	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	39,1%
	Stückzahl	30,6%
	Zeit	29,0%
	Kosten	31,4%
	Qualität	38,8%
	Systemelement	38,8%

Endmontage lager		
Objekttyp	Blocklager manuelle Ein- bzw. Auslagerung	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	50,6%
	Stückzahl	51,4%
	Zeit	53,6%
	Kosten	50,2%
	Qualität	49,3%
	Systemelement	50,6%

Hochzeit		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	59,6%
	Stückzahl	52,8%
	Zeit	50,5%
	Kosten	55,0%
	Qualität	60,1%
	Systemelement	60,0%

Bandförder Montage		
Objekttyp	Bandförderer	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	39,1%
	Stückzahl	30,6%
	Zeit	29,0%
	Kosten	31,4%
	Qualität	38,8%
	Systemelement	38,8%

Endmontage lager		
Objekttyp	Blocklager manuelle Ein- bzw. Auslagerung	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	0%
Rezeptbezogene Wendungsfähigkeit	Produkt	50,6%
	Stückzahl	51,4%
	Zeit	53,6%
	Kosten	50,2%
	Qualität	49,3%
	Systemelement	50,6%

Ergebnisse des Anwendungstests – Moritz Bokan-Heller:

Übersicht der Analyse - Wertstromdarstellung

<table border="1"> <tr><td colspan="2">HRL</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>58,2%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>59,2%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>59,8%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>56,1%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>56,9%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>58,3%</td></tr> </table>	HRL		Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	58,2%	Stückzahl	59,2%	Zeit	59,8%	Kosten	56,1%	Qualität	56,9%	Systemelement	58,3%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Transport Montagelinie</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Schlepper</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>84,1%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>89,7%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>90,7%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>85,6%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>84,9%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>89,3%</td></tr> </table>	Transport Montagelinie		Objekttyp	Schlepper	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	84,1%	Stückzahl	89,7%	Zeit	90,7%	Kosten	85,6%	Qualität	84,9%	Systemelement	89,3%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Bereitstellung DLR Endmontage</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Pick-by-Light WzM</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>77,2%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>75,3%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>74,7%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>76,7%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>79,0%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>81,7%</td></tr> </table>	Bereitstellung DLR Endmontage		Objekttyp	Pick-by-Light WzM	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	77,2%	Stückzahl	75,3%	Zeit	74,7%	Kosten	76,7%	Qualität	79,0%	Systemelement	81,7%
HRL																																																																																																				
Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	58,2%																																																																																																			
Stückzahl	59,2%																																																																																																			
Zeit	59,8%																																																																																																			
Kosten	56,1%																																																																																																			
Qualität	56,9%																																																																																																			
Systemelement	58,3%																																																																																																			
Transport Montagelinie																																																																																																				
Objekttyp	Schlepper																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	84,1%																																																																																																			
Stückzahl	89,7%																																																																																																			
Zeit	90,7%																																																																																																			
Kosten	85,6%																																																																																																			
Qualität	84,9%																																																																																																			
Systemelement	89,3%																																																																																																			
Bereitstellung DLR Endmontage																																																																																																				
Objekttyp	Pick-by-Light WzM																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	77,2%																																																																																																			
Stückzahl	75,3%																																																																																																			
Zeit	74,7%																																																																																																			
Kosten	76,7%																																																																																																			
Qualität	79,0%																																																																																																			
Systemelement	81,7%																																																																																																			
<table border="1"> <tr><td colspan="2">HRL</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>58,2%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>59,2%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>59,8%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>56,1%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>56,9%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>59,3%</td></tr> </table>	HRL		Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	58,2%	Stückzahl	59,2%	Zeit	59,8%	Kosten	56,1%	Qualität	56,9%	Systemelement	59,3%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Transport Motor</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Fahrlose Transportsysteme</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>86,7%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>86,4%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>86,2%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>83,7%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>84,9%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>87,7%</td></tr> </table>	Transport Motor		Objekttyp	Fahrlose Transportsysteme	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	86,7%	Stückzahl	86,4%	Zeit	86,2%	Kosten	83,7%	Qualität	84,9%	Systemelement	87,7%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Hochzeit</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Roboter stationär</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>56,4%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>46,7%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>46,0%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>53,4%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>56,8%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>61,4%</td></tr> </table>	Hochzeit		Objekttyp	Roboter stationär	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	56,4%	Stückzahl	46,7%	Zeit	46,0%	Kosten	53,4%	Qualität	56,8%	Systemelement	61,4%
HRL																																																																																																				
Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	58,2%																																																																																																			
Stückzahl	59,2%																																																																																																			
Zeit	59,8%																																																																																																			
Kosten	56,1%																																																																																																			
Qualität	56,9%																																																																																																			
Systemelement	59,3%																																																																																																			
Transport Motor																																																																																																				
Objekttyp	Fahrlose Transportsysteme																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	86,7%																																																																																																			
Stückzahl	86,4%																																																																																																			
Zeit	86,2%																																																																																																			
Kosten	83,7%																																																																																																			
Qualität	84,9%																																																																																																			
Systemelement	87,7%																																																																																																			
Hochzeit																																																																																																				
Objekttyp	Roboter stationär																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	56,4%																																																																																																			
Stückzahl	46,7%																																																																																																			
Zeit	46,0%																																																																																																			
Kosten	53,4%																																																																																																			
Qualität	56,8%																																																																																																			
Systemelement	61,4%																																																																																																			
<table border="1"> <tr><td colspan="2">HRL</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>58,2%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>59,2%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>59,8%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>56,1%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>56,9%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>58,3%</td></tr> </table>	HRL		Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	58,2%	Stückzahl	59,2%	Zeit	59,8%	Kosten	56,1%	Qualität	56,9%	Systemelement	58,3%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Materialförderer Antrieb</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Rollenbahn</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>49,0%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>47,1%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>44,9%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>53,1%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>54,3%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>53,9%</td></tr> </table>	Materialförderer Antrieb		Objekttyp	Rollenbahn	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	49,0%	Stückzahl	47,1%	Zeit	44,9%	Kosten	53,1%	Qualität	54,3%	Systemelement	53,9%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Auto-Komm-Antrieb</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Automat</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>58,0%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>50,0%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>49,2%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>52,9%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>54,8%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>61,9%</td></tr> </table>	Auto-Komm-Antrieb		Objekttyp	Automat	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	58,0%	Stückzahl	50,0%	Zeit	49,2%	Kosten	52,9%	Qualität	54,8%	Systemelement	61,9%
HRL																																																																																																				
Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	58,2%																																																																																																			
Stückzahl	59,2%																																																																																																			
Zeit	59,8%																																																																																																			
Kosten	56,1%																																																																																																			
Qualität	56,9%																																																																																																			
Systemelement	58,3%																																																																																																			
Materialförderer Antrieb																																																																																																				
Objekttyp	Rollenbahn																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	49,0%																																																																																																			
Stückzahl	47,1%																																																																																																			
Zeit	44,9%																																																																																																			
Kosten	53,1%																																																																																																			
Qualität	54,3%																																																																																																			
Systemelement	53,9%																																																																																																			
Auto-Komm-Antrieb																																																																																																				
Objekttyp	Automat																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	58,0%																																																																																																			
Stückzahl	50,0%																																																																																																			
Zeit	49,2%																																																																																																			
Kosten	52,9%																																																																																																			
Qualität	54,8%																																																																																																			
Systemelement	61,9%																																																																																																			
<table border="1"> <tr><td colspan="2">HRL</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>58,2%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>59,2%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>59,8%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>56,1%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>56,9%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>58,3%</td></tr> </table>	HRL		Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	58,2%	Stückzahl	59,2%	Zeit	59,8%	Kosten	56,1%	Qualität	56,9%	Systemelement	58,3%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Transport Karo</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Fahrlose Transportsysteme</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>86,7%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>86,4%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>86,2%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>83,7%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>84,9%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>87,7%</td></tr> </table>	Transport Karo		Objekttyp	Fahrlose Transportsysteme	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	86,7%	Stückzahl	86,4%	Zeit	86,2%	Kosten	83,7%	Qualität	84,9%	Systemelement	87,7%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Bereitstellung DLR Karo</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Pick-by-Light WzM</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>77,2%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>75,3%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>74,7%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>76,7%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>79,0%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>81,7%</td></tr> </table>	Bereitstellung DLR Karo		Objekttyp	Pick-by-Light WzM	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	77,2%	Stückzahl	75,3%	Zeit	74,7%	Kosten	76,7%	Qualität	79,0%	Systemelement	81,7%
HRL																																																																																																				
Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	58,2%																																																																																																			
Stückzahl	59,2%																																																																																																			
Zeit	59,8%																																																																																																			
Kosten	56,1%																																																																																																			
Qualität	56,9%																																																																																																			
Systemelement	58,3%																																																																																																			
Transport Karo																																																																																																				
Objekttyp	Fahrlose Transportsysteme																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	86,7%																																																																																																			
Stückzahl	86,4%																																																																																																			
Zeit	86,2%																																																																																																			
Kosten	83,7%																																																																																																			
Qualität	84,9%																																																																																																			
Systemelement	87,7%																																																																																																			
Bereitstellung DLR Karo																																																																																																				
Objekttyp	Pick-by-Light WzM																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	77,2%																																																																																																			
Stückzahl	75,3%																																																																																																			
Zeit	74,7%																																																																																																			
Kosten	76,7%																																																																																																			
Qualität	79,0%																																																																																																			
Systemelement	81,7%																																																																																																			
<table border="1"> <tr><td colspan="2">Scanner</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Pick-by-Scan</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>88,0%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>92,0%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>91,3%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>88,0%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>88,1%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>87,4%</td></tr> </table>	Scanner		Objekttyp	Pick-by-Scan	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	88,0%	Stückzahl	92,0%	Zeit	91,3%	Kosten	88,0%	Qualität	88,1%	Systemelement	87,4%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">WE Stapler</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Gabelstapler</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>76,1%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>78,6%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>78,9%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>75,2%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>73,0%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>71,2%</td></tr> </table>	WE Stapler		Objekttyp	Gabelstapler	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	76,1%	Stückzahl	78,6%	Zeit	78,9%	Kosten	75,2%	Qualität	73,0%	Systemelement	71,2%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">HRL</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>58,2%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>59,2%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>59,8%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>56,1%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>56,9%</td></tr> <tr><td>Systemelement</td><td>58,3%</td></tr> </table>	HRL		Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	58,2%	Stückzahl	59,2%	Zeit	59,8%	Kosten	56,1%	Qualität	56,9%	Systemelement	58,3%
Scanner																																																																																																				
Objekttyp	Pick-by-Scan																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	88,0%																																																																																																			
Stückzahl	92,0%																																																																																																			
Zeit	91,3%																																																																																																			
Kosten	88,0%																																																																																																			
Qualität	88,1%																																																																																																			
Systemelement	87,4%																																																																																																			
WE Stapler																																																																																																				
Objekttyp	Gabelstapler																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	76,1%																																																																																																			
Stückzahl	78,6%																																																																																																			
Zeit	78,9%																																																																																																			
Kosten	75,2%																																																																																																			
Qualität	73,0%																																																																																																			
Systemelement	71,2%																																																																																																			
HRL																																																																																																				
Objekttyp	Hochregallager automatische Ein- bzw. Auslagerung																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	58,2%																																																																																																			
Stückzahl	59,2%																																																																																																			
Zeit	59,8%																																																																																																			
Kosten	56,1%																																																																																																			
Qualität	56,9%																																																																																																			
Systemelement	58,3%																																																																																																			
<table border="1"> <tr><td colspan="2">Bereitstellung DLR Endmontage</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Pick-by-Light WzM</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>77,2%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>75,3%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>74,7%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>76,7%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>79,0%</td></tr> </table>	Bereitstellung DLR Endmontage		Objekttyp	Pick-by-Light WzM	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	77,2%	Stückzahl	75,3%	Zeit	74,7%	Kosten	76,7%	Qualität	79,0%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Linie - Endm.</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>(Trag-) Kettenförderer</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>42,4%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>31,3%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>28,3%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>39,8%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>40,3%</td></tr> </table>	Linie - Endm.		Objekttyp	(Trag-) Kettenförderer	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	42,4%	Stückzahl	31,3%	Zeit	28,3%	Kosten	39,8%	Qualität	40,3%	→	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Umschlag fertiges Fahrzeug</td></tr> <tr><td>Objekttyp</td><td>Roboter stationär</td></tr> <tr><td colspan="2">Technische Systemeigenschaften</td></tr> <tr><td>Ladungsträger-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Prozessgeschwindigkeit</td><td></td></tr> <tr><td>Gewichts-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Dimensions-Kapazität</td><td></td></tr> <tr><td>Verfügbarkeit</td><td>0%</td></tr> <tr><td>Automatisierungsgrad</td><td></td></tr> <tr><td colspan="2">Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit</td></tr> <tr><td>Produkt</td><td>58,4%</td></tr> <tr><td>Stückzahl</td><td>46,7%</td></tr> <tr><td>Zeit</td><td>46,0%</td></tr> <tr><td>Kosten</td><td>53,4%</td></tr> <tr><td>Qualität</td><td>56,8%</td></tr> </table>	Umschlag fertiges Fahrzeug		Objekttyp	Roboter stationär	Technische Systemeigenschaften		Ladungsträger-Kapazität		Prozessgeschwindigkeit		Gewichts-Kapazität		Dimensions-Kapazität		Verfügbarkeit	0%	Automatisierungsgrad		Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit		Produkt	58,4%	Stückzahl	46,7%	Zeit	46,0%	Kosten	53,4%	Qualität	56,8%						
Bereitstellung DLR Endmontage																																																																																																				
Objekttyp	Pick-by-Light WzM																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	77,2%																																																																																																			
Stückzahl	75,3%																																																																																																			
Zeit	74,7%																																																																																																			
Kosten	76,7%																																																																																																			
Qualität	79,0%																																																																																																			
Linie - Endm.																																																																																																				
Objekttyp	(Trag-) Kettenförderer																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	42,4%																																																																																																			
Stückzahl	31,3%																																																																																																			
Zeit	28,3%																																																																																																			
Kosten	39,8%																																																																																																			
Qualität	40,3%																																																																																																			
Umschlag fertiges Fahrzeug																																																																																																				
Objekttyp	Roboter stationär																																																																																																			
Technische Systemeigenschaften																																																																																																				
Ladungsträger-Kapazität																																																																																																				
Prozessgeschwindigkeit																																																																																																				
Gewichts-Kapazität																																																																																																				
Dimensions-Kapazität																																																																																																				
Verfügbarkeit	0%																																																																																																			
Automatisierungsgrad																																																																																																				
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit																																																																																																				
Produkt	58,4%																																																																																																			
Stückzahl	46,7%																																																																																																			
Zeit	46,0%																																																																																																			
Kosten	53,4%																																																																																																			
Qualität	56,8%																																																																																																			

1	Systemelement	81,7%
---	---------------	-------

Hochzeit		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	58,4%
	Stückzahl	46,7%
	Zeit	46,0%
	Kosten	55,4%
	Qualität	56,8%
	Systemelement	63,4%



1	Systemelement	46,4%
---	---------------	-------

Linie - Endm.		
Objekttyp	(Trag-) Kettenförderer	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	42,4%
	Stückzahl	31,3%
	Zeit	28,3%
	Kosten	39,8%
	Qualität	40,3%
	Systemelement	46,4%



1	Systemelement	63,4%
---	---------------	-------

Umschlag fertiges Fahrzeug		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	58,4%
	Stückzahl	46,7%
	Zeit	46,0%
	Kosten	55,4%
	Qualität	56,8%
	Systemelement	63,4%

Übersetzer Karo Lack		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	58,4%
	Stückzahl	46,7%
	Zeit	46,0%
	Kosten	55,4%
	Qualität	56,8%
	Systemelement	63,4%



Linie - EH Lack		
Objekttyp	Elektrohängebahn	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	44,6%
	Stückzahl	41,3%
	Zeit	43,6%
	Kosten	45,1%
	Qualität	44,7%
	Systemelement	44,4%



Hochzeit		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	58,4%
	Stückzahl	46,7%
	Zeit	46,0%
	Kosten	55,4%
	Qualität	56,8%
	Systemelement	63,4%

Auto-Komm-Antrieb		
Objekttyp	Autonat	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	58,0%
	Stückzahl	50,0%
	Zeit	49,2%
	Kosten	52,9%
	Qualität	54,8%
	Systemelement	61,9%



Linie - Antrieb RF		
Objekttyp	Rollenförderer mit Antrieb	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	43,8%
	Stückzahl	32,2%
	Zeit	26,9%
	Kosten	40,8%
	Qualität	41,5%
	Systemelement	49,2%



Hochzeit		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	58,4%
	Stückzahl	46,7%
	Zeit	46,0%
	Kosten	55,4%
	Qualität	56,8%
	Systemelement	63,4%

Bereitstellung DLR Karo		
Objekttyp	Pick-by-Light WzM	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	77,2%
	Stückzahl	75,3%
	Zeit	74,7%
	Kosten	76,7%
	Qualität	79,0%
	Systemelement	81,7%



Linie - KF Karo		
Objekttyp	(Trag-) Kettenförderer	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	42,4%
	Stückzahl	31,3%
	Zeit	28,3%
	Kosten	39,8%
	Qualität	40,3%
	Systemelement	46,4%



Übersetzer Karo Lack		
Objekttyp	Roboter stationär	
Technische Systemeigenschaften	Ladungsträger-Kapazität	
	Prozessgeschwindigkeit	
	Gewichts-Kapazität	
	Dimensions-Kapazität	
	Verfügbarkeit	0%
	Automatisierungsgrad	
Rezeptionsbezogene Wandlungsfähigkeit	Produkt	58,4%
	Stückzahl	46,7%
	Zeit	46,0%
	Kosten	55,4%
	Qualität	56,8%
	Systemelement	63,4%

C Zitation nichtveröffentlicher Arbeiten

Erlaubnis für Nennung und Zitation aus nichtveröffentlichten studentischen Arbeiten



Franjo Bartol

Auch auf Mobilgeräten verfügbar



Franjo Bartol · 1. Grades

Associate @DRIVE Consulting | M.Sc. Maschinenwesen @TUM

22. SEPT.



Stefan Loy · 08:45

Hallo Franjo,
ich arbeite aktuell an einem Masterarbeitsthema und Pia Vollmuth, welches auch an deiner Arbeit nahe dran ist. Entsprechend würde ich deine Arbeit gerne als Vorarbeit nennen und dich hiermit gerne um schriftliche Erlaubnis bitten, wie es der TUM-Zitierleitfaden vorsieht.
LG, Stefan Loy



Franjo Bartol · 08:48

Hallo Stefan, gerne kannst du meine MA in deiner eigenen Arbeit zitieren! VG Franjo

D Literaturanhang

Innerhalb des Standes der Technik, Kapitel 3, genannte und referenzierte Abbildungen:

Kapitel 3.2.1, Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung, Hernandez – 2003

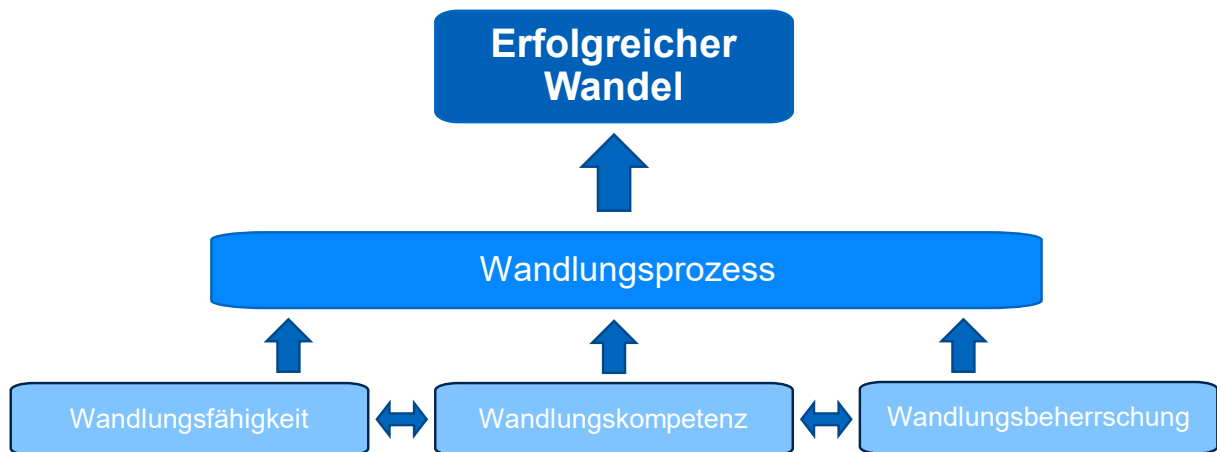


Abbildung 8-1: Erfolgsfaktoren des Wandels in Anlehnung an [Her-2003, S. 50]

Kapitel 3.2.1, Wandlungsfähige Produktionslogistik, Bertsch und Nyhuis – 2011

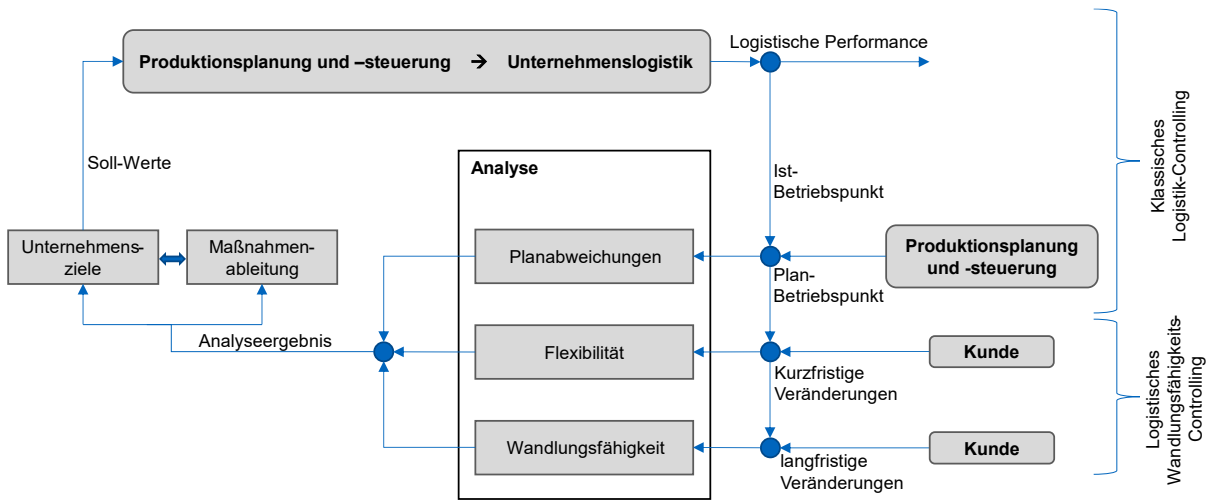


Abbildung 8-2: Logistisches Wandlungsfähigkeits-Controlling in Anlehnung an [Ber-2011, S. 632]

Kapitel 3.2.2, Gestaltung und Nutzung produktionslogistischer Wandlungsfähigkeit, Bertsch und Nyhuis – 2012

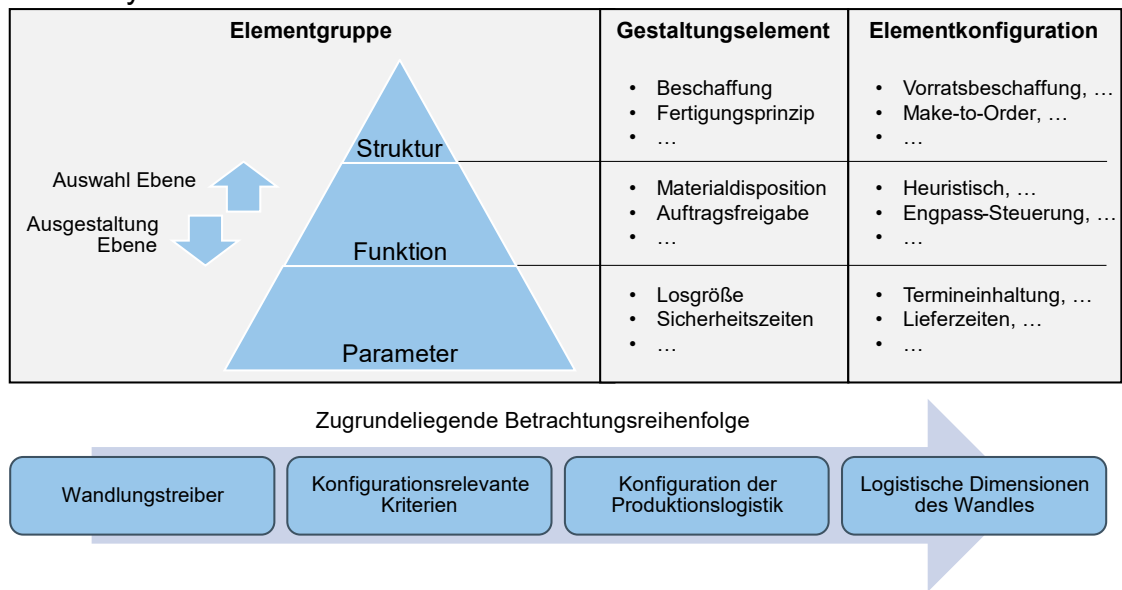


Abbildung 8-3: Gestaltungsmethode und Gestaltungsmöglichkeiten für produktionslogistische Wandlungsfähigkeit in Anlehnung [Ber-2012, S. 438] und [Ber-2012, S. 441]

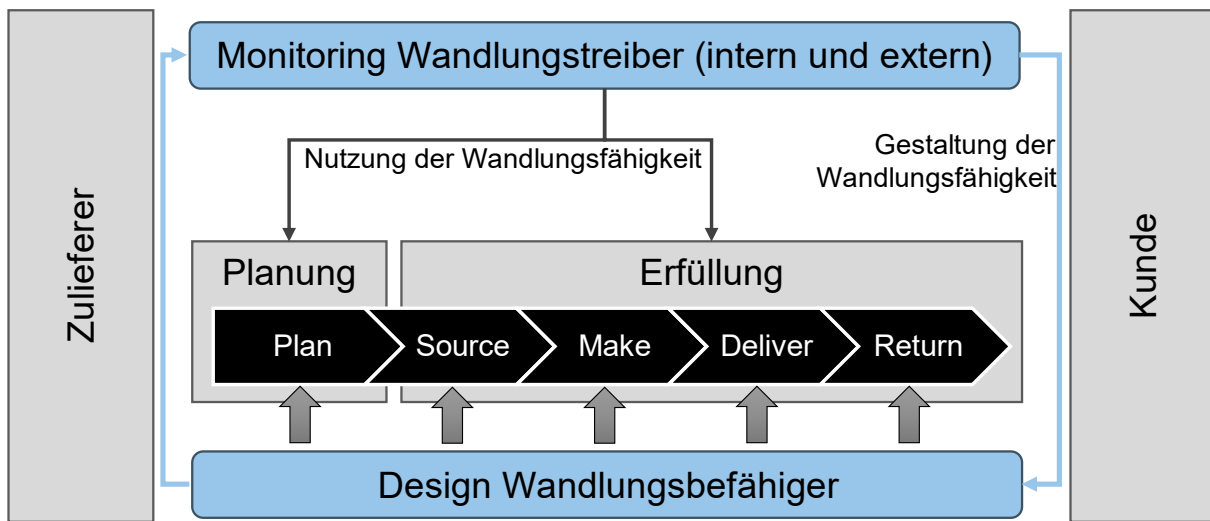


Abbildung 8-4: Gestaltungsmodell logistischer Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Ste-2014, S.128]

Kapitel 3.3.1, Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis unscharfer Daten, Hawer – 2020

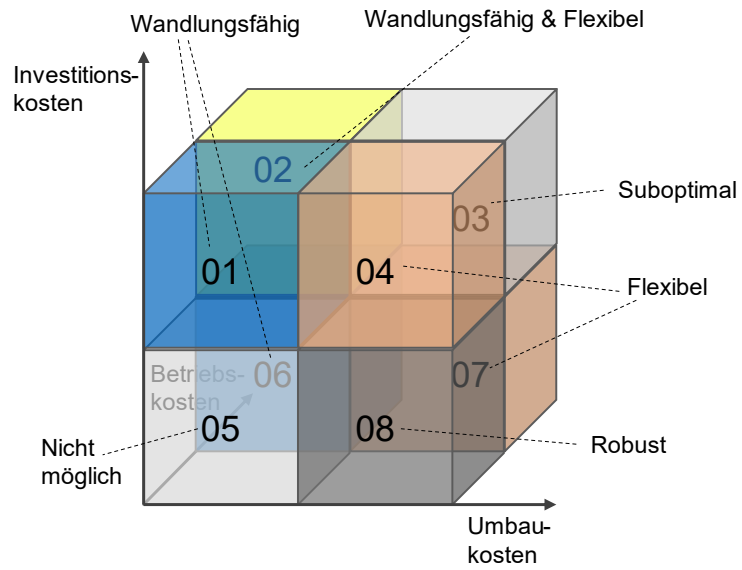


Abbildung 8-5: Kostentechnische Klassifizierung der Veränderungsfähigkeit in Anlehnung an [Hawer 2020, S. 126]

Kapitel 3.3.2, Modulare Gestaltung und ganzheitliche Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme, Drabow – 2006

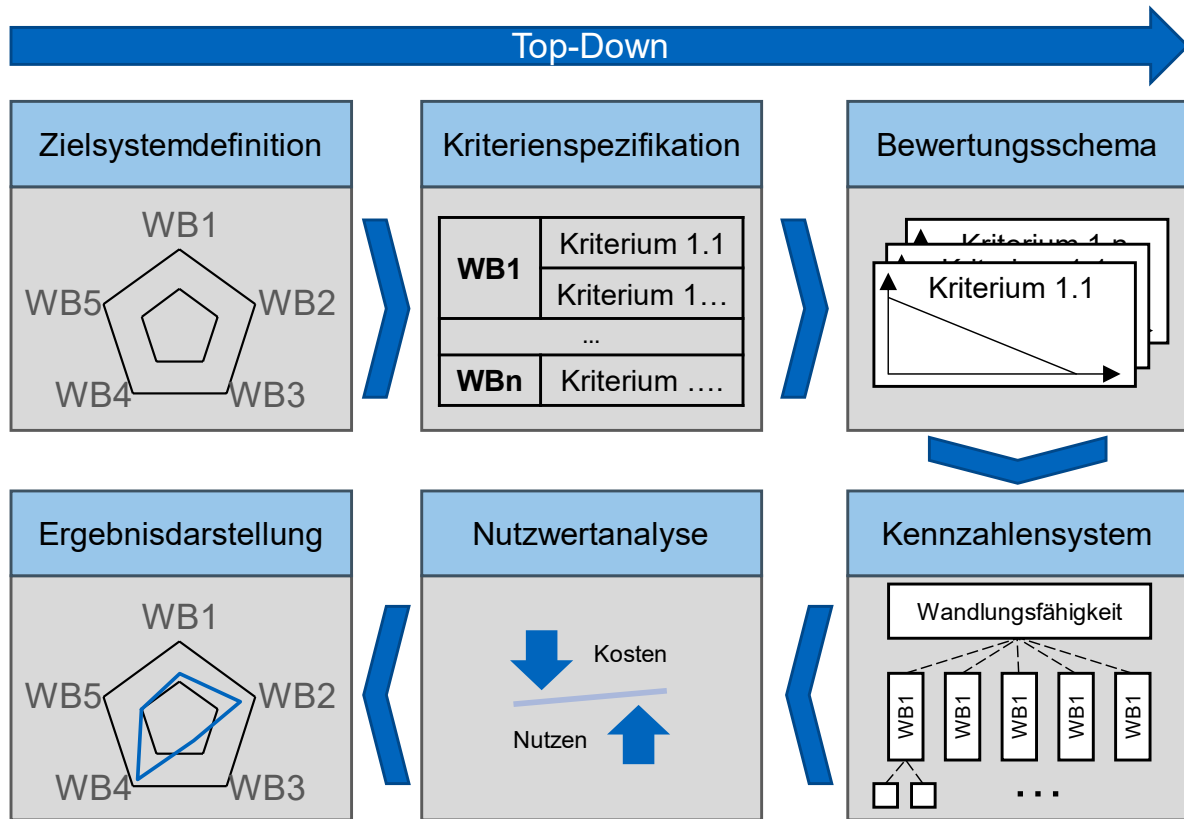


Abbildung 8-6: Bewertungsmethode der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Dra-2006, S. 96]

Kapitel 3.3.2, Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten, Heger – 2007

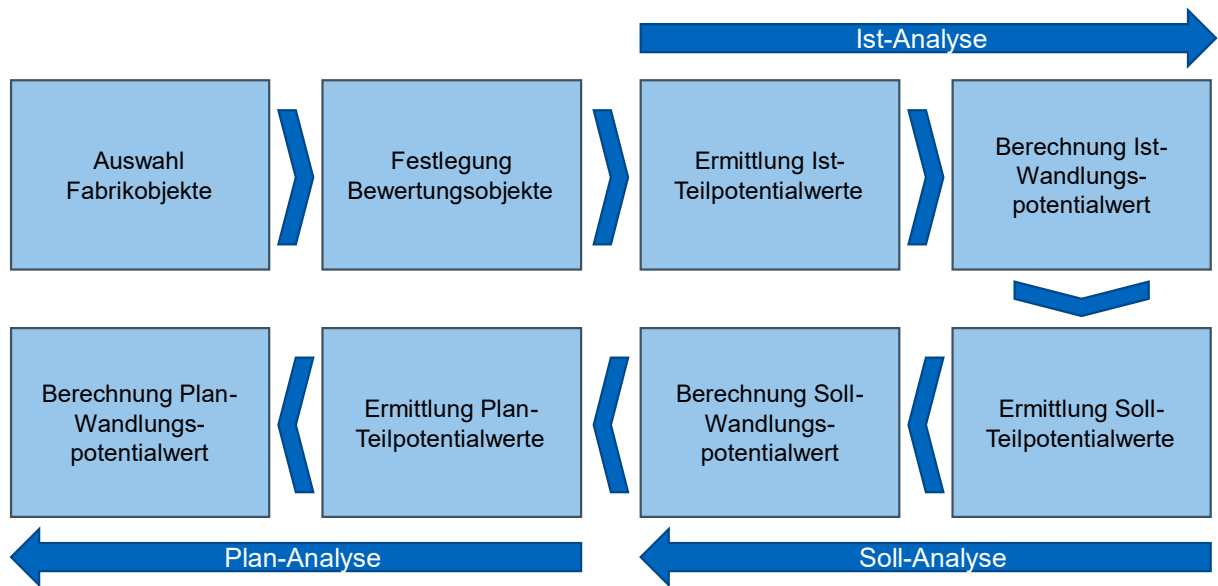


Abbildung 8-7: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten in Anlehnung an [Heger 2007, S. 106]

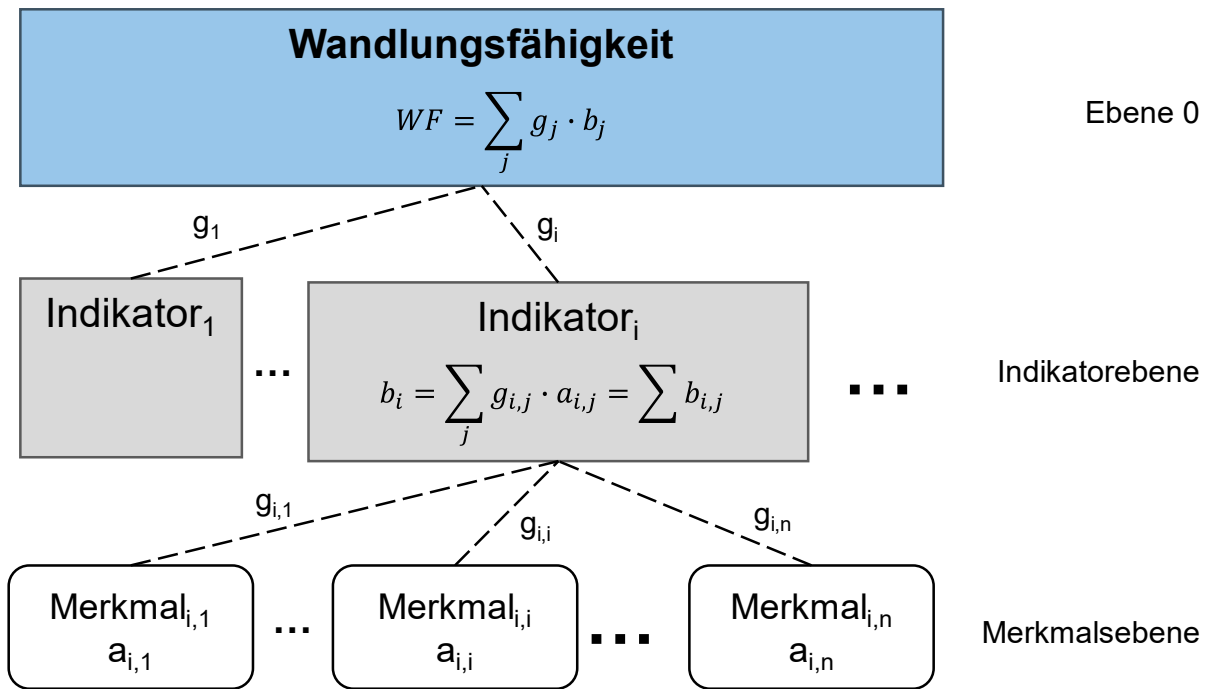


Abbildung 8-8: Indikatorsystem der Wandlungsfähigkeit in Anlehnung an [Ull-2018, S. 190]

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.



München, den 01.12.2023