

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1, TU Dortmund, Professur für Arbeits- und Produktionssysteme

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **17159 N / 1**

***Mathematische Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Optimierung der
produktionsbezogenen Materialversorgung***

(Bewilligungszeitraum: 01.08.2011 - 31.07.2013)

der AiF-Forschungsvereinigung

Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik (GVB) e.V.

Dortmund, 04.11.2013

Ort, Datum

Dipl.-Logist. Markus Droste

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

IGF-Forschungsvorhaben 17159 N

Forschungsthema

Mathematische Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Optimierung der produktionsbezogenen Materialversorgung (OptiMilk)

Durchführende Forschungsstelle

Forschungsstelle

Technische Universität Dortmund
Institut für Produktionssysteme
Professur für Arbeits- und Produktionssysteme
Leonhard-Euler-Straße 5
44227 Dortmund

Leiter der Forschungsstelle

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Projektleiter

Dipl.-Logist. Markus Droste

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17159 N der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V. - GVB, Wiesenweg 2, 93352 Rohr wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Buchbeiträge/Dissertationen/Internet

Droste, M.; Deuse, J.:

A Planning Approach for In-plant Milk Run Processes to Optimize Material Provision in Assembly Systems. In: EIMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011), Montreal, Canada, 3-5 October 2011. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, S. 605-610.

Droste, M.; Hasselmann, V.-R.; Deuse, J.:

Optimierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme. Entwicklung eines parameterbasierten Modells zur Optimierung der Materialbereitstellung. In: ProductivITy Management 17 (2012) 1, S. 25-28.

Vorträge

Droste, M.:

OptiMilk – Modellierung innerbetrieblicher Milkrun Systeme zur Optimierung der Materialversorgung. Vortrag auf dem ersten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) zum IGF-Forschungsvorhaben an der Technischen Universität Dortmund am 30.11.2011.

Deuse, J.; Droste, M.:

OptiMilk – Mathematische Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Optimierung der produktionsbezogenen Materialversorgung. Vortrag auf der Tagung der Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik (GVB) e.V. im Rahmen der Messe LogiMAT, Stuttgart, 13.03.2012.

Droste, M.:

Ein Planungswerkzeug zur Modellierung innerbetrieblicher Milkrun Systeme. Vortrag auf dem zweiten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) zum IGF-Forschungsvorhaben an der Technischen Universität Dortmund am 17.05.2013.

Posterausstellungen

Posterausstellung auf der Industrial Engineering-Fachtagung 2012 "Industrial Engineering - Kernkompetenz entwickeln und entfalten" an der Technischen Universität Dortmund am 20.06.2012.

Posterausstellung auf dem Symposium „Digitale Ergonomie - Trends und Strategien für den Einsatz digitaler Menschmodelle“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) in Dortmund am 20.11.2012.

Posterausstellung auf dem Kolloquium „Reinheitsgerechte Gestaltung des Wertstroms. Reinheit erhalten – Verschwendung vermeiden“ an der Technischen Universität Dortmund am 27.02.2013.

Posterausstellung auf dem Kolloquium „Data Mining. Potentiale und Anwendungsfelder entlang des Produktlebenszyklus“ an der Technischen Universität Dortmund am 13.03.2013.

Posterausstellung auf dem Forum Arbeit in Baden-Württemberg 2013 „Wettbewerbsfaktor Arbeitspolitik – Beschäftigung und Standort sichern“ in Ludwigsburg am 20.03.2013.

Danksagung

Besonderer Dank gilt den teilnehmenden Unternehmen und Verbänden des projektbegleitenden Ausschusses

ABB AG, Albrecht Jung GmbH & Co. KG, Becker Plastics GmbH, BJB GmbH & Co. KG, BLG Logistics Solutions GmbH & Co. KG, Böcker AG, Bosch Rexroth AG, Bosch Solarthermie GmbH, btv technologies gmbh, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, C.D. Wälzholz GmbH, Continental Automotive GmbH, ELMOS Central IT Services GmbH, ERCO GmbH, GC-heat Gebhard & Castiglia GmbH & Co. KG, Hella Corporate Center GmbH, Hella KGaA Hueck & Co., Huf Hülsbeck & Fürst GmbH & Co. KG, Huppertz Process Improvements GmbH, Infineon Technologies AG, Kennametal Widia GmbH & Co. KG, KHS GmbH, KODA Stanz- und Biegetechnik GmbH, KTR Kupplungstechnik GmbH, Leopold Kostal GmbH & Co. KG, Miele & Cie KG, Murtfeldt Kunststoffe GmbH & Co. KG, Parker Hannifin Manufacturing Germany GmbH & Co. KG, Paul Vahle GmbH & Co. KG, Pierburg GmbH, Ritter Elektronik GmbH, Rölfs RP Management Consultants GmbH, Ruthenberg GmbH, Siemens AG, ThyssenKrupp Bilstein Tuning GmbH, VULKAN Kupplungs- und Getriebebau B. Hackforth GmbH & Co. KG, WILO SE, Zapp AG

sowie den Teilnehmern der Kolloquien am 30.11.2011

Herr El-Ghazali	ABB AG
Herr Lamche	ABB AG
Frau Loser	Becker Plastics GmbH
Herr te Kaat	Böcker AG
Frau Hengst	Bosch Rexroth AG
Frau Rattmann	Bosch Rexroth AG
Frau Schulte	Bosch Rexroth AG
Herr Achenbach	btv technologies gmbh
Herr Adrian	btv technologies gmbh
Herr Mühlhöfer	btv technologies gmbh
Herr Dr. Wischniewski	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Frau Schwarz	C.D. Wälzholz GmbH
Herr Kluge	Continental Automotive GmbH
Herr Ostrowski	Continental Automotive GmbH
Herr Wiegert	Continental Automotive GmbH
Herr Müller	ELMOS Central IT Services GmbH
Frau Buschmann	ERCO GmbH
Herr Löw	ERCO GmbH
Herr Deffert	GC-heat Gebhard & Castiglia GmbH & Co. KG
Herr Pies	GC-heat Gebhard & Castiglia GmbH & Co. KG
Herr Siegbert	Hella Corporate Center GmbH
Herr Engelhard	Hella KGaA Hueck & Co.

Frau Dr. Huppertz	Huppertz Process Improvements GmbH
Frau Radine	Infineon Technologies AG
Herr Schellewald	Infineon Technologies AG
Herr Hetterscheid	Kennametal Widia GmbH & Co. KG
Herr Amende	KHS GmbH
Herr Nölle	KHS GmbH
Herr Hommen	KODA Stanz- und Biegetechnik GmbH
Herr Pyttlik	KODA Stanz- und Biegetechnik GmbH
Herr Volmer	KTR Kupplungstechnik GmbH
Herr Grande	Leopold Kostal GmbH & Co. KG
Herr Dr. Belener	Miele & Cie KG
Frau Pollert	Miele & Cie KG
Herr Balla	Murtfeldt Kunststoffe GmbH & Co. KG
Herr Dehnert	Murtfeldt Kunststoffe GmbH & Co. KG
Herr Dickmann	Paul Vahle GmbH & Co. KG
Herr Hauptreif	Paul Vahle GmbH & Co. KG
Herr Böing	Pierburg GmbH
Herr Jakobi	Pierburg GmbH
Herr Schmidt	Ritter Elektronik GmbH
Herr Müller	Siemens AG Energy Sector
Herr Dr. Riha	Siemens AG Energy Sector
Herr Günther	ThyssenKrupp Bilstein Tuning GmbH
Herr Theben	VULKAN Kupplungs- und Getriebebau B. Hackforth GmbH & Co. KG
Herr Wallny	VULKAN Kupplungs- und Getriebebau B. Hackforth GmbH & Co. KG
Herr Waltenberg	VULKAN Kupplungs- und Getriebebau B. Hackforth GmbH & Co. KG
Herr Föcking	WILO SE
Herr Meier	WILO SE
Herr Stukenkemper	WILO SE
Herr Winkelhage	WILO SE

und am 17.05.2013:

Herr Heidel	ABB AG
Herr Jöbgen	ABB AG
Herr Kolberg	Albrecht Jung GmbH & Co. KG
Herr Ueding	BJB GmbH & Co. KG
Herr Bolte	BLG Logistics Solutions GmbH & Co. KG
Herr Flüthmann	Bosch Solarthermie GmbH
Herr Achenbach	btv technologies gmbh

Herr Blacha	Continental Automotive GmbH
Frau Siekiera	Continental Automotive GmbH
Herr Riße	Hella Corporate Center GmbH
Frau Terhoeven	Hella KGaA Hueck & Co.
Herr Behrendt	Huf Hülsbeck & Fürst GmbH & Co. KG
Herr Sindt	Huf Hülsbeck & Fürst GmbH & Co. KG
Herr Vanmullem	Infineon Technologies AG
Herr Wendel	Leopold Kostal GmbH & Co. KG
Herr Grothues	Miele & Cie. KG
Herr Maksimov	Parker Hannifin Manufacturing Germany GmbH & Co. KG
Herr Marszalek	Parker Hannifin Manufacturing Germany GmbH & Co. KG
Herr Badermann	Rölfs RP Management Consultants GmbH
Herr Dr. Ruthenberg	Ruthenberg GmbH
Herr Föcking	WILO SE
Herr Hank	WILO SE
Herr Meier	WILO SE
Herr Sträter	WILO SE
Herr Dr. Stausberg	Zapp AG

Darüber hinaus sei allen Unternehmen, die im Rahmen von Expertengesprächen, Interviews oder Umfragen zum Projektfortschritt beigetragen haben, für ihre Kooperation gedankt.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XI
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Vorgehensweise.....	2
2 Grundlagen der Materialbereitstellung und innerbetrieblicher Milkrun-Systeme	4
2.1 Einordnung der Materialbereitstellung in den logistischen Kontext.....	4
2.2 Ziele und Aufgaben der Materialbereitstellung.....	5
2.3 Organisationsprinzipien der Materialbereitstellung	7
2.4 Strategien der Materialbereitstellung	10
2.4.1 Bedarfsorientierte Strategien.....	10
2.4.2 Verbrauchsorientierte Strategien.....	12
2.5 Aktuelle Trends und Anforderungen an die Materialbereitstellung.....	14
2.6 Innerbetriebliche Milkrun-Systeme.....	17
2.7 Grundlegende Prozessschritte eines innerbetrieblichen Milkrun-Systems	19
2.7.1 Kommissionierung	20
2.7.2 Transport	21
2.7.3 Abgabe	21
3 Morphologie innerbetrieblicher Milkrun-Systeme.....	22
3.1 Gestaltungsfeld Bereitstellungselement	23
3.2 Gestaltungsfeld Ladungsträger	24
3.3 Gestaltungsfeld Steuerung.....	25
3.4 Gestaltungsfeld Kommissionierung	27
3.5 Gestaltungsfeld Transport	29
3.6 Gestaltungsfeld Abgabe	31
3.7 Morphologie innerbetrieblicher Milkrun-Systeme.....	32
4 Herleitung eines Planungskonzepts für innerbetriebliche Milkrun-Systeme	34
4.1 Untersuchung der Eignung bestehender Planungsansätze	34
4.1.1 Allgemeine Vorgehensmodelle.....	34
4.1.2 Mathematische Entscheidungsmodelle	35
4.2 Anforderungen an ein Planungsmodell	37
4.3 Herleitung der Zielgröße für die Planung.....	39
4.4 Herleitung der zu berücksichtigenden Planungsdimensionen.....	42
4.4.1 Planungsdimension Zeit.....	43

4.4.2	Planungsdimension Kapazität	44
4.4.3	Planungsdimension Ergonomie.....	46
4.5	Verfahren zur Abbildung der Planungsdimensionen	48
4.5.1	Verfahren zur Zeitermittlung	48
4.5.2	Verfahren zur Bewertung der Transportkapazität.....	53
4.5.3	Verfahren zur Belastungsbeurteilung bei manuellen Lastenhandhabungen	56
4.6	Zusammenführung der Elemente in ein Planungskonzept.....	59
5	Entwicklung eines mathematischen Planungsmodells.....	61
5.1	Material- und bereitstellungsspezifische Parameter.....	62
5.2	Ermittlung von Ladungsträgerverbrauch und -gewicht.....	66
5.3	Modellierung der Planungsdimension Zeit	67
5.3.1	Handhabungszeit.....	68
5.3.2	Informationsverarbeitungszeit	76
5.3.3	Transportzeit	78
5.4	Modellierung der Planungsdimension Kapazität	79
5.4.1	Ermittlung des Kapazitätsbedarfs der Ladungsträger	79
5.4.2	Formulierung des zweidimensionalen Bin Packing Problems.....	80
5.5	Modellierung der Planungsdimension Ergonomie	82
5.5.1	Lastwichtung.....	84
5.5.2	Haltungs- und Ausführungsbedingungswichtung.....	86
5.5.3	Positioniergenauigkeits- und Bewegungsgeschwindigkeitwichtung	88
5.5.4	Zeitwichtung	88
5.6	Zusammenführung in ein Gesamtmodell	89
5.7	Modellüberführung in ein softwarebasiertes Planungshilfsmittel.....	92
6	Validierung des erarbeiteten Planungshilfsmittels	97
6.1	Charakterisierung des Untersuchungsbereichs.....	97
6.1.1	Produktspektrum	97
6.1.2	Materialbereitstellung	98
6.2	Vorgehensweise der Untersuchung	99
6.2.1	Grobanalyse der Materialstruktur und Ziele der Untersuchung.....	99
6.2.2	Eingrenzung des zu betrachtenden Materialspektrums.....	100
6.2.3	Szenariengenerierung.....	101
6.3	Ergebnisdarstellung	103
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	107
	Literaturverzeichnis.....	XIV
	Anhang.....	XXX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 2: Einordnung der Materialbereitstellung in den innerbetrieblichen Materialfluss	6
Abbildung 3: Bedarfssteuerung	8
Abbildung 4: Verbrauchssteuerung	8
Abbildung 5: Typologie gängiger Materialbereitstellungsstrategien.....	10
Abbildung 6: Schematische Darstellung eines innerbetrieblichen Milkrun-Systems.....	18
Abbildung 7: Grundlegende Prozessschritte eines Bereitstellungszyklus	19
Abbildung 8: Gestaltungsfelder eines Milkrun-Systems	22
Abbildung 9: Beispiele für KLT (VDA-KLT, links) und GLT (Gitterboxpalette, rechts).....	24
Abbildung 10: Schleppzug (links) und Niederhubwagen mit Fahrerstand (rechts).....	30
Abbildung 11: Herleitung der Planungszielgröße des Milkrun-Systems.....	40
Abbildung 12: Idealisierter Bestandsverlauf an einer Arbeitsstation	41
Abbildung 13: Systemtheoretische Sicht der Planungsdimensionen als Systemaspekte.....	42
Abbildung 14: Zeitbegriffe im Kontext innerbetrieblicher Milkrun-Systeme.....	43
Abbildung 15: Kapazitätsbedarf und -angebot des Transportmittels.....	45
Abbildung 16: Auftretende körperliche Belastung und erlaubter Richtwert	47
Abbildung 17: Mitarbeiterbezogene Zeitbegriffe und ihre Beziehung zueinander	49
Abbildung 18: Verfahren zur Ermittlung von Zeitdaten.....	50
Abbildung 19: Entwicklung von MTM-Datensystemen durch Datenverdichtung.....	52
Abbildung 20: Grundlegende Problemtypen von Zuschnitt- und Packproblemen.....	54
Abbildung 21: Interpolierte Zeitwichtung der Handhabungsart Umsetzen	58
Abbildung 22: Berechnung der Anzahläquivalente für relevante Handhabungsarten.....	58
Abbildung 23: Schematische Modellhierarchie zur Planung von Milkrun-Systemen.....	60
Abbildung 24: Grundlegende Struktur des Planungsmodells	61
Abbildung 25: Erforderliche materialspezifische Parameter	62
Abbildung 26: Erforderliche bereitstellungsspezifische Parameter.....	65
Abbildung 27: Bestimmung der Wege d_B und d_{SW} für die Kommissionierung	69
Abbildung 28: Möglichkeit zur Ermittlung des Wegs $d_{KOM,i}$ für die Kommissionierung.....	70

Abbildung 29: Bestimmung der prozentualen Anteile für Beugen und Betreten der Palette	71
Abbildung 30: Wege beim Tausch der Ladungsträger an den Arbeitsstationen.....	73
Abbildung 31: Betriebskennlinien für ein Milkrun-System	91
Abbildung 32: Struktur des Microsoft Excel-basierten Planungshilfsmittels.....	93
Abbildung 33: Ergebnismaske mit graphischer Auswertung der Planungsdimensionen	96
Abbildung 34: Graphische Darstellung des Betriebsbereichs.....	96
Abbildung 35: Produktspektrum des Untersuchungsbereichs	97
Abbildung 36: Schleppzug (links) und Supermarkt (rechts) des betrachteten Bereichs.....	98
Abbildung 37: Bestehende Ladungsträgerstruktur mit Modulmaßen und Lastgewichten	100
Abbildung 38: ABC-Verteilung der Produktgruppen nach jeweiliger Jahresproduktionsmenge....	101
Abbildung 39: Betriebsbereiche der Szenarien mit resultierendem Gesamtbetriebsbereich	104
Abbildung 40: Auszug aus dem Ergebnisblatt mit Betriebsbereich für Auftragskombination 6	105
Abbildung 41: Ladungsträgerstruktur mit reduzierten Modulmaßen und Lastgewichten	106
Abbildung 42: Ausgeprägte Morphologie zur Eingrenzung des Betrachtungsgegenstands.....	XXX
Abbildung 43: Mittelwert- und Worst Case-Betrachtung im Vergleich.....	XXXI
Abbildung 44: Determinierte Prozessfolge durch Art der Entnahme	XXXI
Abbildung 45: Datenkarte der MTM UAS-Grundvorgänge.....	XXXII
Abbildung 46: Datenkarte der MTM Standardvorgänge Logistik.....	XXXIII
Abbildung 47: Groblayout des betrachteten Untersuchungsbereichs	XXXIV
Abbildung 48: Tabellenblatt Ergebnis der Auftragskombination 6.....	XXXV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Morphologie der Materialbereitstellungsprinzipien	7
Tabelle 2: Gestaltungsfeld Bereitstellungselement	23
Tabelle 3: Gestaltungsfeld Ladungsträger	24
Tabelle 4: Gestaltungsfeld Steuerung	25
Tabelle 5: Gestaltungsfeld Kommissionierung	27
Tabelle 6: Gestaltungsfeld Transport	29
Tabelle 7: Gestaltungsfeld Abgabe	31
Tabelle 8: Morphologie innerbetrieblicher Milkrun-Systeme	33
Tabelle 9: Auszug aus den Datenkarten für MTM UAS (links) und SVL (rechts)	53
Tabelle 10: MTM-Zeitbaustein IVKK zur Abbildung von Karten-Kanban	76
Tabelle 11: MTM-Zeitbausteine IVES und IVEK zur Abbildung von eKanban	77
Tabelle 12: Ausprägung des Beugeanteils je Lastenhandhabungsfall von KLT	86
Tabelle 13: Ausführungsbedingungsrichtung je Lastenhandhabungsfall von KLT	87
Tabelle 14: Handlungsempfehlungen und Konsequenzen bei Restriktionsverletzungen	92
Tabelle 15: Eingabemaske zur Erfassung der materialspezifischen Parameter	94
Tabelle 16: Eingabemaske zur Erfassung der bereitstellungsspezifischen Parameter	95
Tabelle 17: Mögliche Auftragskombinationen bei gegebener Variantenstruktur	102
Tabelle 18: Ausprägung bereitstellungsspezifischer Parameter des Untersuchungsbereichs	103

Abkürzungsverzeichnis

AF	Additional Flow
AKL	Automatisches Kleinteilelager
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BetrVG	Betriebsverfassungsgesetz
BF	Base Flow
BPP	Bin Packing Problem
C&P	Cutting and Packing
CCG	Centrale für Coorganisation GmbH
DIN	Deutsches Institut für Normung
FIFO	First In First Out
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GLT	Großladungsträger
HHT	Heben, Halten, Tragen
HRL	Hochregallager
KLT	Kleinladungsträger
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LasthandhabV	Lastenhandhabungsverordnung
LMM	Leitmerkmalmethode
LT	Ladungsträger
MEK	MTM in der Einzel- und Kleinserienfertigung
MLT	Multiple-Lasten-Tool
MRP	Material Requirements Planning
MTM	Methods-Time Measurement
NP	Nicht-deterministisch polynomiell
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (ehem. Reichsausschuß für Arbeitsstudien)

SBSBPP	Single Bin Size Bin Packing Problem
SD	Standard-Daten
SVL	Standardvorgänge Logistik
SvZ	Systeme vorbestimmter Zeiten
TMU	Time Measurement Unit
UAS	Universelles Analysier System
VBA	Visual Basic for Applications
VDA	Verband der Automobilindustrie
WIP	Work in Progress
ZS	Ziehen, Schieben

1 Einleitung

Infolge steigender Variantenvielfalt und verkürzter Produktlebenszyklen streben produzierende Unternehmen fortwährend nach Rationalisierungen in ihren Produktions- und Logistiksystemen (Arndt 2010, S. 42f.; Schuh 2006, S. 1). Kern der Bemühungen um eine effiziente Prozessgestaltung bildet häufig die Montage, da sie aufgrund der hohen manuellen Tätigkeiten und großen Verantwortung für Produktqualität, Herstellkosten und Liefertreue das größte Verbesserungspotenzial verspricht (Lotter 2012b, S. 4). Der Wunsch nach sich stetig verbessernden Arbeitssystemen mit einem hohen Grad an Varianten- und Stückzahlflexibilität, Standardisierung und Transparenz im Sinne eines schlanken Produktionssystems stellt jedoch hohe Anforderungen an die Prozessqualität und Effizienz der innerbetrieblichen Materialbereitstellung (Dombrowski, Hennersdorf, Palluck 2006, S. 159f.).

Die Materialbereitstellung erstreckt sich über alle Fertigungs- und Montagesysteme. Aufgrund der Kundennähe der Montage im Auftragsabwicklungsprozess muss das Material hier mit einer hohen Zuverlässigkeit bereitgestellt werden (Wiendahl, Thies, Krüger 1997, S. 628). Fehler oder Verzögerungen wirken sich in der Regel direkt auf die Befriedigung des Kundenwunsches aus. Zudem ist das Montagematerial im Gegensatz zum Ausgangsmaterial in der Fertigung funktionsfähig und damit meist empfindlich (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 286). Diese Anforderungen machen die Materialbereitstellung in der Montage daher zu einem Bereich mit höchsten ablauforganisatorischen und planerischen Anforderungen (Bullinger, Lung 1994, S. 2).

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Aufgrund der Charakteristika konventioneller Materialbereitstellungsprozesse werden insbesondere bei Automobilherstellern und großen Zulieferern zunehmend Konzepte unter den Gesichtspunkten einer schlanken Prozessgestaltung umgesetzt (Klug 2008, S. 56f.). Hier haben sich innerbetriebliche Milkrun-Systeme für die Serienfertigung etabliert. Ein Milkrun ist ein zyklisches Bereitstellungs-konzept, bei dem das Material verbrauchs-basiert auf festen Routen und in definierten kurzen Zyklen transportiert und gehandhabt wird (Baudin 2004, S. 68). Außerhalb der Automobilindustrie wird dieses Konzept jedoch nur vereinzelt umgesetzt (Droste, Deuse 2011, S. 605). Gründe hierfür liegen vor allem in der gegenüber herkömmlichen Materialbereitstellungskonzepten aufwändigen Planung und Auslegung solcher Systeme. Die Komplexität in der Planung ergibt sich vor allem durch die mitunter interdependenten Einflussgrößen, welche für einen effizienten Prozessablauf optimal aufeinander abgestimmt werden müssen (Günthner 2012, S. 35f.).

Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) verfügen nicht über das spezifische Fachwissen und die erforderlichen Ressourcen zur Planung von Milkrun-Systemen. Vor dem Hintergrund verkürzter Planungszyklen durch die stetige Einführung neuer Produkte oder Varianten ergibt sich zudem ein kontinuierlicher Anpassungsaufwand aller Prozesse, dem nur mit hohem Ressourcenaufwand begegnet werden kann (ElMaraghy, Wiendahl 2009, S. 6). Trotz des Bedarfs der Industrie fehlen in intra- und produktionslogistischen Standardwerken Ansätze für eine systematische

Einordnung und Planung solcher Systeme (Baudin 2004, S. 34), so dass industrielle Anwender zumeist von Praxislösungen lernen müssen, um diese im eigenen Unternehmen umsetzen zu können.

1.2 Zielsetzung

Ausgehend von diesem Forschungsbedarf war es das Ziel des Forschungsprojekts OptiMilk, basierend auf grundlegenden Gestaltungsalternativen von Milkrun-Systemen ein KMU-taugliches, analytisches Planungsmodell zu entwickeln. In diesem Modell fließen zu parametrierende Einflussgrößen der Materialbereitstellung und des Montagesystems als Randbedingungen ein, so dass eine optimale Taktzeit und ein möglicher Betriebsbereich für Milkrun-Systeme abgeleitet werden können. Die ermittelten Ergebnisse unterstützen Planer bei der Auslegung solcher Materialbereitstellungskonzepte ohne spezifisches Industrial Engineering-Wissen, wie Zeitermittlungsmethoden oder Verfahren zur Belastungsermittlung im Detail anwenden zu können.

Eine Parametrierung erfolgt, da viele Einflussgrößen auf die Materialbereitstellung, wie z. B. Eigenschaften des Materials, Taktzeiten des zu versorgenden Montagesystems oder Distanzen in den Hallen, je nach betrachtetem Unternehmen unterschiedlich ausfallen. Somit wird gewährleistet, dass eine allgemeingültige Planungsstruktur entwickelt werden kann, die in der Anwendung durch eine Parameterausprägung individualisiert wird.

Im Rahmen der Konzeptionierung sind zudem betriebliche oder systemimmanente Restriktionen zu ermitteln, welche die Zielgröße der optimalen Taktzeit beeinflussen. Schlussendlich ist es erforderlich, das erarbeitete Planungsmodell in Form eines handhabbaren Planungshilfsmittels umzusetzen. So kann die praxisgerechte Anwendung des Modells gewährleistet werden, um Montage- oder Logistikplaner bei der Grobplanung der innerbetrieblichen Materialbereitstellung mittels Milkrun zu unterstützen.

1.3 Vorgehensweise

Zur Umsetzung der beschriebenen Zielsetzung gliedert sich der vorliegende Schlussbericht in sieben Kapitel. Im Anschluss an dieses einführende Kapitel folgen die theoretischen Grundlagen zur Materialbereitstellung und zu innerbetrieblichen Milkrun-Systemen. Hier werden die begrifflichen und inhaltlichen Rahmenbedingungen des Betrachtungsgegenstands festgesetzt und die grundlegenden Prozessschritte eines solchen Systems aufgezeigt.

In Kapitel 3 werden organisatorisch-technische Gestaltungsfelder von innerbetrieblichen Milkrun-Systemen dargestellt. Aufbauend auf den im vorherigen Kapitel beschriebenen Grundlagen ergeben sich die Gestaltungsfelder Bereitstellungselement, Ladungsträger, Steuerung, Kommissionierung, Transport und Abgabe, welche in Form einer Morphologie näher ausgeprägt werden.

In Kapitel 4 wird ein neues Planungskonzept für innerbetriebliche Milkrun-Systeme vorgestellt. In dessen Rahmen werden die Planungszielgröße und einzelnen Planungsdimensionen als einschränkende Faktoren der Planung hergeleitet. Die zur quantitativen Operationalisierung der Planungsdi-

mensionen erforderlichen methodischen Grundlagen werden im Anschluss beschrieben und geeignete Verfahren für den vorliegenden Anwendungsfall ausgewählt. Das Kapitel schließt mit der qualitativen Darstellung von Einflussgrößen auf den Planungsprozess von Milkrun-Systemen.

Aufbauend hierauf erfolgt in Kapitel 5 die detaillierte Ausgestaltung des Gesamtkonzepts in Form eines mathematischen, parameterbasierten Planungsmodells. Hier werden konkrete Einflussgrößen erarbeitet, welche anschließend im Rahmen mathematischer Formulierungen die einzelnen Planungsdimensionen parametrieren. Die Zusammenfassung der einzelnen Berechnungsschritte erfolgt anschließend in einem Gesamtmodell, welches sodann in ein softwarebasiertes Planungshilfsmittel überführt wird.

Im Rahmen des Kapitels 6 erfolgt die industrielle Validierung anhand eines Fallbeispiels in der Endmontage eines Unternehmens der Elektro-Installationstechnik und Gebäude-Systemtechnik.

Der Bericht schließt mit dem Kapitel 7, in welchem eine Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse erfolgt und ein Ausblick auf weiterführende, zukünftige Forschungsarbeiten gegeben wird.

2 Grundlagen der Materialbereitstellung und innerbetrieblicher Milkrun-Systeme

In diesem Kapitel werden zunächst die für die Thematik relevante Einordnung der Materialbereitstellung sowie ihre Ziele und Aufgaben beschrieben. Eine Darstellung aktueller Trends und Anforderungen an die Materialbereitstellung leiten die anschließende eingehende Darstellung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme als ein spezifisches Materialbereitstellungskonzept ein. Hierzu wird zunächst das im Rahmen der Projekts zu Grunde gelegte Begriffsverständnis diskutiert. Anschließend folgt die Charakterisierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme aus theoretischer und empirischer Sicht. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion der Verfahren zur Planung von Milkrun-Systemen und stellt den Handlungsbedarf für die nachfolgenden Kapitel heraus.

2.1 Einordnung der Materialbereitstellung in den logistischen Kontext

Zum Verständnis der nachfolgenden Ausführungen ist es erforderlich, die grundlegenden Begriffe im Kontext der Materialbereitstellung zu bestimmen und ihre Einordnung in den fachlichen Zusammenhang darzulegen.

Logistik ist allgemein nach Jünemann (1989, S. 11) die wissenschaftliche Lehre der Planung, Steuerung und Kontrolle der Material-, Personen-, Energie- und Informationsflüsse in Systemen. Somit kann unter ihr die Gesamtheit aller Tätigkeiten verstanden werden, die auf eine bedarfsgerechte Verfügbarkeit von Objekten, Personen, Sachgütern, Dienstleistungen, Informationen und Energie ausgerichtet ist (Isermann 1998, S. 21). Wird unter einem System ein Unternehmen verstanden, lässt sich die Definition gleichermaßen als Anwendung der logistischen Lehre auf Unternehmen beschreiben. Demnach fokussiert die Unternehmenslogistik auf ein optimales Zusammenspiel von Mensch, Technik, Steuerung und Information, um den Material-, Waren-, Produktions- und Informationsfluss zu planen, zu gestalten, zu steuern und zu kontrollieren (Martin 2009, S. 3).

Gemäß den verschiedenen Phasen eines Güterflusses lässt sich die Unternehmenslogistik in die drei Subsysteme Beschaffungslogistik, Produktionslogistik und Distributionslogistik gliedern (vgl. Pfohl 2010, S. 16f.; Rupper 1991, S. 11ff.). Ihnen gleich ist u. a. die zielgerichtete Überbrückung von Raum- und Zeitdisparitäten aufgrund entkoppelter Prozesse ohne eine Veränderung der physischen Eigenschaften des Gutes (Wildemann 2009, S. 4).

Die Produktionslogistik verantwortet die Planung, Gestaltung, Steuerung und Überwachung des Materialflusses und dazugehörigen Informationsflusses vom Beschaffungslager über alle Stufen des Fertigungs- und Montageprozesses bis hin zum Fertigwarenlager (Martin 2009, S. 6; Pawellek 2007, S. 14). Sie stellt neben der eigentlichen Produktion eine Kernfunktion produzierender Unternehmen dar (Schenk, Wirth 2004, S. 59).

Im Rahmen der Produktionslogistik spielt der innerbetriebliche Materialfluss eine entscheidende Rolle. Materialfluss ist nach DIN 30781-1 (1989, S. 2) als Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche

definiert. Materialflussoperationen verändern den Systemzustand von Gütern hinsichtlich Zeit, Ort, Menge, Zusammensetzung und Qualität (Jünemann, Schmidt 2000, S. 2f.) Nach Bullinger und Lung (1994, S. 5ff.) lässt sich der Materialfluss in vier Stufen untergliedern:

- Der Materialfluss erster Ordnung ist durch Transporte zwischen dem Unternehmen und seinen Lieferanten oder Abnehmern gekennzeichnet. Diese Stufe des Materialflusses ist somit Teil der Marketing-Logistik.
- Der Materialfluss zweiter Ordnung zeichnet sich durch Transporte innerhalb eines Werks zwischen einzelnen Betriebsbereichen, wie z. B. Fertigung, Zwischenlager oder Montage, aus.
- Der Materialfluss dritter Ordnung umfasst Transporte zwischen den Abteilungen einzelner Betriebsbereiche, wie z. B. Maschinengruppen, oder einzelnen Einrichtungen innerhalb der Abteilungen, wie z. B. Montagearbeitsplätzen.
- Der Materialfluss vierter Ordnung beinhaltet arbeitsplatzbezogene Transporte, wie z. B. die Versorgung des Arbeitsplatzes mit Material und dessen Handhabung am Arbeitsplatz.

Der Materialfluss zweiter bis vierter Ordnung findet ausschließlich in Unternehmen statt und wird damit der Produktionslogistik zugeordnet, so dass dieser als innerbetrieblicher Materialfluss bezeichnet wird (Bullinger, Lung 1994, S. 6). Zu ihm zählen der innerbetriebliche Transport und die Zwischenlagerung von Fertigungsmaterial, Teilen oder Baugruppen (Ihde 1978, S. 2; Pawellek 2007, S. 14).

Eine wichtige Aufgabe des innerbetrieblichen Materialflusses ist die Versorgung der Montage mit dem für die Leistungserstellung erforderlichen Material (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 286ff.). Aus diesem Grunde wird die Materialbereitstellung mit ihren Zielen und Aufgaben im nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben.

2.2 Ziele und Aufgaben der Materialbereitstellung

Ziel der montagebezogenen Materialbereitstellung ist es nach dem Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung (REFA), „das im Betrieb verfügbare Material für die Verwendung bei der Aufgabendurchführung in der benötigten Art und Menge termingerecht am Bereitstellungsplatz zur Verfügung zu stellen“ (REFA 1991b, S. 172). Hierzu übernimmt die Materialbereitstellung folgende drei Aufgaben:

- In der Planung werden die Bereitstellprinzipien und -strategien festgelegt, wodurch sich die organisatorischen Abläufe ergeben. Es werden Kompetenzen und Verantwortungsbereiche zugewiesen und die Bereitstell- und Informationstechniken ausgewählt.
- Durch die Steuerung wird die Durchführung der Materialbereitstellung veranlasst, überwacht und sichergestellt.
- Die Durchführung umfasst die physischen Vorgänge, die die Materialbereitstellung erfordert, wie z. B. Lagern, Kommissionieren oder Transportieren des Materials (vgl. Nickel 2008, S. 52).

Die Materialbereitstellung erstreckt sich von einem Zentrallager, welches die Schnittstelle zur Beschaffungslogistik darstellt, bis hin zum Arbeitsplatz, der die Schnittstelle zum Montagesystem definiert. Sie stellt somit einen Teilprozess des innerbetrieblichen Materialflusses dar (vgl. Abbildung 1).

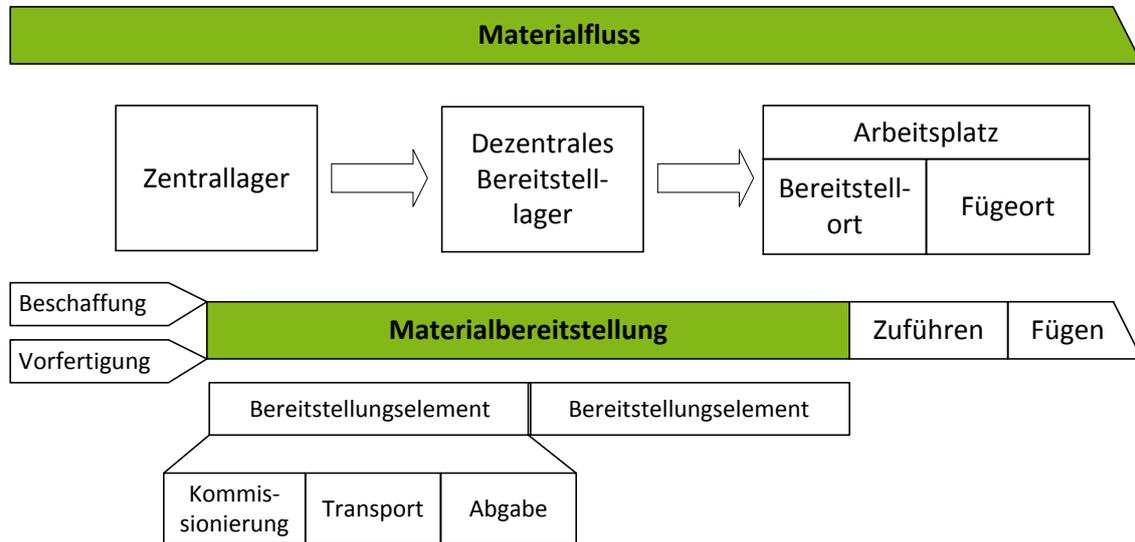


Abbildung 1: Einordnung der Materialbereitstellung in den innerbetrieblichen Materialfluss
(in Anlehnung an Wiendahl, Thies, Krüger 1997, S. 629)

Materialbereitstellungsprozesse sind in der Regel mehrstufig organisiert und bestehen aus aufeinander folgenden Bereitstellungselementen zwischen einzelnen Lagerstufen. Hierbei werden Lieferpunkte, an denen Güter bereitgestellt werden, als Quellen und Empfangspunkte, an denen Güter verwendet werden, als Senken bezeichnet (Pfohl 2010, S. 5). Zwar sollte der mehrfache Umschlag des Materials über mehrere Quellen und Senken möglichst vermieden werden, da er einen erheblichen Teil der Logistikkosten in der Produktionslogistik verursacht (Aggteleky 1990, S. 536; Pfohl 2004, S. 113ff.), so ist dies aufgrund der häufig nicht montagegerechten Anlieferzustände des Materials nicht immer möglich. Die Lagerstufen, wie z. B. ein dezentrales Bereitstelllager, erfüllen die Aufgaben der Bevorratung, Sortierung, Pufferung und Verteilung von Material. Sie können als einfaches Materialpufferlager, das ausschließlich zum Umpacken oder Vereinzeln dient, oder auch in Form eines Kommissionierlagers organisiert sein, welches das erforderliche Material im Vorfeld montagegerecht zusammenstellt (Heinz, Grünz, Mayer 2003, S. 9). Ist in einem solchen dezentralen Pufferlager der Bestand über feste Minimal- und Maximalwerte gesteuert, wird dieses häufig als Supermarkt bezeichnet (Erlach 2010, S. 190f.; Wannewetsch 2010, S. 593). Das letzte Element in dieser logistischen Kette endet stets an einem definierten Bereitstellort am Arbeitsplatz. Ihm angeschlossen ist das Zuführen, welches die Strecke bis zur Fügeposition überbrückt (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 288).

2.3 Organisationsprinzipien der Materialbereitstellung

Zur detaillierten Beschreibung der Materialbereitstellung können eine Vielzahl von Merkmalen zu Grunde gelegt werden, die im Folgenden als Organisationsprinzipien bezeichnet werden. Hierbei lassen sich die Merkmale Art der Bereitstellung, Form der Bereitstellung, Bereitstellmenge, Bereitstellquelle, Bereitstellsenke, Auslösung der Bereitstellung und Durchführung der Bereitstellung unterscheiden (Bullinger, Lung 1994, S. 15ff.). Sie sind mit ihren zugehörigen Ausprägungen in Tabelle 1 dargestellt.

Merkmal	Ausprägung				
Art der Bereitstellung	Nach Bedarf			Nach Verbrauch	
Form der Bereitstellung	Zusammengefasste Aufträge	Gesamtauftrag (Losgröße > 1)	Teilauftrag	Einzelprodukt (Losgröße = 1)	Einzelteile Baugruppen
Bereitstellmenge	Stückzahlgenau			Gebindeorientiert	
Bereitstellquelle	In Arbeitsplatznähe	Im Arbeitssystem (Zwischenlager)	Im arbeitssystem-neutralen Lager	Sonstige vorgelagerte Bereiche	
Bereitstellsenke	Am Arbeitsplatz		In Arbeitsplatznähe	Im Arbeitssystem	
Auslösung der Bereitstellung	Bring-Prinzip				Hol-Prinzip
	Zentral, Übergeordnetes System	Dezentral, vorgelagertes System	Dezentral, Bereitstellmitarbeiter	Montagemitarbeiter	
Durchführung der Bereitstellung	Bring-Prinzip				Hol-Prinzip
	Externer Lieferant	Dezentral, vorgelagertes System	Dezentral, Bereitstellmitarbeiter	Montagemitarbeiter	

*Tabelle 1: Morphologie der Materialbereitstellungsprinzipien
(in Anlehnung an Bullinger, Lung 1994, S. 17)*

Die aufgeführten Merkmale und ihre Ausprägungen stellen einen grundlegenden Teil der Materialbereitstellungsstrategie dar und werden daher im Folgenden diskutiert.

Die Art der Bereitstellung beschreibt die Steuerung des Materialflusses. Diese kann in eine bedarfs- und verbrauchsgesteuerte Zuführung des Materials differenziert werden. Die genannten Prinzipien der Steuerung unterscheiden sich in der Auslösung des Materialflusses zur Materialbereitstellung (Pfohl 2010, S. 189).

Der bedarfsorientierte Materialabruf entspricht dem Push-Prinzip (vgl. Abbildung 2). Dabei wird auf Basis des Produktionsprogramms auftragsbezogen das Material in die logistische Kette „geschoben“ (Yagyu 2007, S. 73ff.). Als Auslöser der Materialbereitstellung fungiert bei diesen Strategien eine zentrale Fertigungssteuerung, die für jede Stufe der Montage festlegt, welches Material in welcher Menge zu welchem Zeitpunkt an welchem Ort zur Verfügung gestellt werden muss (Bullinger, Lung 1994, S. 15). Wurde demnach die Materialbereitstellung durch die Fertigungssteuerung angestoßen, werden die benötigten Materialien dem Montagesystem zur Verfügung gestellt. Im System befindet sich immer nur das Material, das für den eingesteuerten Auftrag benötigt wird,

was einer Verwechslungsgefahr entgegenwirkt. Nachteilig ist die Gefahr des „blinden Nachschiebens“ der Aufträge ohne Berücksichtigung der aktuellen Auslastung des Systems.

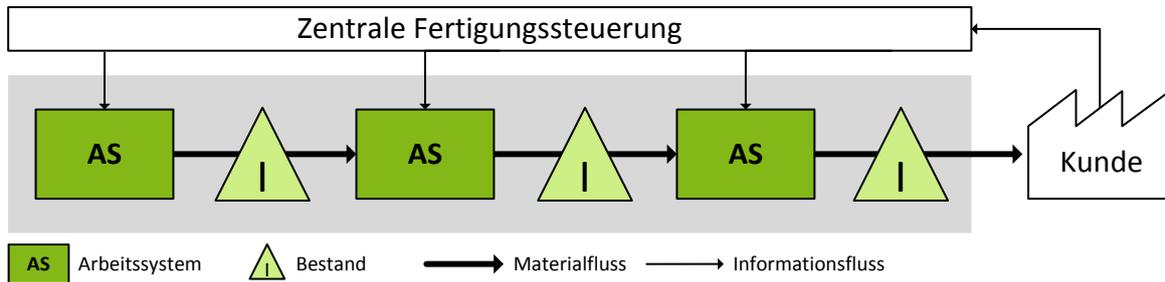


Abbildung 2: Bedarfssteuerung (in Anlehnung an Bullinger, Lung 1994, S. 15)

Dem gegenübergestellt ist die verbrauchsorientierte Materialbereitstellung (vgl. Abbildung 3). Sie entspricht dem Pull-Prinzip, da die Auslösung der Materialbereitstellung nicht durch eine zentrale Steuerungsinstanz, sondern durch den tatsächlichen Verbrauch des Materialabnehmers bestimmt ist (Yagyu 2007, S. 73). Bei diesem Prinzip beschränkt sich die Fertigungssteuerung auf die Planung und Kontrolle der letzten Produktionsstufe, da alle vorgelagerten Stufen dezentral durch den Verbrauch des nachgelagerten Prozesses gesteuert werden (Bullinger, Lung 1994, S. 15f.). Der Informations- und Materialfluss verlaufen in entgegengesetzter Richtung.

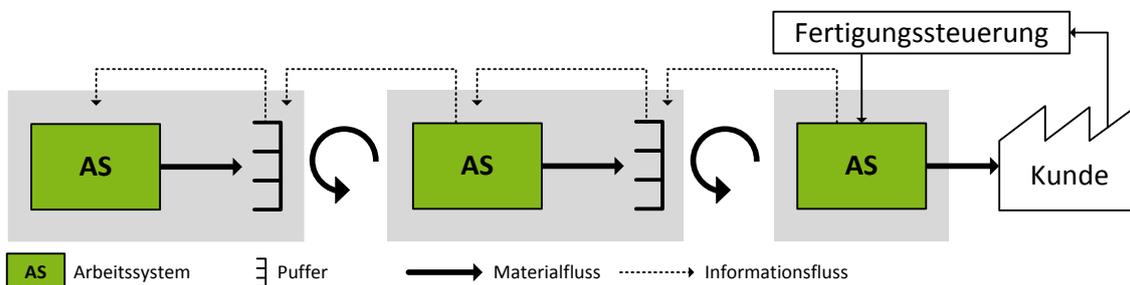


Abbildung 3: Verbrauchssteuerung (in Anlehnung an Große-Heitmeyer 2004, S. 69)

Durch die Form der Bereitstellung wird festgelegt, in welcher Losgröße das Material dem Montagesystem zur Verfügung gestellt wird (Bullinger, Lung 1994, S. 16). Hierbei kann grundsätzlich zwischen auftragsbezogenen und teilebezogenen Formen unterschieden werden. Bei der zusammengefassten Auftragskommissionierung wird eine Aufwandsreduzierung durch die Zusammenfassung mehrerer Gesamt- oder Teilaufträge erzielt (Heinz, Grünz, Mayer 2003, S. 12). Die Bereitstellung eines einzigen Gesamtauftrags umfasst im Gegensatz dazu lediglich die erforderlichen Materialien eines Auftrags (Bullinger, Lung 1994, S. 16). Diese werden zu einem bestimmten Zeitpunkt dem Montagesystem komplett zugeführt. Kann z. B. aufgrund von Platzrestriktionen lediglich eine Teilmenge des erforderlichen Materials der Montage bereitgestellt werden, wird von der Bereitstellung eines Teilauftrags gesprochen.

In Bezug auf die Bereitstellmenge kann zwischen gebindeorientierter und stückzahlgenauer Materialbereitstellung unterschieden werden. Die gebindeorientierte Materialbereitstellung umfasst alle Ausprägungen, bei denen die erforderliche Materialmenge nicht stückzahlgenau bereitgestellt wird (Bullinger, Lung 1994, S. 18). Ein Gebinde kann hierbei z. B. eine standardisierte Füllmenge von Kleinteilen oder größeren Montageteilen sein (Bullinger, Lung 1994, S. 18; Pfohl 2010, S. 189). Dabei determiniert die Art der Bereitstellung in großem Maße die Ausprägung der Bereitstellmenge. Stückzahlgenaue Bereitstellungen erfordern einen vergleichsweise hohen Steuerungs-, Kommissionier- und Transportaufwand (Bullinger, Lung 1994, S. 26f.) sowie eine optimale Qualität der Materialien.

Die Bereitstellquelle ist der Ort, von der aus die Materialbereitstellung erfolgt. Diese Quelle kann sich in Arbeitsplatznähe, z. B. in Form eines arbeitsplatzbezogenen Regals, befinden. Die Materialversorgung kann ebenso aus einem Zwischenlager im Arbeitssystem oder einem arbeitssystemneutrale Lager erfolgen (Bullinger, Lung 1994, S. 18). Letzteres befindet sich in der Regel nicht in einem Montagesystem, sondern dient mehreren Systemen als Quelle zur Materialbereitstellung. Schließlich können vorgelagerte Bereiche, wie der Wareneingang, die Fertigung oder Vormontagen, als Bereitstellquelle existieren.

Die Bereitstellsenke beschreibt den Ort, an welchem dem Montagemitarbeiter das benötigte Material zur Verfügung gestellt wird. Eine Bereitstellung ist direkt am Arbeitsplatz mit oder ohne Ladungsträger möglich. Diese Bereitstellsenke ist sinnvoll, wenn die einzelnen Komponenten häufig zur Fertigung des Produktes benötigt werden. Falls die Bereitstellfläche am Arbeitsplatz nicht ausreicht oder Materialien von mehreren Arbeitsstationen gleichzeitig benötigt werden, kann sich die Bereitstellsenke auch in Arbeitsplatznähe befinden. Bei Montageteilen, deren Umschlaghäufigkeit gering ist, ist eine Bereitstellung an einer zentralen Stelle im Produktionssystem möglich. (Bullinger, Lung 1994, S. 18)

Unter der Auslösung der Bereitstellung ist die für den Vorgang der Anforderung von bereitzustellendem Material zuständige organisatorische Einheit zu verstehen. Dabei wird nach dem Bring- und Hol-Prinzip unterschieden (Pfohl 2010, S. 188f.). In allen Fällen, in denen nicht die Mitarbeiter des Montagesystems die Bereitstellung initiieren, findet eine Auslösung nach dem Bring-Prinzip statt. Diese Auslösung kann durch ein übergeordnetes System, vorgelagerte Bereiche oder einen nicht der Montage unterstellten Bereitstellmitarbeiter geschehen (Bullinger, Lung 1994, S. 18).

Die Durchführung der Bereitstellung kann ebenfalls allgemein nach dem Bring- und Hol-Prinzip organisiert sein. Beim Hol-Prinzip erfolgt die Versorgung mit dem benötigten Material direkt durch die betroffenen Montagemitarbeiter im System (Pfohl 2010, S. 188f.). Das bedeutet, dass die Montagemitarbeiter selbst die Materialien aus dem Lager entnehmen und bereitstellen.

Erfolgt die Materialbereitstellung mittels Bring-Prinzip, wird das Montagesystem durch speziell für die Versorgung vorgesehene Bereitstellmitarbeiter beliefert (Pfohl 2010, S. 188f.). Diese führen alle zur Materialbereitstellung notwendigen Materialflussoperationen wie Kommissionieren, Umschla-

gen, Handhaben und Transportieren aus. Dem Bring-Prinzip können ebenfalls die Versorgung durch vorgelagerte Prozesse (Verkettung) und externe Lieferanten zugeordnet werden.

Aus der sinnvollen Kombination dieser Prinzipien kann eine konkrete Materialbereitstellungsstrategie festgelegt werden. Typische hieraus abgeleitete Strategievertreter werden im folgenden Abschnitt betrachtet.

2.4 Strategien der Materialbereitstellung

Die Materialbereitstellungsstrategie ist eine Kombination konkreter Ausprägungen der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Organisationsprinzipien (vgl. Bullinger, Lung 1994, S. 19). Für die Charakterisierung der Strategien sind im Besonderen die Merkmale Art der Bereitstellung, Bereitstellungsmenge, Bereitstellenske und Form der Bereitstellung von Bedeutung, da ihre Ausprägungen in großem Maße die Strategie determinieren (vgl. Abbildung 4). Nachrangig sind die Merkmale Bereitstellquelle sowie die Auslösung und Durchführung der Bereitstellung anzusehen.

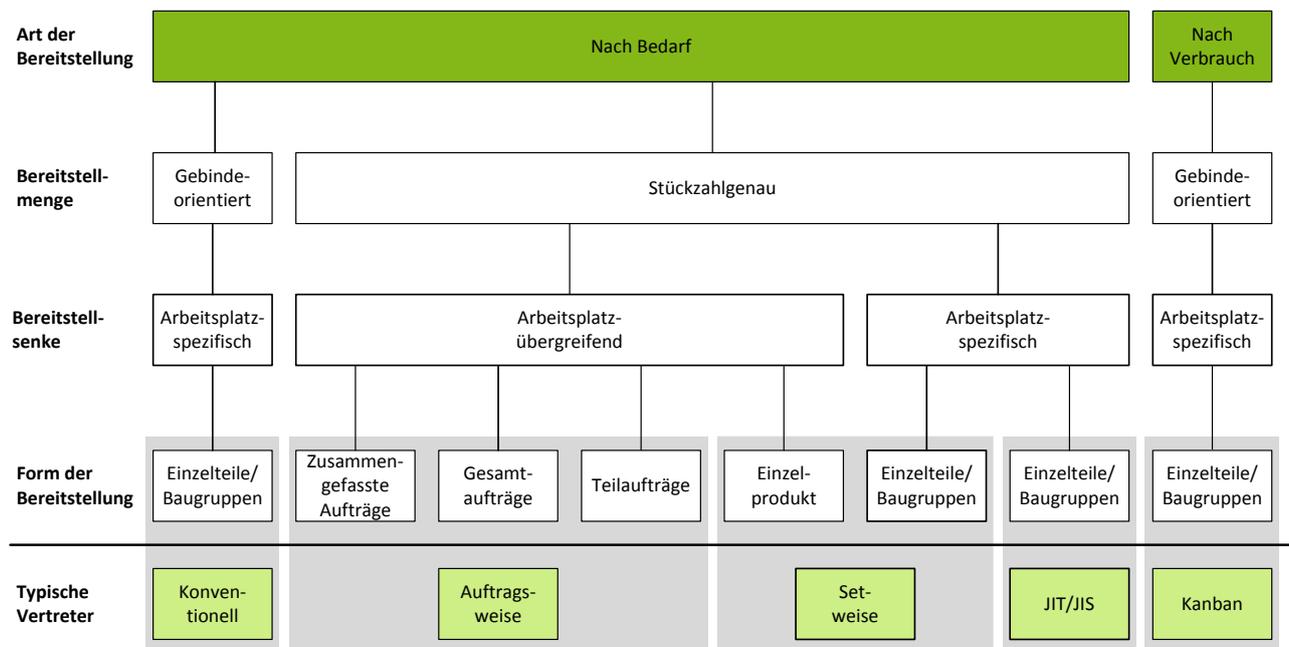


Abbildung 4: Typologie gängiger Materialbereitstellungsstrategien
(in Anlehnung an Bullinger, Lung 1994, S. 20; Röhrig 2002, S. 109)

Es zeigt sich, dass die Art der Bereitstellung einen großen Einfluss auf die Ausprägungen der anderen Merkmale aufweist. Aus diesem Grund erfolgt die Darstellung der Materialbereitstellungsstrategien anhand der Unterscheidung zwischen der bedarfsorientierten und verbrauchsorientierten Art der Bereitstellung.

2.4.1 Bedarfsorientierte Strategien

Bei den bedarfsorientierten Strategien lassen sich grundsätzlich die Verfahren der konventionellen Bereitstellung, der auftrags- und setweisen Bereitstellung sowie der Zielsteuerung unterscheiden.

Konventionelle Bereitstellung

Eine konventionelle Materialbereitstellung liegt dann vor, wenn Einzelteile oder Baugruppen nach Bedarf gebindeorientiert an den Montagearbeitsplätzen, an denen sie benötigt werden, bereitgestellt werden. Unabhängig von der zu produzierenden Losgröße werden Großgebände, wie Euro- oder Gitterboxpaletten, am Arbeitsplatz bereitgestellt (Röhrig 2002, S. 63). Dies führt in erster Linie zu einem erhöhten Platzbedarf an Bereitstellungsflächen in der Montage (Kestel 1995, S. 159). Somit fallen längere Lauf- und Greifwege des Montagemitarbeiters sowie Suchaufwände bei Variantenteilen an. Zudem ist eine Entsorgung von Verpackungsmaterial und die Rücklagerung der nicht verbauten Restmengen erforderlich (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 296). Diese Strategie ist jedoch durch einen geringen Steuerungsaufwand gekennzeichnet. Weiterhin wirken sich Qualitätsprobleme in Form von fehlenden oder fehlerhaften Teilen nicht so stark auf die Montage aus, da Ausschuss durch die Mehrmenge im Gebinde sofort ersetzt werden kann.

Diese Bereitstellungsstrategie wird vorwiegend bei Teilen mit großen Volumina und geringen Stückkosten oder bei einem hohen Verbrauch eines Teils eingesetzt (Röhrig 2002, S. 63).

Auftragsweise Bereitstellung

Eine auftragsweise Materialbereitstellungsstrategie zeichnet sich durch eine bedarfsorientierte, stückzahlgenaue Bereitstellung von Aufträgen für mehrere Arbeitsplätze aus. Hierbei wird das Material für die Aufträge oder Teilaufträge im Lager oder Kommissionierbereich zusammengestellt und in den Montagebereich gebracht (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 296). Dabei erfolgt eine Kommissionierung für das Arbeitssystem, d. h. die Bereitstellung ist arbeitsplatzübergreifend.

Das Material befindet sich ohne Restmengen und in optimalen Losgrößen im Montagesystem. Eine hohe Verwechslungsgefahr und die Gefahr nicht vollständiger Aufträge, bedingt durch z. B. Ausschuss, sind die Nachteile dieser Strategie (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 296).

Setweise Bereitstellung

Die setweise Bereitstellung umfasst die bedarfsorientierte, stückzahlgenaue Bereitstellung von Einzelprodukten oder Einzelteilen bzw. Baugruppen (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 296f.). Je nach konkreter Umsetzung erfolgt die Bereitstellung arbeitsplatzübergreifend oder arbeitsplatzspezifisch. Bei der setweisen Bereitstellung von Einzelprodukten werden, wie bei der Bereitstellung eines Gesamtauftrages, alle benötigten Komponenten zur Fertigstellung des Produktes arbeitsplatzübergreifend zugeführt, wobei die Losgröße eins entspricht (Bullinger, Lung 1994, S. 16). Zudem kann das Set mit dem Montageobjekt zusammen entlang mehrerer Montagestationen mitgeführt werden (Bozer, McGinnis 1992, S. 4).

Bei der setweisen Bereitstellung von Einzelteilen oder Baugruppen erfolgt eine arbeitsplatzspezifische Anlieferung der Teile, die für ein Produkt an einer Station benötigt werden (Klug 2010, S. 173). Dieses Verfahren ist auch als partielle Einzelkommissionierung, Warenkorbbereitstellung oder Kitting bekannt (Heinz, Mayer, Grünz 2002, S. 532; Schenk, Wirth 2004, S. 75). Hierbei

werden die an einem bestimmten Arbeitsplatz erforderlichen Teile sortenübergreifend und stückzahlgenau kommissioniert und sequenzgenau zugeführt (Hanson, Medbo 2012, S. 1115). Eine Variante stellt die produktbegleitende Bereitstellung dar, bei der das kommissionierte Material das Montageobjekt durch den Ablauf begleitet (Kestel 1995, S. 160; Monden 2012, S. 271ff.). Dadurch können der Bedarf an Bereitstellflächen, die Greif- und Laufwege der Mitarbeiter in der Montage sowie die Gefahr von Montagefehlern verringert werden (Brynzér, Johansson 1995, S. 115). Nachteilig sind der größere Steuerungs-, Handhabungs- und Transportaufwand sowie die Anforderungen an die Qualität der Bereitstellung hinsichtlich Artikel-, Mengen-, Zeit- und Sequenztreue, da Abweichungen Störungen in der Montage verursachen (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 296f.).

Just-in-Time und Just-in-Sequence (Zielsteuerung)

Die Zielsteuerung ist eine bedarfsorientierte Materialbereitstellungsstrategie, bei der das Material auf Basis eines stabilen Produktionsprogramms ohne Eingangs- und Zwischenlager termingenau (Just-in-Time) am Produktionsarbeitsplatz angeliefert bzw. bereitgestellt wird (Westkämper 2006, S. 228). Sie kommt aufgrund ihrer hohen Anforderungen an die Prozessstabilität hauptsächlich bei großvolumigen, hochwertigen Lieferumfängen mit hohem Umschlagsvolumen zum Einsatz (Klug 2010, S. 301).

Just-in-Time (JIT) ist vornehmlich in der Automobilindustrie verbreitet, wo durch eine zumeist elektronische Bestellung des Kunden Baugruppen beim nahegelegenen Lieferanten mit stundenweisem Vorlauf kommissioniert, endmontiert oder sogar komplett hergestellt und direkt ohne weitere Zwischenlagerungsprozesse bis an den Verbauort im Arbeitssystem des Kunden geliefert werden (vgl. Bullinger, Lung 1994, S. 28f.).

Aus diesem Grund ergibt sich bei dieser fertigungssynchronen Bereitstellungsstrategie ein erhöhtes Risiko des Produktionsstillstands, welchem nur mit einer hohen Logistikqualität seitens des Lieferanten begegnet werden kann. Der Steuerungs- und Transportaufwand ist hierbei vergleichsweise hoch, jedoch lassen sich erhebliche Bestandsreduzierungen erzielen (Bullinger, Lung 1994, S. 28f.). Durch die Verschiebung der Wertschöpfung in Richtung des Lieferanten wird dieser stärker in die Produktion des Kunden eingebunden (Arndt 2010, S. 171f.; Brunner 2011, S. 36; Syska 2006, S. 67).

Eine weitere Strategie stellt das Just-in-Sequence (JIS) dar, welches neben den wesentlichen Elementen des JIT eine sequenzgenaue Anlieferung des Materials in der Reihenfolge des Verbaus beim Kunden erfordert (Klepzig 2010, S. 135). JIS wird in der Regel für komplexe, großvolumige und kundenspezifische Materialien eingesetzt, die aufgrund ihrer Varianz sequenz- und zeitpunktgenau am Verbauort bereitgestellt werden müssen (Klug 2010, S. 302f.).

2.4.2 Verbrauchsorientierte Strategien

Die verbrauchsorientierte Materialbereitstellung bedingt im Vergleich zur bedarfsorientierten einen geringeren Steuerungsaufwand. Die Bindung zwischen Montagesystem (Kunde) und Materialbe-

reitstellung (Lieferant) stellt einen selbststeuernden Regelkreis dar (Ohno 2009, S. 37f.). Für jede einzelne Materialposition, die im Montagesystem benötigt wird, ist ein Mindestbestand definiert. Einfluss auf den Mindestbestand haben dabei die Wiederbeschaffungszeit des Materials und der Verbrauch des Systems (Nyhuis, Wiendahl 2012, S. 251). Ist der Mindestbestand am Verbauort unterschritten, wird die Materialbereitstellung ausgelöst.

Die verbrauchsorientierten Strategien der Materialbereitstellung basieren auf den unterschiedlichen Ausprägungsformen des Kanban-Prinzips, welches in den 1960er Jahren erstmalig beim japanischen Automobilhersteller Toyota eingesetzt wurde und seitdem in vielen Unternehmen weltweit zum Einsatz kommt (Monden 1983, S. 14ff.; Naito 1982, S. 9; Schonberger 1983, S. 57ff.).

Kanban (jap. für Karte oder Schild) ist eine verbrauchsgesteuerte Strategie der Materialbereitstellung (Hopp, Spearman 2008, S. 168). Das Material wird sortenrein in Kleingebinden bereitgestellt. Der Auslöser für die Materiallieferung ist das Unterschreiten eines Mindestbestands am Bereitstellungsort. Als auslösender Signalgeber sind in der Praxis die unterschiedlichsten Varianten anzutreffen (Große-Heitmeyer 2004, S. 69). So haben sich neben dem ursprünglichen Karten-Kanban der elektronische Kanban (eKanban), Behälter-Kanban und Sicht-Kanban zur Steuerung etabliert.

Beim Karten-Kanban ist jedem Gebinde eine Pendelkarte beigelegt, die zwischen verbrauchender und nachliefernder Stelle wechselt und alle benötigten Informationen, wie z. B. Materialnummer, Füllmenge des Gebindes, oder Quelle und Senke, beinhaltet (Schönsleben 2011, S. 345f.). Signalgebende Karten sind einfach für die Mitarbeiter zu lesen und beinhalten alle relevante Informationen für die Bereitstellung, können jedoch verschmutzen oder verloren gehen. Zudem tritt bei der Bereitstellung vieler Gebinde ein größerer Sortier- und Handhabungsaufwand der Karten auf.

Erfolgt das auslösende Signal zur Materialbereitstellung nicht per Karte, sondern auf elektronischem Wege, liegt ein elektronischer Kanban vor (Gudehus 2006, S. 159). Hierbei wird die zugrundeliegende Semantik des Kanban-Kreises ohne physische Karten in einem elektronischen Datenverarbeitungssystem abgebildet (Faupel 2009, S. 20). Die Kartenbewegungen werden, analog zum physischen Kanban, durch das Scannen von Barcodes an Bereitstellflächen, Behältern oder Materialien simuliert (Dickmann 2009, S. 403ff.). Der entscheidende Vorteil des eKanbans ist, dass bei größeren Entfernungen keine Verzögerungen durch den Transport von Karten entstehen und somit der Umlaufbestand geringer angesetzt werden kann. Außerdem gehen keine Karten verloren und die Kartenbestände können automatisch reguliert werden. Als Nachteil der elektronischen Variante ist die mangelnde Transparenz anzusehen.

Der Behälter-Kanban entspricht dem Mehr-Behälter-Prinzip, bei dem das auslösende Signal ein leerer Behälter ist, welcher im Arbeitssystem zur Wiederauffüllung an definierten Orten bereitgestellt wird (Klepzig 2010, S. 133). Alle für die Wiederauffüllung erforderlichen Informationen sind am Behälter angebracht, so dass dieser im Rahmen eines innerbetrieblichen Behälterpools nicht für andere Materialien genutzt werden kann und somit die flexible Verwendung des Behälterbestands einschränkt. Als Vorteil eines Behälter-Kanban ist, ähnlich zum Karten-Kanban, die Transparenz für die Mitarbeiter anzusehen.

Beim Sicht-Kanban wird das auslösende Signal für die Materialbereitstellung durch freigewordene Bereitstellplätze gekennzeichnet (Lödding 2008, S. 183f.). Entnimmt der Montagemitarbeiter aus einem Bereitstellort eine bestimmte Materialmenge, so dass freie Bereitstellplätze entstehen, erhält die Materialbereitstellung durch Sichtkontrolle das Signal zur Wiederauffüllung (Regber, Zimmermann 2007, S. 73).

Es zeigt sich, dass eine möglichst montagegerechte Bereitstellung des Materials, d. h. eine möglichst geringe aus der Bereitstellung resultierende Komplexität der Materialhandhabung im Montagesystem, stets einen erhöhten Aufwand in den vorgelagerten Prozessen und in der Steuerung induziert (Röhrig 2002, S. 74f.; Schenk, Wirth 2004, S. 75).

Im Rahmen der Bedarfsorientierung beschränkt sich der Kommissionieraufwand bei der konventionellen Strategie auf die Auslagerung und den Transport des Großgebundes an den Arbeitsplatz, führt dort jedoch zu erhöhter Handhabungskomplexität. Die auftrags- und setweise Strategie resultiert in montagegerechter Bereitstellung am Arbeitsplatz, aber auch erhöhtem Kommissionier- und Steuerungsaufwand. Letzterer wird durch die bestandslose Anlieferung von Material durch Lieferanten im Rahmen der JIT/JIS-Strategien nochmals erhöht.

Die verbrauchsorientierten Kanban-Strategien führen aufgrund der dezentralen Steuerung und Anlieferung von Kleingebunden zu einem akzeptablen Kommissionier- und Steuerungsaufwand bei vertretbarer Komplexität im Montagesystem. Kanban ist durch einen geringen, da dezentralen, Steuerungsaufwand und eine hohe Transparenz für die Mitarbeiter gekennzeichnet. Da jedoch bei einer reinen Verbrauchssteuerung jede Komponente am Verbauort vorgehalten werden muss, ist diese Form der Steuerung bei variantenreicher Montage nicht vorteilhaft (Große-Heitmeyer 2004, S. 70). Bei steigender Zahl vorzuhaltender Materialien steigt auch der Platzbedarf für die Bereitstellung im System und die Verwechslungsgefahr.

In der industriellen Praxis lassen sich vorwiegend Mischformen der oben angeführten Materialbereitstellungsstrategien antreffen (Röhrig 2002, S. 109). Um eine ausgewählte Materialbereitstellungsstrategie operativ umsetzen zu können, sind technische Betriebsmittel erforderlich, welche im nachfolgenden Abschnitt zusammengefasst werden.

2.5 Aktuelle Trends und Anforderungen an die Materialbereitstellung

Im Zuge der Reaktion auf veränderliche Marktsituationen haben sich in produzierenden Unternehmen verschiedene Rationalisierungsansätze etabliert, welche neue Anforderungen an die Materialbereitstellung in der Montage stellen.

Die steigende Variantenvielfalt führt bei konventionellen Bereitstellungsstrategien in der Montage zu einem erhöhten Flächenbedarf, da alle Teile in allen Varianten am Arbeitsplatz bereitgestellt werden (Heinz, Mayer, Grünz 2002, S. 531).

Besonders bei KMU lassen sich in der Montage schlecht gestaltete Arbeits- und Logistiksysteme ausmachen. Typische Ausprägungen sind hierbei Fehlteile, mangelhafte Beherrschung der Varian-

tenvielfalt, ungerichtete Materialflüsse und mangelnde Arbeitsplatzergonomie (Nyhuis, Zoleko 2007, S. 244). Aufgrund der oftmals mangelnden Versorgungssicherheit der Zulieferer treten häufig Materialunterdeckungen in Form von Fehlteilen auf. Dies führt zu hohen Sicherheitsbeständen im Produktionssystem. Wachsende Variantenvielfalt und unterlassene Anpassungen der Materialbereitstellungsstrategie führen zu ungeplanten, ungerichteten und in der Folge intransparenten Materialflüssen. Unzureichend definierte Schnittstellen zwischen Produktion und Logistik erschweren die Fokussierung auf die Wertschöpfung, da Montagemitarbeiter Materialbereitstellungsaufgaben übernehmen. Hier ist es ratsam, Montagemitarbeiter von allen nichtwertschöpfenden Tätigkeiten zu entbinden, so dass sie sich auf die Herstellung der Produkte konzentrieren können.

Häufig kommen zur Materialbereitstellung konventionelle Gabelstapler zum Einsatz (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 311). Besonders in KMU stellen sie den Großteil aller innerbetrieblichen Transportmittel. So wird vor allem die Bereitstellung von Großbinden, wie Europaletten und Gitterboxpaletten, in der Regel durch Staplertransporte organisiert, da hier das Verhältnis von Nutzlast zu Totlast am günstigsten ist. Ein weiterer Vorteil von Staplern ist ihre hohe Flexibilität, da sie autonom zwischen den Quellen und Senken verkehren (vgl. Koether 2007, S. 41). Staplerfahrer empfangen unkoordiniert Aufträge zur Anlieferung von Material und arbeiten diese in der Regel nacheinander ab (Baudin 2004, S. 67f.). Hierdurch kommt es jedoch häufig zu nicht planbaren, schwankenden Materialanlieferungen. Folgen sind entweder ein Materialengpass, wenn Stapler z. B. gerade andere Arbeitssysteme versorgen, oder eine Überversorgung von Material, wenn ein Schichtbedarf an sortenreinen Großbinden in der Montage bereitgestellt wird. Durch diese geringe Standardisierung ergeben sich mangelnde Stabilität und Transparenz in den Abläufen, die die Produktion durch Sicherheitsbestände ausgleicht, um nicht aufgrund von Materialengpässen Stillstände zu verursachen.

Die Transportkapazität eines Staplers beschränkt sich auf ein bis zwei Großbinde, je nach Stapelfähigkeit und Lastaufnahmemittel, was zu hohen Transportaufkommen in der Montage führen kann. Einen weiteren Nachteil von sortenreinen Großbinden stellen potenzielle Rücklagerungen dar, wenn Variantenwechsel im Arbeitssystem erfolgen, bevor das angelieferte Material aufgebraucht wurde. Aus den oben genannten Gründen nehmen viele Unternehmen für die Bereitstellung durch zusätzliche Umpack- oder Kommissioniervorgänge eine Mengenreduzierung vor (Heinz, Mayer, Grünz 2002, S. 531). Gerade für KMU mit ihrer begrenzten Ressourcenverfügbarkeit stellen solche Ersatzprozesse jedoch einen großen Kostenfaktor dar. Kleinere Bereitstellungsmengen erhöhen zudem zunächst den Aufwand in der logistischen Abwicklung, da sie in höherer Frequenz bereitgestellt werden müssen. Jedoch steigt die Produktivität im Montageprozess, was den Mehraufwand in der Materialbereitstellung in der Regel überkompensiert (Klug 2010, S. 170ff.).

Neben den direkten operativen Anforderungen in der Montagehalle ergeben sich für die Materialbereitstellung weiterhin Anforderungen aus der allgemeinen Produktionsorganisation (Dombrowski, Vollrath 2008, S. 511). So haben sich seit den 1990er Jahren viele Unternehmen in den westlichen Industrienationen mit dem Gedanken einer verschwendungsarmen Produktion (Lean Production) beschäftigt (Dombrowski, Schmidt 2008, S. 236). Der verschwendungsarme Auftragsabwicklungs-

prozess fokussiert im Kern auf den Faktor Zeit, d. h. die Reduzierung der Durchlaufzeit zwischen Kundenauftrag und Kundenbelieferung als entscheidende Wettbewerbsgröße (Ohno 2009, S. 22) und wird im Rahmen eines ganzheitlichen Produktionssystems in vielen Unternehmensbereichen, so auch in produktionslogistischen Prozessen, vorangetrieben (Deuse, Keßler, Wischniewski 2006, S. 46). Grundlegende Voraussetzung hierfür sind eine hohe Stabilität und Transparenz der Prozessabläufe (Specht, Höltz 2011, S. 71).

Stabilität eines Prozesses ist dann gegeben, wenn keine ungeplante Variabilität auftritt (vgl. Deuse, Richter 2011, S. 7). Im Gegensatz zu geplanter Variabilität, der direkte Entscheidungen zu Grunde liegen (z. B. Entscheidung für Variantenerhöhung) ist die ungeplante Variabilität ein Resultat von Ereignissen, die vom Unternehmen nicht kontrollierbar sind (z. B. Materialengpässe in der Montage). Diese gilt es zu unterbinden, um planbare und stabile Prozesse gestalten zu können (Hopp, Spearman 2008, S. 306ff.). Ist dies nicht in hinreichendem Maße möglich, kann die Stabilität des Montageprozesses durch definierte Materialreichweiten an den Arbeitsstationen erzielt werden, da diese als Puffer Störungen in der Materialbereitstellung ausgleichen (vgl. Deuse, Busch 2012, S. 89). Somit ist im Hinblick auf eine Bestandsreduzierung stets auch die Stabilität des Materialbereitstellungsprozesses zu berücksichtigen.

Wichtiges Kriterium hierbei ist eine hohe Transparenz der Materialströme in der Montage, um eine dezentrale Steuerung zu unterstützen. Grundlage hierfür sind die verbrauchsorientierten Materialbereitstellungsstrategien, welche mit einem Mindestmaß an Steuerung auskommen (Röhrig 2002, S. 61). Für die Umsetzung ist eine Standardisierung von Prozessen erforderlich, um gleichbleibende Abläufe und daraus resultierend Routinebildung bei den Mitarbeitern zu gewährleisten (Rother 2009, S. 123f.). Die Bestrebungen nach Stabilität, Transparenz und Standardisierung fordern für die Materialbereitstellung minimale Materialbestände, kurze Durchlaufzeiten und eine hohe Flexibilität. Sie hat synchronisiert zu erfolgen und orientiert sich demnach am Materialverbrauch des Kunden (Klug 2010, S. 80).

Aufgrund dieser Anforderungen haben sich vor allem in der Automobilindustrie eine Vielzahl neuer Materialbereitstellungskonzepte unter dem Begriff der „Lean Logistics“ herausgebildet (Klug 2010, S. 170ff.). Diese Konzepte sind häufig wenig technikgetrieben, so dass bei der Umsetzung ein großes Augenmerk auf einfache, transparente Strukturen und die Entwicklung der organisatorischen Abläufe und Regelkreise gelegt wird (Röhrig 2002, S. 108). Besonders unter diesem Aspekt stellen schlanke Logistiksysteme ein hohes Potenzial für KMU dar.

Eine in der Automobil- und Zulieferindustrie weit verbreitete Form der schlanken Materialbereitstellung stellt der innerbetriebliche Milkrun dar (Dreher, Nürnberger, Kulus 2009, S. 131; Klug 2011, S. 60). Als zyklisches Materialbereitstellungskonzept erfüllt er in großem Maße die Anforderungen hinsichtlich Standardisierung, Transparenz und Stabilität vor dem Hintergrund verringerter Bestellmengen (Günthner 2012, S. 8). Über die

Daher wird im nachfolgenden Kapitel der innerbetriebliche Milkrun näher erläutert.

2.6 *Innerbetriebliche Milkrun-Systeme*

Der Begriff Milkrun ist auf die in Großbritannien und den USA bis in das 20. Jahrhundert typische Form der Milchdistribution zurückzuführen. Ein Milchjunge brachte auf einer festgelegten Route volle wiederverwendbare Milchflaschen zum Kunden und sammelte die leeren Milchflaschen ein (Werner 2008, S. 215). Dabei erfolgte die Belieferung im Idealfall im direkten Austausch mit dem Leergut der vorhergehenden Lieferungen, so dass nie zu viel Milch ausgeliefert wurde und diese schlecht werden konnte. Nachdem der Milchjunge alle Milchflaschen ausgeliefert hatte, kehrte er zur Wiederbefüllung der leeren Flaschen zu seinem Ausgangspunkt zurück (Piontek 2007, S. 115).

Dieses Prinzip wurde auf Industrie und Handel übertragen, indem eine sequenzielle Abholung von Material bei mehreren Lieferanten und eine direkte Lieferung an den Kunden ohne einen weiteren Umschlag erfolgt (Seeck 2010, S. 109; Wildemann, Faust 2004, S. 36). Es kann außerbetrieblich zwischen Lieferanten- und Kundenwerken oder innerbetrieblich zur Materialbereitstellung Anwendung finden (Wannenwetsch 2010, S. 395).

Die Konzepte des außerbetrieblichen Milkrun wurden auf den innerbetrieblichen Milkrun zur Materialbereitstellung übertragen. Im Gegensatz zu durch Wetter- und Verkehrseinflüsse geprägten außerbetrieblichen Milkruns weist die innerbetriebliche Form aufgrund der kontrollierten Umgebung einer Werkshalle eine bessere Planbarkeit und geringere Störanfälligkeit auf (Baudin 2004, S. 69).

Im Vergleich zu einem konventionellen Staplersystem, welches dem Taxi-Prinzip folgt, weisen innerbetriebliche Milkruns den Charakter eines Linienbusses auf (Faust, Sainer 2010, S. 574). Für regelmäßige Transporte zwischen festen Orten nutzen Passagiere in der Regel Busse (oder Züge), die entlang fester Routen und nach festen Zeitplänen verkehren und an bestimmten Haltepunkten flexibel Passagiere aufnehmen oder abgeben. In Analogie hierzu eignet sich ein innerbetrieblicher Milkrun somit für eine regelmäßige kurzzyklische Materialbereitstellung, da die Anlieferungen durch die Standardisierung transparenter, zuverlässiger und vorhersagbarer sind (Baudin 2004, S. 67; Specht, Höltz 2011, S. 71). Somit erzeugt der innerbetriebliche Milkrun durch die fest definierten und regelmäßigen Zeiten nach Fahrplan und die zyklische Route einen gleichmäßigen Materialfluss im Prozessablauf und fungiert als Taktgeber der Produktion (Klug 2010, S. 185; Reuter 2009, S. 44; Suzaki 1989, S. 178ff.).

In der Praxis lassen sich viele unterschiedliche Ausprägungen des innerbetrieblichen Milkrun feststellen (Baudin 2004, S. 69; Monden 2012, S. 275ff.; Spear 1999, S. 264). Ihnen gleich ist die Trennung von wertschöpfenden Aufgaben und nicht wertschöpfender Materialbereitstellung als wichtige Prämisse für einen stetigen Produktionsfluss (Erlach 2010, S. 290ff.; Rother, Harris 2004, S. 46). Somit erfolgt die Materialbereitstellung stets nach dem Bring-Prinzip auf festgelegten Routen an definierten Zustellungspunkten (vgl. Abbildung 5).

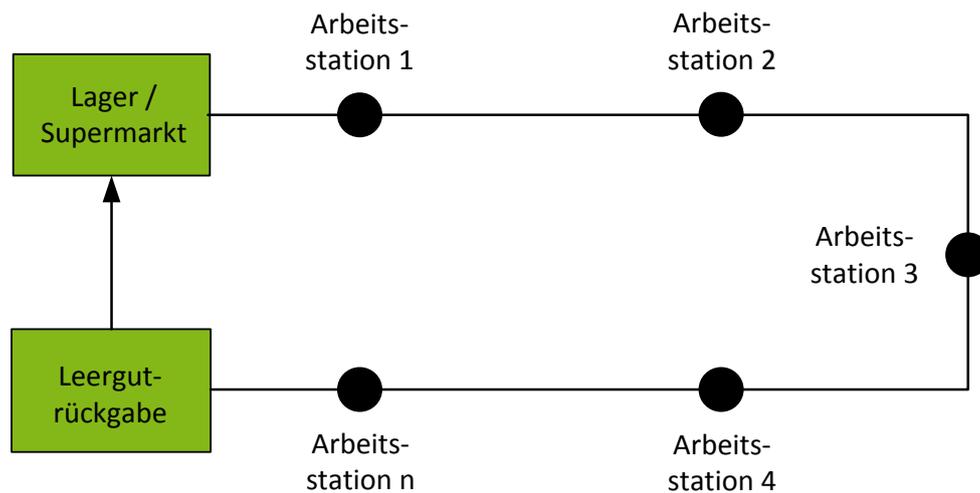


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines innerbetrieblichen Milkrun-Systems

Unter einer Route wird in diesem Zusammenhang eine fest vorgeschriebene Wegführung im Hallenlayout verstanden (Dreher, Nürnberger, Kulus 2009, S. 132). Sie beginnt und endet am Lagerort (Ciemnoczolowski 2007, S. 5). Eine weitere Prämisse ist die gebindeorientierte Bereitstellung in kleinen Losen, was eine wesentliche Voraussetzung für die Erreichung von Flexibilität in der Produktion darstellt (Deuse, Stausberg, Wischniewski 2007, S. 292; Monden 1983, S. 68).

Über diese grundlegenden Prämissen hinaus existieren unterschiedliche Definitionen eines innerbetrieblichen Milkrun. So beschreibt Ciemnoczolowski (2007, S. 4) die Aufgabe, Material verbrauchsbedingt in kleinen Losen und in einer bestimmten Frequenz von einem zentralen oder dezentralen Lagerort an den Arbeitsstationen bereitzustellen (Ciemnoczolowski 2007, S. 4). In dieser Definition wird von einem festen Zeitintervall, variablen Bereitstellungsmengen und manuell handhabbaren Kleinladungsträgern (KLT) ausgegangen (Baudin 2004, S. 69). Dies stellt eine typische Ausprägung eines Milkrun-Systems dar.

Auch Großladungsträger (GLT), wie z. B. Euro- oder Gitterboxpaletten, können auf entsprechenden Anhängern mit Milkruns gehandhabt werden (Saile, Wunderlich 2008, S. 51). Da die Art des zu beliefernden Materials sich stark auf die Wahl des Transportmittels auswirkt, existieren ebenso Milkrun-Systeme mit handgeführten Transportwagen, mit denen kleine Mengen, wie z. B. Elektronikkomponenten, bereitgestellt werden können (Baudin 2004, S. 69f.; Smalley 2005, S. 56).

Alternativ zur gängigen Belieferung variabler Mengen zu festen Zeitpunkten können auch feste Mengen zu variablen Zeitpunkten bereitgestellt werden (Smalley 2005, S. 57; Takeda 2008, S. 191f.). Weiterhin werden Milkrun-Systeme nicht nur zur direkten Belieferung der Arbeitsstationen eingesetzt, sondern können auch als vorgelagertes Bereitstellungselement zwischen einem zentralen und dezentralen Lager operieren (Baudin 2004, S. 68).

Eine weitere Charakterisierung geben Nyhuis, Wiendahl und Wagner (2012, S. 297), indem sie das Milkrun-Prinzip als Sonderform des Direkttransports mit fester Zeit, fester Menge und fester Stre-

cke beschreiben, was jedoch einer effizienten Verbrauchssteuerung entgegensteht und zu Überversorgung von Material im Arbeitssystem führen kann.

Neben der inhaltlichen Unschärfe des Konzepts existieren zudem unterschiedliche Begriffe für den innerbetrieblichen Milkrun. So sind in der deutschen Literatur u. a. Little oder Small Train, Logistikzug, Rundverkehr, Routenverkehr, Routenzug, Teilezug, Transportzug oder Versorgungszug, teilweise mit den Attributen intern, zyklisch oder getaktet, gebräuchlich (Gorecki, Pautsch 2011, S. 16; Klug 2010, S. 275; Poll 2007, S. 24; Reuter 2009, S. 44). In internationalen Quellen finden sich häufig Begriffe wie In-Plant Milk Run, Fixed-Course Pick-Up System oder Tugger Train Delivery System (vgl. Baudin 2004, S. 12; Eriksson, Hanson 2008, S. 346; Nomura, Takakuwa 2006, S. 155).

2.7 Grundlegende Prozessschritte eines innerbetrieblichen Milkrun-Systems

Kommen in der betrieblichen Praxis die unterschiedlichsten Ausprägungen innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zum Einsatz, so lassen sich bei den grundlegenden zyklischen Prozessschritten des Bereitstellmitarbeiters jedoch kaum Unterschiede feststellen. Gemäß der Einteilung lässt sich die Materialbereitstellung in eine Sequenz von Bereitstellungselementen unterteilen, die wiederum aus den Prozessen Kommissionierung, Transport und Abgabe bestehen (vgl. Abschnitt 2.1).

So ist auch der innerbetriebliche Milkrun als Bereitstellungselement anzusehen, welcher sich aus einer zyklischen und aufwandsmäßig unterschiedlichen Kombination der Prozesse Kommissionierung, Transport und Abgabe zusammensetzt (vgl. Abbildung 6).

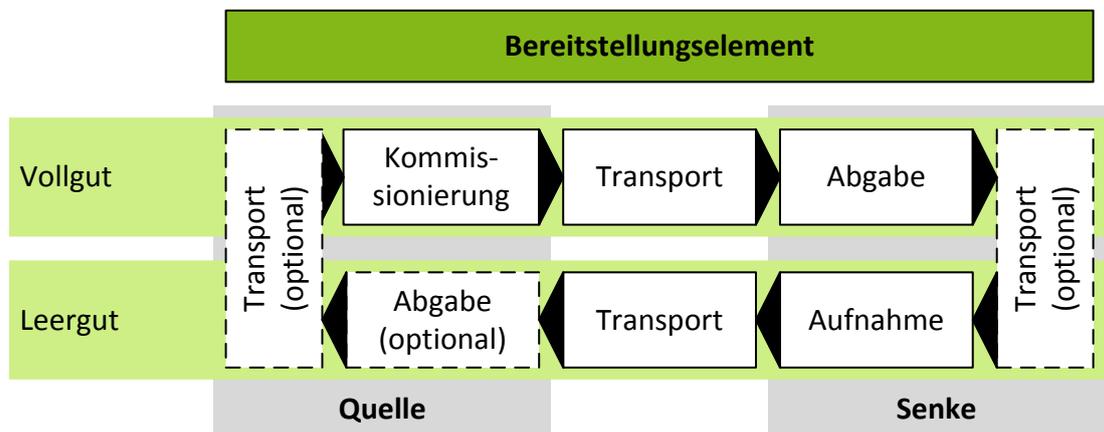


Abbildung 6: Grundlegende Prozessschritte eines Bereitstellungszyklus
(in Anlehnung an Wiendahl, Thies, Krüger 1997, S. 629)

Auf Basis des im letzten Bereitstellungszyklus verbrauchten Materials erfolgt die Kommissionierung von Vollgut an der Quelle (z. B. zentrales Lager, Supermarkt), welches im Anschluss durch einen Transportprozess zu einer oder mehreren Senken (z. B. Supermarkt, Arbeitsstation) gebracht wird. Hier finden die Abgabe des Vollguts und die Aufnahme von Leergut durch den Bereitstellmitarbeiter statt. Liegen Vollgutabgabe und Leergutaufnahme räumlich getrennt, kann innerhalb der

Senke ein weiterer Transport vorliegen. Dieser Prozess wiederholt sich gemäß der Anzahl an Senken auf der Route. Ist alles Vollgut bereitgestellt, findet der Transport zur ursprünglichen Quelle statt. Wird das Leergut nicht direkt wieder aufgefüllt, erfolgt die Abgabe in einem zentralen Leergutsammelbereich. Sind diese und der Kommissionierbereich ebenfalls räumlich getrennt, erfolgt analog ein weiterer Transport, um den Bereitstellungszyklus zu beenden. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte des Zyklus näher erläutert.

2.7.1 Kommissionierung

Die im Milkrun-System die Kommissionierung betreffenden Vorgänge sind die Bereitstellung, die Fortbewegung zum Bereitstellort, die Entnahme sowie die Abgabe der Güter.

Die Bereitstellung charakterisiert, wie der Mitarbeiter die Güter zur Entnahme im Kommissioniersystem vorfindet. Beim Milkrun herrscht in der Regel eine statische Bereitstellung der Güter vor. Hierbei befinden sich die Entnahmeeinheiten in Ruhe, während sich der Bereitstellmitarbeiter in der Regel eindimensional entlang der Entnahmeeinheiten im Kommissionierbereich fortbewegt.

Die Entnahme der Güter wird typischerweise manuell ausgeführt. Die Menge der Teile pro Zugriff ist dabei abhängig von Größe und Masse der Teile sowie vom Vereinzelungsfall. So kann es z. B. bei Schüttgut oder C-Teilen vorkommen, das leere KLT vom Bereitstellmitarbeiter mit dem entsprechenden Material in der angeforderten Menge befüllt werden müssen. Idealerweise sollte jedoch in einem Milkrun-System kein Material mehr vereinzelt werden müssen, da dies einen Mehraufwand für den Bereitstellmitarbeiter bedeutet (Gudehus 1973, S. 13).

Der Abgabeort der Güter ist das entsprechende Transportmittel des Milkrun-Systems. Die Abgabe findet somit zentral und analog zur Entnahme eindimensional und manuell statt, indem das Material vom Bereitstellmitarbeiter zum Transportmittel getragen wird.

Findet eine zentrale Leergutabwicklung statt, d. h. das Leergut wird am Ende des Zyklus an einem gesonderten Sammelplatz abgeliefert, beginnt der Vorgang der Kommissionierung direkt mit der Bewegung des Mitarbeiters zum Bereitstellort des erforderlichen Materials. Dies ist der Fall, wenn das Leergut gesammelt in vorgelagerte Bereiche oder zum Lieferanten zurückgeführt werden muss (Klug 2010, S. 156ff.). Verbleibt das gesamte Leergut oder Teile davon im Bereitstellungssystem, so wird dieses für den kommenden Zyklus im Rahmen der folgenden Kommissionierung wieder mit Teilen befüllt. Hierbei beginnt die Kommissionierung mit dem Aufnehmen des Leerguts vom Transportmittel und der anschließenden Befüllung dieser mit Teilen.

Befinden sich auf dem Fördermittel alle für den nächsten Zyklus erforderlichen Materialien, ist der Kommissioniervorgang abgeschlossen und der nachfolgende Transportprozess kann beginnen. Häufig startet ein getakteter Milkrun-Zyklus mit dem Transport, so dass zwischen Ende der Kommissionierung und Start des Transports Wartezeiten entstehen können, wenn der vorherige Zyklus früher als geplant vollendet wurde (vgl. Ciernoczolowski, S. 6f.; Roscher 2008, S. 22; Takakuwa, Nomura 2003, S. 461).

2.7.2 Transport

Zu diesem Teilprozess gehören der Transport des Vollguts zu den Senken, der Transport innerhalb und zwischen den Senken sowie der Transport des Leergutes zur Abgabestelle und zurück zum Kommissionierbereich.

Der Transport des erforderlichen Materials wird häufig aufgrund der erforderlichen Raumüberbrückung und der Flexibilität in der Routenführung mit Hilfe von frei verfahrbaren, flurgebundenen Unstetigförderern durchgeführt. Die Wahl des Unstetigförderers hat entscheidenden Einfluss auf den Transportprozess hinsichtlich Transportzeit, -kapazität und Handhabungsaufwand. So ist es wichtig, dass ein Fördermittel bei der Materialbereitstellung die Montagemitarbeiter in ihrer Tätigkeit nicht behindert und eine ausreichende Kapazität aufweist, um das erforderliche Material zu transportieren (Álvarez et al. 2009, S. 956; Domingo et al. 2007, S. 143). Weiterhin sollten Fördermittel so ausgelegt sein, dass sich das an einer Senke erforderliche Material ohne Umpacken oder Rangieren anderer Materialien im direkten Zugriff befindet (Takeda 2008, S. 63; vgl. Takeda 2009, S. 88).

Kommen keine Fördermittel zum Einsatz, ist die Kapazität des Transports von der reinen manuellen Handhabung des Mitarbeiters abhängig. Grundsätzlich ist dies im Rahmen eines Milkrun-Systems für wenige Materialien und räumlich stark begrenzte Bereiche vorstellbar und wird daher im Rahmen des Projekts nicht weiter verfolgt.

2.7.3 Abgabe

Abgabeprozesse im innerbetrieblichen Milkrun finden an verschiedenen Stellen entlang der Transportroute statt. An den einzelnen Senken wird das angeforderte Material bereitgestellt und das Leergut aufgenommen. Hierfür wird das Vollgut vom Transportmittel entnommen und an der Senke positioniert sowie das Leergut von der Senke entfernt und auf dem Transportmittel abgestellt.

Je nach Organisation kann eine zentrale Leergutabgabe in die Route des Bereitstellmitarbeiters integriert sein (vgl. Abschnitt 2.7.1). In diesem Fall findet ein weiterer Abgabeprozess im Leergutsammelbereich statt.

Auf Basis der oben beschriebenen generischen Prozessschritte eines innerbetrieblichen Milkrun-Systems lassen sich jedoch die in der betrieblichen Praxis aufzufindenden Ausprägungen nicht hinreichend beschreiben. Aus diesem Grund erfolgt im nachfolgenden Kapitel eine detailliertere, systematische Betrachtung der organisatorischen und technischen Ausgestaltung in Form eines morphologischen Kastens.

3 Morphologie innerbetrieblicher Milkrun-Systeme

In der betrieblichen Praxis weisen innerbetriebliche Milkrun-Systeme trotz ähnlicher Aufgabenspektren nur einen geringen Standardisierungsgrad hinsichtlich der Abläufe und Technik auf (Günthner 2012, S. 8). Daher existieren vielerlei Ausprägungen innerbetrieblicher Milkrun-Systeme (Baudin 2004, S. 69). Diesen wird bisher in der wissenschaftlichen Literatur wenig Beachtung geschenkt, so dass eine systematische Klassifizierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme nicht existiert. Daher wird in diesem Abschnitt eine solche Klassifizierung auf Basis der bestehenden Literatur durchgeführt und beschrieben.

Zur systematischen Einordnung und konkreten Ausgestaltung solcher Systeme sind neben den im vorherigen Kapitel grundlegend beschriebenen Prozessen Kommissionierung, Transport und Abgabe auch die Art der Steuerung und die verwendeten Ladungsträger (LT) wichtige Gestaltungskriterien. Auf übergeordneter Ebene ist ein weiteres Kriterium das Bereitstellungselement selbst, welches die Stufe, auf der das Milkrun-System im innerbetrieblichen Materialflusssystem operiert und Güter transportiert, beschreibt (vgl. Abschnitt 2.1).

Diese Kriterien bedingen in Kombination mit den anderen Elementen die Ausprägungen des Systems und können daher als Gestaltungsfelder des Bereitstellungselements innerbetrieblicher Milkruns bezeichnet werden (vgl. Abbildung 7).

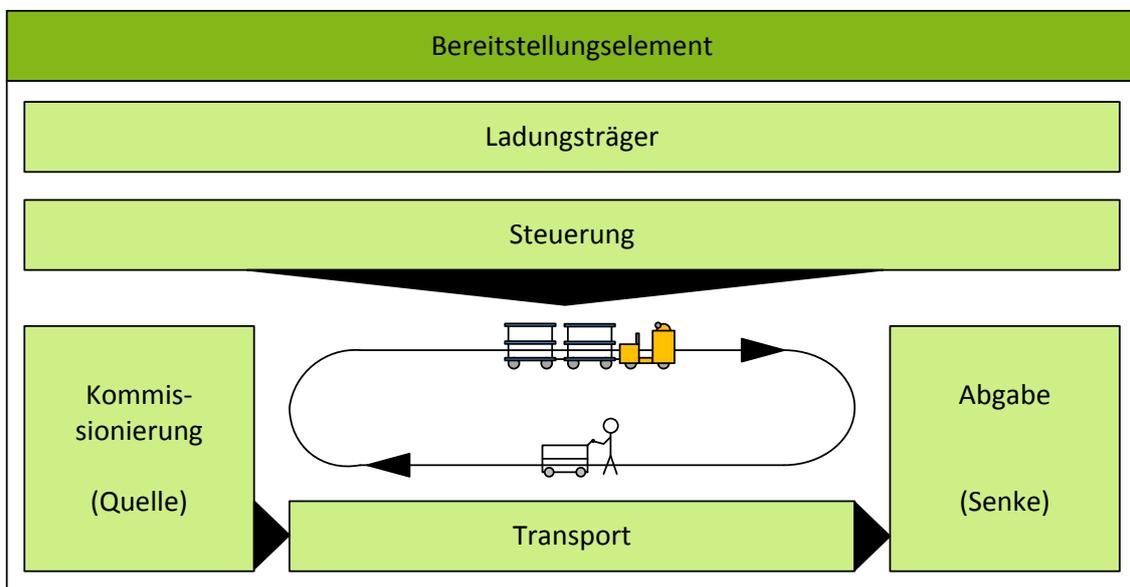


Abbildung 7: Gestaltungsfelder eines Milkrun-Systems

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Gestaltungsfelder eines innerbetrieblichen Milkrun-Systems mit den Merkmalen und ihren Ausprägungen näher erläutert.

3.1 Gestaltungsfeld Bereitstellungselement

Das Gestaltungsfeld Bereitstellungselement stellt grundlegende Alternativen hinsichtlich der Stufe, auf der der Milkrun im innerbetrieblichen Materialflusssystem operiert, und des bereitzustellenden Gutes dar. Diesem Gestaltungsfeld lassen sich somit die Merkmale Bereitstellungsstufe und Bereitstellungsgut zuordnen (vgl. Tabelle 2).

Merkmal	Ausprägung			
Bereitstellungselement				
Bereitstellungsstufe	Zwischen Lager und Arbeitsplatz	Zwischen Lager und Supermarkt	Zwischen Supermarkt und Arbeitsplatz	Zwischen Arbeitsplatz und Fertigwarenlager
Bereitstellungsgut	Baugruppen / Bauteile		Werkzeuge und Vorrichtungen	Fertigwaren

Tabelle 2: Gestaltungsfeld Bereitstellungselement

Das Merkmal Bereitstellungsstufe charakterisiert, zwischen welchen Lagerstufen im innerbetrieblichen Materialfluss das Milkrun-System eingesetzt wird (vgl. Abbildung 1). Hierbei existieren die vier Ausprägungen zwischen Lager und Arbeitsplatz, zwischen Lager und Supermarkt, zwischen Supermarkt und Arbeitsplatz sowie zwischen Arbeitsplatz und Fertigwarenlager.

Ein Milkrun zwischen einem zentralen Lager und Supermarkt ist nicht direkt für die Materialbereitstellung der Montage verantwortlich, sondern für die des Supermarkts, aus dem Material für die Montage von einem nachgelagerten Prozess entnommen wird (Baudin 2004, S. 68). Ein Milkrun zwischen Supermarkt und Arbeitsplatz umfasst, an die vorherige Stufe anschließend, die Materialbereitstellung der einzelnen Montagestationen aus einem montagenahen Supermarkt (Ciemnoczolowski 2007, S. 4). Ein Milkrun zwischen zentralem Lager und Arbeitsplatz stellt eine Kombination aus den obigen Ausprägungen dar. In diesem Fall wird die Lagerstufe Supermarkt ausgelassen, so dass eine direkte Belieferung der Montagearbeitsplätze aus dem zentralen Lager stattfindet. Eine seltene Form ist der Milkrun zwischen Arbeitsplatz und Fertigwarenlager. Dieser dient jedoch nicht zur Materialbereitstellung, sondern zum Fertigwarenabtransport und der Leergutversorgung (Klug 2010, S. 407). In der Praxis kann der Fertigwarenabtransport und die Leergutversorgung im Bereitstellungszyklus integriert sein (Cardaun 2007, S. 88f.; Klevers 2007, S. 123).

Das zweite Merkmal im Rahmen dieses Gestaltungsfelds ist das Bereitstellungsgut. Bereitstellungsgüter sind in der Regel Bauteile und Baugruppen, die für die Montage an den Arbeitsplätzen erforderlich sind (REFA 1991b, S. 172). Hierzu können neben den Hauptkomponenten eines Produkts auch Schüttgut oder Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, wie z. B. Verpackungsmaterial oder Klebstoffe, zählen. Ebenfalls denkbar ist die Anlieferung von Werkzeugen, Vorrichtungen oder Mess- und Prüfmitteln, die für bestimmte Montageaufträge an den Arbeitsplätzen benötigt werden, und der

Abtransport von fertig montierten und/oder verpackten Produkten in ein Fertigwarenlager (Klevers 2007, S. 123; Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 286).

3.2 Gestaltungsfeld Ladungsträger

Das Gestaltungsfeld Ladungsträger beschreibt die im Rahmen eines Milkrun-Systems erforderlichen technischen Mittel, die für die montagegerechte Bereitstellung erforderlich sind. Es umfasst das Merkmal Art der Ladungsträger (vgl. Tabelle 3).

Merkmal		Ausprägung		
Ladungsträger				
Art der Ladungsträger	Kleinladungsträger	Großladungsträger	Keine Ladungsträger	

Tabelle 3: Gestaltungsfeld Ladungsträger

Die Art der Ladungsträger ist innerbetrieblich in der Regel auf tragende und umschließende Formen, wie z. B. Europaletten, Gitterboxpaletten, Behälter, Kartons, Beutel oder Trays beschränkt. Seltener wird bestimmtes Material gänzlich ohne LT gehandhabt. Dies kann z. B. für Verpackungsmaterial, Betriebsstoffe, Werkzeuge oder Vorrichtungen der Fall sein. Kommen jedoch LT zum Einsatz, können sowohl Kleinladungsträger als Großladungsträger auftreten (Klug 2010, S. 171ff.).

KLT erlauben neben der Platzersparnis in der Montage eine vereinfachte Handhabung, da das Material durch die Mitarbeiter ohne Hilfsmittel gegriffen und bewegt werden kann (Klug 2010, S. 168; Reuter 2009, S. 47). Hierbei kommen modulartig aufgebauten KLT nach DIN 55510-3 eine besondere Bedeutung zu (vgl. Abbildung 8).



Abbildung 8: Beispiele für KLT (VDA-KLT, links) und GLT (Gitterboxpalette, rechts)
(Industrie Paletten GmbH 2012; VDA 5007, S. 22)

Ziel ist es dabei, den in der Montage zur Materialbereitstellung eingeplanten LT nach Möglichkeit im gesamten Materialfluss vom Lieferanten bis zum Verbauort durchgängig zu nutzen (Spathelf

2006, S. 87). Nicht den Modulmaßen entsprechende Formen oder Einwegverpackungen sind nur noch selten anzutreffen (Kuhn, Lange, Zimmermann 2005, S. 16). Daher wird im Folgenden der Begriff KLT als Synonym für die standardisierten Ausprägungen verstanden. GLT können aufgrund ihres Volumens und ihrer Masse nur mit Fördermitteln, z. B. auf Anhängern, transportiert werden (Saile, Mazura 2008, S. 63f.). Zwar verursachen sie im Verhältnis zu KLT geringe Handhabungs- und Lagerkosten, sind jedoch für die montagegerechte Bereitstellung eher ungeeignet und treten daher vorwiegend in vorgelagerten Bereitstellungselementen zur Versorgung von Supermärkten auf (Schneider 2008, S. 180). Typische GLT im Milkrun sind Gitterbox- und mit KLT beladene Europaletten (KLT-Türme), welche auf Anhängern oder Bodenrollern transportiert werden.

3.3 Gestaltungsfeld Steuerung

Das Gestaltungsfeld Steuerung detailliert die Organisation des Milkrun-Systems hinsichtlich der Auslösung des Bereitstellzyklus. Die vorzufindenden Merkmale in der Steuerung sind die Auslösungsart und die Signalart (vgl. Tabelle 4).

Merkmal	Ausprägung		
Steuerung			
Auslösungsart	Fester Zeitpunkt (bei variabler Menge)	Feste Menge (bei variablem Zeitpunkt)	Feste Menge, fester Zeitpunkt (bei variablen Rückläufen)
Signalart	Verbrauchsorientiert	Bedarfsorientiert	Hybrid

Tabelle 4: Gestaltungsfeld Steuerung

Das Merkmal Auslösungsart beschreibt, nach welchen Kriterien ein neuer Bereitstellungszyklus ausgelöst wird und untergliedert sich in die Ausprägungen fester Zeitpunkt (bei variabler Menge), feste Menge (bei variablem Zeitpunkt) und feste Menge, fester Zeitpunkt (bei variablen Rückläufen).

Bei der ersten Ausprägung startet ein neuer Milkrun-Zyklus nach einem festen Zeitplan (Narusawa, Shook 2009, S. 29). Die im Zyklus bereitzustellende Materialmenge hingegen variiert in Abhängigkeit vom Verbrauch der Senken aus dem vorherigen Zyklus (Smalley 2005, S. 57). Diese starrzyklische Form eignet sich vor allem für die regelmäßige Versorgung getakteter Montagesysteme.

Bei unregelmäßig auftretenden Verbräuchen oder außergewöhnlich schweren bzw. sperrigen Teilen eignet sich eine mengenfixe/zeitvariable Auslösung besser (Narusawa, Shook 2009, S. 29; Smalley 2005, S. 57). Hierbei werden feste Mengen, wie z. B. der Inhalt eines LT, zu variablen Zeiten bereitgestellt (Takeda 2008, S. 192). Zudem kann sich neben der variablen Zeit auch die Bereitstellungsrouten je nach Materialverbrauch ändern. Aufgrund des fehlenden Zyklustakts ist für die Materialbereitstellung ein eindeutiges visuelles und/oder akustisches Signal erforderlich, um dem Milk-

run die Auslösung des nächsten Zyklus anzuzeigen (Smalley 2005, S. 57). Trotz häufig geringerer Transportauslastung sind feste Zeitintervalle auch aufgrund der Planbarkeit für den Montagemitarbeiter zu präferieren (Bicheno, Holweg 2009, S. 160; Schedlbauer 2008, S. 133).

Eine weitere Ausprägung ist die Kombination aus beiden vorherigen Varianten. Ein Milkrun führt bei jedem Zyklus zu festen Zeitpunkten eine feste Menge Material mit sich. An den Senken kann er so verbrauchtes Material unmittelbar aus seinem Bestand auffüllen, ohne dass der nachgelagerte Prozess einen Zyklus warten muss (vgl. Savelsbergh, Goetschalckx 1995, S. 164). Daher wird diese Art in der Industrie häufig als „Bauchladen-Prinzip“ bezeichnet. Nachteilig ist der Bestand auf dem Milkrun-Transportmittel, welcher ggf. nicht erforderlich ist und somit als Rückläufer bis zur Bereitstellung im System umläuft (Eriksson, Hanson 2008, S. 348).

Das Merkmal Signalart beschreibt die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Informationsübermittlung des bereitzustellenden Materials. Hierbei sind die Ausprägungen verbrauchsorientiert, bedarfsorientiert und hybrid zu sehen. Durch die verbrauchsorientierte Kanban-Steuerung erhält der Milkrun bei seiner Tour Informationen über das nachzuliefernde Material. Mittels dieser stellt der Milkrun-Mitarbeiter im Lager das entsprechende Material für die nächste Route zusammen. Das konkrete Kanban-Signal kann per Karte, elektronisch, durch den Behälter oder einen leeren Stellplatz ausgelöst realisiert werden.

Bedarfsorientiert wird in der Regel über ein entsprechendes System zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) bereitgestellt (Lödding 2008, S. 6). Anhand eines vorgegebenen (Tages-) Produktionsplans, dem Primärbedarf, werden mittels Stücklistenauflösung die erforderlichen Bauteil-/Baugruppenbedarfe, der Sekundärbedarf, ermittelt, so dass der Milkrun auf Basis einer hieraus generierten Kommissionierliste das richtige Material bereitstellen kann (Fortmann, Kallweit 2007, S. 118f.; Schuh, Lassen 2006, S. 195ff.). Diese Funktion eines PPS-Systems wird als Material Requirements Planning (MRP) bezeichnet (Rücker, Schneider 2007, S. 214). Nachteilig ist die langsame Reaktionsgeschwindigkeit, da schwankende Materialverbräuche nicht schnell genug eingepflegt und die Bereitstellung erreichen. Somit sind MRP-gesteuerte Systeme nicht verbrauchsorientiert (Deleersnyder et al. 1992, S. 43).

Hybride Formen kombinieren die Vorteile von Kanban und MRP (Dickmann, Dickmann 2007, S. 48). So stellt das Synchro MRP eine Variante dar, welche mit einem Tagesproduktionsplan und einem Kanban-System arbeitet (Lödding 2008, S. 222). Nach dem auf Hall (1981, S. 43ff.) zurückgehenden und auf Milkruns übertragenen Verfahren erfolgt die Auslösung der Bereitstellung und Menge des Materials auf Basis von Kanban, die Art des Materials jedoch wird über das Tagesproduktionsprogramm für die Bauteile/-gruppen ermittelt (Lödding 2008, S. 225). Je nach Kombination der Steuerungsmerkmale sind unterschiedliche Aufgaben durch den Milkrun-Mitarbeiter durchzuführen, wie z. B. Kanban-Karten zu sortieren und mit LT zu verbinden, LT wieder aufzufüllen oder nach elektronischen Kanban-Listen Material zu kommissionieren.

3.4 Gestaltungsfeld Kommissionierung

Im Gestaltungsfeld Kommissionierung werden die organisatorischen und technischen Ausprägungen des Kommissionierprozesses in einem Milkrun-System erläutert. Hierbei treten die Merkmale Art der Kommissionierung, Art der Entnahme und Zusatz Tätigkeiten auf (vgl. Tabelle 5).

Merkmale	Ausprägung			
Kommissionierung				
Art der Kommissionierung	Gekoppelt		Entkoppelt	
Art der Entnahme	Manuell aus Regal (Fachboden / Durchlauf)	Manuell von Großgebäude (Bodenlagerung)	Mit Transportmittel (Anhänger / Bodenroller)	
Zusatz Tätigkeiten	Materialbuchung (Werkstattbestand)	Entfernung von Ladungssicherung	Entfernung von Verpackungsmaterial	Keine Zusatz Tätigkeiten

Tabelle 5: Gestaltungsfeld Kommissionierung

Die Art der Kommissionierung beschreibt die organisatorische Einbettung des Prozesses in den Milkrun. So kann dieses Merkmal gekoppelt oder entkoppelt ausgeprägt sein (Ciemnoczolowski, S. 6). Bei der gekoppelten Kommissionierung ist der Milkrun-Mitarbeiter sowohl für die Kommissionierung der Teile an der Quelle als auch für den darauffolgenden Transport und Abgabeprozesse zuständig. Das verbrauchte Material, welches in einem Zyklus als Leergut eingesammelt wird, wird im folgenden Zyklus durch denselben Mitarbeiter kommissioniert und bereitgestellt.

Insbesondere bei hochfrequent operierenden Systemen, bei denen z. B. aufgrund der erforderlichen Zeit oder der körperlichen Belastung nicht alle Tätigkeiten durch einen Mitarbeiter durchführbar sind, kann die Kommissionierung durch einen zusätzlichen Mitarbeiter entkoppelt werden (Ciemnoczolowski, S. 6; Takeda 2008, S. 193). Während der Milkrun-Fahrer seine Route abfährt, kann der Kommissionierer bereits das erforderliche Material auf einem Fördermittel zusammenstellen, welches beim nächsten Zyklus des Milkrun-Fahrers gegen das Fördermittel mit Leergut ausgetauscht wird. Je nach eingesetzter Signalart kann sich durch eine entkoppelte Kommissionierung die Wiederbeschaffungszeit von Material um einen weiteren Zyklus verzögern. Bei elektronisch aus der Montage übermittelten Verbrauchsignalen muss der Kommissionierer nicht auf die Ankunft des Milkrun im Lager warten, sondern kann bereits parallel anhand der elektronischen Pickliste kommissionieren (vgl. Schweizer 2011, S. 55). Der Rücklauf des Leerguts ist somit vom Vollgutnachschub entkoppelt, so dass die Wiederbeschaffungszeiten um die Rücklauf- und Bearbeitungszeiten der Karten reduziert sind (Gudehus 2006, S. 159). Beim Frequentieren mehrerer Milkruns in einem Kommissionierbereich führt die Entkopplung demgegenüber zu einem verbesserten Ablauf mit weniger gegenseitigen Behinderungen (Ciemnoczolowski, S. 6). Auch können hierdurch ggf. weitere Tätigkeiten, wie Kitting oder Vormontageinhalte, vom eigentlichen Milkrun zeitlich entkoppelt werden (Muckelberg 2006, S. 52f.).

Die Art der Entnahme von Material als zweites Merkmal in einer für Milkruns typischen statischen, eindimensionalen manuellen und zentralen Kommissionierung kann in Abhängigkeit von der Art des LT unterschiedlich geartet sein. So wird Material typischerweise manuell aus Fachboden- oder Durchlaufregalen, manuell von Großgebinden auf dem Boden (Bodenzeilenlagerung), oder auf Transportmitteln, wie Anhängern, entnommen. In einem Fachboden- oder Durchlaufregal können die Materialien platzsparend in mehreren Ebenen übereinander angeordnet werden. Sie beherbergen in der Regel Kleingebinde in Form von KLT, Kartons, Trays, u. ä., die manuell entnommen werden können und eine Entnahme nach dem First In First Out (FIFO)-Prinzip ermöglichen (Bichler, Schröter 2004, S. 161). Eine Bodenzeilenlagerung ist in erster Linie für aus gestapelten KLT zusammengesetzten GLT (KLT-Türme) geeignet und findet häufig auf freien Flächen als Supermarkt statt. Hierbei werden die KLT bei der Kommissionierung durch den Mitarbeiter vereinzelt (Gudehus 1973, S. 13). Da keine Regale erforderlich sind, ist die Größe und Anordnung des Bereichs flexibel (Heiserich, Helbig, Ullmann 2011, S. 64). Eine Bereitstellung von GLT auf Fördermitteln, wie Anhängern oder Bodenrollern, erlaubt das direkte Ankuppeln bzw. Andocken dieser an den Schleppzug, um so auch ohne Stapler Großgebinde umschlagen und transportieren zu können (Klug 2010, S. 167; Saile, Mazura 2008, S. 64). Da hierbei Bereitstellereinheit und Kommissionierereinheit identisch sind, erfolgt die Materialanstellung an der Senke ohne Vereinzeln (Klug 2010, S. 272). Sowohl bei der Bodenzeilenlagerung als auch der Bereitstellung auf Fördermitteln sind Stellplätze für Großgebinde erforderlich, was für die Kommissionierung aufgrund der Abmaße in größeren Wegzeiten resultiert.

Im Rahmen des Merkmals Zusatztätigkeiten werden alle neben dem eigentlichen physischen Kommissioniervorgang zyklisch oder außerzyklisch für einen stabilen Ablauf erforderlichen Tätigkeiten verstanden. Zu diesem Merkmal gehören die Ausprägungen Materialbuchung (Werkstattbestand), Entfernung von Ladungssicherung, Entfernung von Verpackungsmaterial oder keine Zusatztätigkeiten. So ist es ggf. erforderlich, das für den Milkrun-Zyklus kommissionierte Material vor der Auslieferung im PPS-System z. B. mittels Tastatureingabe an einem Terminal oder Scanvorgang zum Werkstattbestand hin umzubuchen (Benz, Höflinger 2008, S. 219). Häufig wird das Material jedoch schon mit der Bereitstellung in der Kommissionierung buchungstechnisch dem Montagebereich als Werkstattbestand hinzugebucht, so dass hierfür kein zeitlicher Aufwand im Milkrun-System entsteht (vgl. Bullinger 1986, S. 177). Die Entfernung von Ladungssicherung und Verpackungsmaterial wird erforderlich, wenn der Bereitstellungszustand des Materials den Kommissioniervorgang behindert (Nomura, Takakuwa 2006, S. 159). So müssen z. B. Stretchfolien oder Umreifungsbänder von GLT entfernt oder Staubabdeckungen aus Plastik oder Pappe entsorgt werden (Klug 2010, S. 152). Solche Tätigkeiten sollten möglichst in vorgelagerten Bereitstellungsstufen durchgeführt werden, da sie den zyklischen Ablauf des Milkrun stören (Klug 2010, S. 272; Saile, Wunderlich 2008, S. 50f.).

3.5 Gestaltungsfeld Transport

Das Gestaltungsfeld Transport beinhaltet den Prozess der Raumüberbrückung zwischen Quelle und Senke des Milkrun. Die Merkmale sind die Art des Transports, die Quelle/Senke-Beziehung und die Routenführung mit ihren entsprechenden Ausprägungen (vgl. Tabelle 6).

Merkmale	Ausprägung				
Transport					
Art des Transports	Stapler	Schleppzug	Niederhubwagen	Handgeführter Transportwagen	FTS
Quelle/Senke-Beziehung	1 : 1		1 : n		m : n
Routenführung	Statisch			Dynamisch	

Tabelle 6: Gestaltungsfeld Transport

Das Merkmal Art des Transports kann beim Milkrun als primär organisatorisches Konzept vielseitig ausgeprägt sein. So ist grundsätzlich auch ein Staplereinsatz denkbar, jedoch werden aufgrund der erhöhten Arbeitssicherheit und flexibleren Nutzung der Transportkapazität zunehmend andere Transportmittel eingesetzt (Klug 2010, S. 275; Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 311). Daher umfasst das Merkmal neben dem Stapler die Ausprägungen Schleppzug, Niederhubwagen, handgeführter Transportwagen und Fahrerloses Transportsystem (FTS).

Die Ausprägung Schleppzug bezeichnet ein Transportsystem, welches aus einem Schlepper und Transportanhängern besteht (vgl. Abbildung 9, links). Ein Schlepper ist ein flurgebundener, frei verfahrbarer Unstetigförderer mit einer Kupplung und dient dem Ziehen von fahrbaren Lasten (DIN ISO 5053, S. 4). Schleppzüge kommen im innerbetrieblichen Milkrun über längere Transportstrecken zum Einsatz, da sie eine höhere Transportkapazität als Stapler aufweisen (Koether 2007, S. 42f.). Die maximale Anzahl manövrierbarer Anhänger hängt von der Zugkraft des Schleppers und den örtlichen Gegebenheiten ab. Häufig sind bis zu vier Trailer praktikabel (Klug 2010, S. 186). Als Trailer können eine Vielzahl an Varianten, wie z. B. Plattform- und Etagenwagen für KLT oder Paletten- und Trägerwagen für GLT angekuppelt werden, um den unterschiedlichen LT beim effizienten Transport gerecht zu werden (vgl. Heider-Peschel 2009, S. 27; Kiewitt 2011b, S. 38f.; Muckelberg 2006, S. 52; Saile, Wunderlich 2008, S. 51). Einer Studie der Technischen Universität München zufolge sind Etagenwagen für KLT sowie Plattformwagen für GLT die am häufigsten in der Industrie auftretenden Anhängerbauformen (Günthner 2012, S. 47). Nachteilig ist, dass Schleppzüge im Gegensatz zu Staplern kein Lastaufnahmemittel besitzen. Zum Beladen von GLT auf die Anhänger werden oft Gabelstapler oder Hubwagen eingesetzt. Bei der Verwendung von KLT erfolgt der Umschlag manuell durch den Materialbereitsteller. Somit ist je nach eingesetztem Trailertyp zur Bereitstellung z. B. eine Entnahme der KLT von Plattform-/Etagenwagen oder

ein Ab- und Ankuppeln von GLT auf Palettenwagen bzw. das Herausfahren dieser aus Trägerwagen durchzuführen.

Niederhubwagen mit Fahrerstand (auch Niederhub- oder Horizontal-Kommissionierer) können im Milkrun-System als Fördermittelausprägung für mittlere Bereitstellungsmengen eingesetzt werden. Sie verfügen über eine oder zwei Gabeln und können so bis zu drei GLT auf Palettenwagen hintereinander unterfahren und bodenfrei anheben (ten Hompel, Sadowsky, Beck 2011, S. 47). Der Fahrerstand ist nach vorne gerichtet, so dass eine Sichtbehinderung auf der Route ausgeschlossen ist (vgl. Abbildung 9, rechts). Niederhubwagen werden bisher nur selten eingesetzt, da die Transportkapazität in einem Bereich liegt, in dem bereits Schleppzüge eingesetzt werden können.



*Abbildung 9: Schleppzug (links) und Niederhubwagen mit Fahrerstand (rechts)
(Kiewitt 2011a, S. 34; ten Hompel, Sadowsky, Beck 2011, S. 47)*

Die Ausprägung des Fördermittels in Form eines handgeführten Transportwagens ist eher für Milkrun-Systeme mit kleineren Bereitstellungsmengen, wie sie z. B. in der Elektronikfertigung auftreten, geeignet (Smalley 2005, S. 56). Hierbei wird ein zumeist mit vier Rollen und einer Griffstange ausgestatteter Plattform- oder Etagenwagen (auch Kommissionierwagen genannt) vom Bereitstellmitarbeiter mit Muskelkraft bewegt (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 297f.). Die Form des Transportwagens kann ebenso wie Schleppzug-Trailer unternehmensspezifisch stark unterschiedlich ausgeprägt sein. Eine vierte Fördermittelausprägung stellt das FTS dar. So unterstützt die feste Routenführung und automatisierte Lastaufnahme und -abgabe eine stabile und standardisierte Materialbereitstellung (Röhrig 2002, S. 110). Gegenüber lasttragenden FTS kann die Transportkapazität durch lastziehende FTS als Schleppzüge erhöht werden (Klug 2010, S. 174; Peter, Wieser, Jung 2006, S. 55). Aufgrund der Flexibilität, Fehleranfälligkeit und Kosten sind FTS für den Einsatz in der Materialbereitstellung jedoch in vielen Unternehmen zugunsten mitarbeitergesteuerter Systeme ersetzt worden (vgl. Erlach 2010, S. 158).

Das Merkmal Quelle/Senke-Beziehung gibt Aufschluss über das Verhältnis von Quellen und Senken auf einer Transportroute. Bei einer „1 : 1“-Beziehung wird das Material in einem Kommissio-

nierbereich für den Transport zusammengestellt und an einer Senke bereitgestellt. Dies stellt den einfachsten Fall eines Milkrun-Transports dar. Weitaus häufiger und für einen Milkrun typisch ist die Ausprägung in Form einer „1 : n“-Beziehung anzutreffen. Material aus einem Kommissionierbereich wird über den Transport an mehreren Senken bereitgestellt (Nyhuis, Wiendahl, Wagner 2012, S. 297). Weniger typisch ist die umgekehrte Relation, bei der mehrere Kommissionierbereiche für die Versorgung einer Senke angefahren werden. Eine „m : n“-Beziehung bedeutet, dass von mehreren, räumlich getrennten Kommissionierbereichen entlang der Route Material aufgenommen und an mehreren Senken wieder abgegeben wird. Dies kann z. B. bei in der Route integrierten Vormontagen der Fall sein, oder wenn über die selbe Milkrun-Route auch der Rücktransport von Fertigwaren abgewickelt wird (Baudin 2004, S. 69f.; Takakuwa, Nomura 2003, S. 462).

Das Merkmal der Routenführung lässt sich in eine statische und dynamische Ausprägung unterteilen (Klug 2010, S. 186). In der Regel werden Milkrun-Systeme mit einer statischen Routenführung durchgeführt (Baudin 2004, S. 68). Hierbei fährt der Milkrun in jedem Zyklus ausnahmslos die gleiche Route, auch wenn an einigen Senken kein Material bereitzustellen ist und somit eine verkürzte Route gefahren werden könnte (Eriksson, Hanson 2008, S. 346). Dies kann in Abhängigkeit von der zu beliefernden Menge zu niedrigen Auslastungen der Züge führen (Kilic, Durmusoglu, Baskak 2012, S. 4). Positiv hervorzuheben ist jedoch die hohe Transparenz, Standardisierung und somit auch Routinebildung des Mitarbeiters. Bei der dynamischen Routenführung können kurzfristig Stopps an den Senken ausgelassen werden, wenn die Informationen über den Verbrauch der Senke dem Bereitstellmitarbeiter bekannt sind (Eriksson, Hanson 2008, S. 348). Die kann z. B. über eine elektronische Kanban-Steuerung erfolgen, bei der die Verbräuche nicht visuell, sondern elektronisch ermittelt werden, was jedoch häufig der angestrebten Transparenz entgegenwirkt.

3.6 Gestaltungsfeld Abgabe

Das Gestaltungsfeld Abgabe beschreibt mögliche Alternativen von Milkrun-Systemen bei der Materialanstellung an der Senke. Es unterteilt sich in die Merkmale Art der Feinverteilung, Art der Materialanstellung und Art der Leergutrückführung (vgl. Tabelle 7).

Merkmal	Ausprägung	
	Abgabe	
Art der Feinverteilung	Gekoppelt	Entkoppelt
Art der Materialanstellung	Manuell in Regal / Zuführung (Fachboden / Durchlauf)	Mit Transportmittel (Anhänger / Bodenroller)
Art der Leergutrückführung	Zu Leergutsammelstelle	Zur Wiederbefüllung mit Material

Tabelle 7: Gestaltungsfeld Abgabe

Die Art der Feinverteilung als Merkmal des Gestaltungsfelds kann analog zur Art der Kommissionierung gekoppelt oder entkoppelt ausgeprägt sein. Ist eine unmittelbare Abgabe des Materials an den einzelnen Verbrauchsorten an den Senken zeitlich und ergonomisch möglich und wird diese durch den Milkrun-Mitarbeiter durchgeführt, liegt eine gekoppelte Feinverteilung vor. Ist dies aufgrund der hohen Belieferungsfrequenz oder Behältermenge nicht möglich, liegt eine entkoppelte Feinverteilung vor (Takeda 2008, S. 193). Hier wird das Material nur in Verbrauchsnähe platziert und ein nachgelagerter Prozess übernimmt die Feinverteilung für einen räumlich begrenzten Montagebereich (Reuter 2009, S. 44).

Ebenfalls analog zur Art der Entnahme in der Kommissionierung stellt das Merkmal Art der Materialanstellung die räumliche Abgabe des Materials an den Senken dar. Die Pufferflächen bei der Materialanstellung dienen der Synchronisation zwischen dem unterschiedlichen Milkrun- und Montagetak (Klug 2010, S. 168). Unter der Ausprägung manuell in Regal/Zuführung (Zeilenlagerung) ist die Abgabe von Kleingebinden in Fachboden- oder Durchlaufregalen (z. B. Zuführschächte an den Arbeitsplätzen) zu verstehen (Bullinger, Lung 1994, S. 83). Alternativ können Materialien auf Transportmitteln, wie Paletten-/Etagenanhängern oder Bodenrollern an den Senken effizient im direkten Austausch bereitgestellt werden (Klug 2010, S. 272).

Das dritte Merkmal ist die Leergutrückführung mit zwei Ausprägungen. Bei einer oder mehreren Leergutsammelbereichen wird das an den Senken sukzessive eingesammelte Leergut vom Bereitstellmitarbeiter an dafür vorgesehenen, häufig sortenreinen Leergutstellplätzen abgestellt, um später gesammelt vorgelagerten Prozessen zurückgeführt zu werden (Klug 2010, S. 204). Erfolgt eine direkte Wiederauffüllung des Leerguts an der Quelle, ist keine Abgabe erforderlich (vgl. Takakuwa, Nomura 2003, S. 461). Das Leergut wird direkt zur Wiederbefüllung mit Material im nachfolgenden Kommissioniervorgang genutzt, so dass keine zusätzlichen Sortier- und Bündelungsaktivitäten erforderlich sind (Klug 2010, S. 272).

3.7 Morphologie innerbetrieblicher Milkrun-Systeme

Die zuvor beschriebenen Gestaltungsfelder innerbetrieblicher Milkrun-Systeme mit ihren Merkmalen und Ausprägungen können zusammenfassend in einem morphologischen Kasten dargestellt werden (vgl. Tabelle 8).

Merkmal	Ausprägung				
Bereitstellungselement					
Bereitstellungsstufe	Zwischen Lager und Arbeitsplatz	Zwischen Lager und Supermarkt	Zwischen Supermarkt und Arbeitsplatz	Zwischen Arbeitsplatz und Fertigwarenlager	
Bereitstellungsgut	Baugruppen / Bauteile		Werkzeuge und Vorrichtungen		Fertigwaren
Ladungsträger					
Art der Ladungsträger	Kleinladungsträger		Großladungsträger		Keine Ladungsträger
Steuerung					
Auslösungsart	Fester Zeitpunkt (bei variabler Menge)		Feste Menge (bei variablem Zeitpunkt)		Feste Menge, fester Zeitpunkt (bei variablen Rückläufen)
Signalart	Verbrauchsorientiert		Bedarfsorientiert		Hybrid
Kommissionierung					
Art der Kommissionierung	Gekoppelt			Entkoppelt	
Art der Entnahme	Manuell aus Regal (Fachboden / Durchlauf)		Manuell von Großbinde (Bodenlagerung)		Mit Transportmittel (Anhänger / Bodenroller)
Zusatzleistungen	Materialbuchung (Werkstattbestand)	Entfernung von Ladungssicherung	Entfernung von Verpackungsmaterial	Keine Zusatzleistungen	
Transport					
Art des Transports	Stapler	Schleppzug	Niederhubwagen	Handgeführter Transportwagen	FTS
Quelle/Senke-Beziehung	1 : 1		1 : n		m : n
Routenführung	Statisch			Dynamisch	
Abgabe					
Art der Feinverteilung	Gekoppelt			Entkoppelt	
Art der Materialanstellung	Manuell in Regal / Zuführung (Fachboden / Durchlauf)			Mit Transportmittel (Anhänger / Bodenroller)	
Art der Leergutrückführung	Zu Leergutsammelstelle			Zur Wiederbefüllung mit Material	

Tabelle 8: Morphologie innerbetrieblicher Milkrun-Systeme

4 Herleitung eines Planungskonzepts für innerbetriebliche Milkrun-Systeme

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt die Erarbeitung eines Ansatzes zur Planung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme. Hierzu werden zunächst die Grundlagen der Planung und Modellbildung erläutert. Anschließend sind bestehende Ansätze aus der Literatur auf ihre Eignung für die Planung von innerbetrieblichen Milkrun-Systemen zu überprüfen. Hieran schließt die Konzeptionierung eines analytischen Planungsvorgehens, welcher die Optimierung einer Zielgröße unter Berücksichtigung dreier Planungsdimensionen verfolgt. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung relevanter Einflussgrößen auf die eingeführten Planungsdimensionen im innerbetrieblichen Milkrun.

4.1 Untersuchung der Eignung bestehender Planungsansätze

Da in der Praxis geeignete Bereitstellkonzepte, wie der innerbetriebliche Milkrun, häufig aufgrund von Erfahrungswissen und einfachen Überschlagsrechnungen ermittelt werden, kommt einer objektivierten, systematischen Planung eine hohe Bedeutung zu (Ciemnoczolowski 2007, S. 3; Heinz, Mayer, Grünz 2002, S. 531). In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zu Planungssystematiken, welche ggf. Hinweise über ein geeignetes Vorgehen zur Planung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme geben können. Sie lassen sich in allgemeine Vorgehensmodelle und mathematische Entscheidungsmodelle unterteilen.

4.1.1 Allgemeine Vorgehensmodelle

In der vielfältigen Literatur zu Planungssystematiken stellen Vorgehensmodelle eine häufig anzutreffende Form dar. Sie beschreiben eine in der Regel in Planungsphasen unterteilte Sequenz an Arbeitsschritten, welche zur erfolgreichen Durchführung einer Planung erforderlich sind (Burghardt 2012, S. 149f.; Ludewig, Lichter 2010, S. 184ff.). Den einzelnen Phasen sind spezifische Methoden zur Analyse, Gestaltung und Bewertung zugeordnet (Sommer, Marrenbach, Wehking 2009, S. 57). Zur Planung der Materialbereitstellung existieren jedoch nur wenige Ansatzpunkte, welche zum Teil in übergeordnete Systematiken für die Montage- oder Materialflussplanung eingebettet sind.

So berücksichtigt die REFA-Planungssystematik Materialbereitstellungsaspekte im Rahmen der dritten (Arbeitssystem konzipieren) und vierten Stufe (Arbeitssystem detaillieren), geht hierbei jedoch nicht im Detail auf konkrete Planungsschritte ein (REFA 2002, S. 101ff.). Grob und Haffner (1982, S. 34f.) folgen einer ähnlichen Vorgehensweise, beschränken sich in ihrer Betrachtung jedoch auf die Planung von Montagesystemen mit wenigen Hinweisen auf materialbereitstellungsbezogene Aspekte (vgl. Grob, Haffner 1982, S. 155). Bullinger (1986, S. 51) widmet der Materialbereitstellung eine größere Bedeutung. Sie untergliedert sich hier in die drei Planungsteile Organisation, Technik und Abläufe, wobei unterschiedliche Materialbereitstellungsstrategien in Abhängigkeit von Montagesystemalternativen bewertet werden (Bullinger 1986, S. 174ff.). Aspekte der Materialbereitstellung, wie z. B. Anlieferzustände, Behälterkonzepte oder Transportsysteme, werden bei

Konold und Reger (2009, S. 36ff.) bereits in der Datenanalyse berücksichtigt, eine konkrete Vorgehensweise zur Planung der Prozesse wird jedoch nicht beschrieben.

Im Rahmen der Materialflussplanung beschreiben Kettner, Schmidt und Greim (1984, S. 165) in ihrem Leitfaden zur Fabrikplanung eine systematische Vorgehensweise zur Materialflussuntersuchung und beschreiben allgemeine Leitsätze und Checklisten zur Materialflussgestaltung. Stolz (1988, S. 35ff.) formuliert eine Systematik zum Aufbau einer anforderungsgerechten Materialbewirtschaftung der Montage, beschränkt sich hierbei jedoch in erster Linie auf die Planung und Integration von Lager- und Kommissioniersystemen. Ähnlich zu REFA postuliert Jünemann (1989, S. 56) eine 7-Stufen-Systematik für die Planung von Materialflusssystemen. Pawellek (2007, S. 145ff.) beschreibt eine Vorgehensweise zur ganzheitlichen Planung der Produktionslogistik und gibt weiter konkrete Planungshinweise für Lager- und Transportsysteme (Pawellek 2008, S. 190ff.). Bullinger und Lung (1994, S. 224ff.) entwickeln einen Leitfaden für die Planung der Materialbereitstellung. Der Ansatz fokussiert zum einen die technisch-wirtschaftliche Gestaltung und zum anderen die Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Fragestellungen.

Es zeigt sich jedoch, dass allgemeine Planungssystematiken bezüglich der Materialbereitstellung über die Montage hinaus lediglich allgemeine Hinweise geben (Eich 2001, S. 27). Aufgrund der geringen Detailliertheit wird der Aspekt der Materialbereitstellung nur unzureichend behandelt (Nickel 2008, S. 78). Milkrun-spezifische Aspekte, wie Einflussfaktoren auf ein solches System oder quantifizierbare Wirkzusammenhänge, finden in keinem der oben angeführten Ansätze Berücksichtigung. Daher eignen sich allgemeine Planungssystematiken nicht, um eine detaillierte Planung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zu unterstützen.

4.1.2 Mathematische Entscheidungsmodelle

Im Rahmen einzelner Planungsschritte können speziell auf den konkreten Planungsfall bezogene, mathematische Entscheidungsmodelle als Planungshilfsmittel zur Anwendung kommen, welche konkrete unternehmensspezifische Daten berücksichtigen und so dem Planer mittels mathematischer Formulierungen individuelle Entscheidungsvorlagen bereitstellen (Jobi, Neuhäuser, Sommer 2009, S. 172f.; ten Hompel, Schmidt, Nagel 2007, S. 326ff.).

Hinsichtlich der konkreten Planung von Materialbereitstellungsprozessen existieren jedoch wenige mathematische Ansätze. Da auch Grünz (2004, S. 50) zu dem Schluss kommt, dass bestehende Vorgehensmodelle keinen geeigneten Detaillierungsgrad aufweisen, um die Komplexität unterschiedlicher Materialbereitstellungsstrategien abzubilden, entwickelt er hieraus ein auf Zeiten und Kosten ausgelegtes, mathematisches Bewertungs- und Optimierungsmodell auf Basis genetischer Algorithmen. Spezifische Konzepte, wie der innerbetrieblichen Milkrun, werden in seinem Modell jedoch nicht abgebildet.

Ein ähnliches Modell entwickelt Nickel (2008, S. 83ff.) durch die mathematische Modellierung der Materialverfügbarkeit in der Materialbereitstellung für die Montage auf Basis der Komplettierungskurven nach Kettner (1976, S. 220ff.). Kern der Betrachtung ist die Erweiterung des Modells zu

einem über beliebig viele Produktionsaufträge aggregierten Bereitstellungsdiagramm, dessen Kurvenverlauf mittels Simulationsexperimenten angenähert wird. Durch die Aggregation sind Aussagen über einzelne Materialbereitstellungsprozesse nicht mehr möglich.

Die im Rahmen der Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme existierenden Ansätze beschränken sich auf die Optimierung einzelner technisch-organisatorischer Aspekte. So ergänzen Vaidyanathan et al. (1999, S. 1083) das etablierte Tourenplanungsproblem mit einer weiteren Kapazitätsbedingung, um Wartezeiten des Transportmittels und Bestände an den Arbeitsstationen zu minimieren.

Takakuwa und Nomura (2003, S. 461f.) entwickeln einen Ansatz zur optimalen Auslegung der Behälteranzahl für jedes bereitzustellende Teil in einem Milkrun-System unter den Randbedingungen Taktzeit des Materialbereitstellers, maximale Kommissionierzeit der Behälter, Anzahl Teile je Produkt sowie Behältermenge je Teil. Ziel ist es, die minimale Anzahl an Behältern im Montagesystem, dem Work in Progress (WIP), zu finden, die gerade ausreicht, um bei gegebenen Taktzeiten des Bereitstellers Materialabrisse (Starvation) an den Arbeitsstationen zu vermeiden. Die optimale Lösung wird in ihrem Konzept aufgrund der wechselnden Behälterverbräuche mittels Simulation angenähert (Nomura, Takakuwa 2006, S. 158ff.).

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Ciernoczolowski (2007, S. 30ff.), indem er in Abhängigkeit von der Taktzeit und Transportkapazität des Milkrun die minimale Anzahl an Kanban-Karten im System bestimmt, bei der die Arbeitsstationen ohne Materialabriss versorgt werden. Es zeigt sich, dass vor allem die Transportkapazität in Kombination mit ausreichender Anzahl an Kanban-Karten einen positiven Einfluss auf die Vermeidung von Materialengpässen an den Arbeitsstationen hat (Ciernoczolowski 2007, S. 52f.). Weiterhin betrachtet er den Einfluss von Milkrun-Routen auf die Fabriklayoutplanung und bestimmt ein auf kürzesten Milkrun-Routen basierendes Blocklayout (Ciernoczolowski 2007, S. 71ff.).

Eriksson und Hanson (2008, S. 347f.) schlagen einen auf ereignisdiskreter Simulation basierenden Leistungsvergleich hinsichtlich Ausführungszeiten und Transportmittelauslastung zwischen statischer und dynamischer Routenführung (vgl. Abschnitt 3.5) von Milkrun-Systemen vor. Eine Modellierung wird in ihrem Beitrag jedoch nicht beschrieben.

Durch die Simulation eines Milkrun-Systems in der Elektronikfertigung können Costa et al. (2008, S. 439ff.) den Mitarbeiter- und Betriebsmitteleinsatz reduzieren. Ein Kapazitätsplanungskonzept für innerbetriebliche Milkruns geben Abele und Brungs (2009, S. 61ff.) an. Neben einer einfachen analytischen Kapazitätsberechnung werden zwei Entwicklungsstufen eines Milkruns zur Optimierung der Materialbereitstellung dargestellt, die jedoch nur auf den Anwendungsfall der Werkstattfertigung bezogen werden.

Dreher, Nürnberger und Kulus (2009, S. 132) erarbeiten ein Tool zur Minimierung der Transportzeiten, des Transportmitteleinsatzes und Betriebskosten auf Basis verschiedener Heuristiken. Meinhardt, Schmidt und Daferner (2011, S. 512f.) schlagen ein Berechnungsverfahren zur Einsatzplanung von Milkrun-Systemen vor, welches vom Einsatz aufwändiger Simulationsstudien absieht.

Ausgehend von einem Hallenlayout wird hierbei ein Wegenetz gebildet, bei dem Materialien, Liefermengen sowie prozessbezogene Parameter, wie Handhabungszeiten und Transportkapazitäten, den Quellen und Senken zugeordnet werden (Schmidt, Meinhardt 2012, S. 31). Ergebnis ist die optimale Anzahl an Routenzügen mit der entsprechenden Taktzeit. Die Methodik dient als erste Entscheidungsgrundlage in frühen Planungsphasen für weitere Kosten- und Strategiebetrachtungen.

Kilic, Durmusogla und Baskak (2012, S. 4) stellen ein Modell vor, bei dem die fixen und variablen Transportmittelkosten in Abhängigkeit von der Zuordnung zu statischen und dynamischen Routen bei gegebenen Taktzeiten minimiert werden. Satoglu und Sahin (2012, S. 4) stellen ein modifiziertes Vehicle Routing Problem vor, welches Aufnahmen und Abgaben von LT berücksichtigt. Ziel ihrer Modellierung ist die Berechnung einer Route und Zykluszeit, welche die gesamten Handhabungs- und Lagerungskosten minimiert.

Ziel der bestehenden Ansätze ist es häufig, unter gegebenen Randbedingungen betriebswirtschaftliche Größen, wie Investitions- und Betriebskosten oder Handhabungs- und Lagerungskosten, zu optimieren. Hier zeigt sich eine Prozessorientierung nur in geringem Maße. Andere Ansätze fokussieren das Ziel, die Menge des im System befindlichen Materials zu minimieren, die Auslastung der Transportmittel zu maximieren. Dabei ist häufig nicht klar, wie einzelne Parameter des Modells, wie z. B. die Handhabungszeiten, ermittelt werden. Es ist anzunehmen, dass hierfür weitere Analysen im Vorfeld stattfinden müssen, um diese Parameterausprägungen zu erhalten.

Zudem fokussieren alle Ansätze rein technisch-organisatorische Belange und vernachlässigen humanorientierte Aspekte, wie die körperliche Belastung der Bereitstellmitarbeiter. Es zeigt sich, dass die bestehenden Ansätze zur unternehmensspezifischen Planung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme einen ausreichenden Detaillierungsgrad und die Berücksichtigung des Faktors Mensch vermissen lassen. Somit ist aus wissenschaftlicher Sicht die Entwicklung eines neuen Planungskonzepts erforderlich, welcher diesen Anforderungen gerecht wird.

In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt die Konzeption eines Planungsmodells für innerbetriebliche Milkrun-Systeme. Aufbauend auf den Anforderungskriterien an das Planungsmodell werden die Zielgrößen des Modells und zu berücksichtigende Planungsdimensionen als Randbedingungen hergeleitet. In der Darstellung wird zunächst auf die inhaltliche Konzeption des Planungsmodells eingegangen, ohne die konkrete mathematisch-technische Umsetzung zu berücksichtigen. Diese erfolgt in Kapitel 5 auf Basis des hier erarbeiteten Ansatzes.

4.2 Anforderungen an ein Planungsmodell

Die Anforderungen an das zu erarbeitende Planungsmodell hängen in erster Linie vom Modellzweck ab. Dieser muss zunächst geklärt sein, um daraus die für die Modellbildung erforderlichen Anforderungen ableiten zu können.

Zweck des Modells ist es, auf Basis von gegebenen unternehmensspezifischen Randbedingungen die Planung und Auslegung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zu unterstützen. Durch das Modell werden in der Grobplanungsphase schnell und aufwandsarm erste Lösungen generiert, die durch

den Planer in einem nachfolgenden Schritt detailliert und angepasst werden können. Durch die Variation unternehmensspezifischer Randbedingungen können zudem Lösungsalternativen verglichen werden und in den Entscheidungsprozess mit einfließen.

Dieses Ziel stellt somit eine Reihe an Anforderungen an das zu entwickelnde Planungsmodell. So müssen die relevanten unternehmensspezifischen Einflussgrößen auf ein Milkrun-System Berücksichtigung finden. Hierbei werden neben technisch-organisatorischen auch mitarbeiterbezogene Einflussgrößen in die Betrachtung einfließen, da diese in den bestehenden mathematischen Planungsansätzen keinerlei Berücksichtigung finden (vgl. Abschnitt 4.1.2). Besonders die körperlichen Belastungen der Bereitstellmitarbeiter bei manueller Handhabung der LT stellen eine wichtige Randbedingung bei der Optimierung dar (Goldscheid 2008, S. 2; Hempen, Finke, Deuse 2009, S. 259f.). Zudem steht ein Milkrun-System als offenes System in Interaktion mit der Systemumwelt, so dass sowohl Milkrun-spezifische, d. h. durch das System selbst beeinflussbare, als auch externe, d. h. auf den Milkrun von außen einwirkende, Einflussgrößen berücksichtigt werden müssen.

Eine weitere Anforderung ist es, dem Planer durch die Ausprägung der erforderlichen unternehmensspezifischen Randbedingungen, welche im Modell verarbeitet werden, eine Vorgabe zu geben, damit keine relevanten Einflussgrößen unberücksichtigt bleiben können. Dies ist insofern eine wichtige Anforderung, da bei einer manuellen, tabellenorientierten Planung zu viele Fehlerquellen auftreten können (vgl. Bierwirth 2004, S. 147). Zudem führen stetige Veränderungen von Prozessen in der Montage, wie steigende Variantenanzahlen, veränderte Produkt- und somit LT-Geometrien oder Änderung der Montagereihenfolge, zu sich schnell ändernden Anforderungen in der Materialbereitstellung (Bischoff, Barthel, Eisele 2007, S. 128f.). Hier stellt sich die Anforderung einer effizienten Planung, die dem Planer möglichst aufwandsarm zu mehr oder weniger konkreten Szenarien erste Ergebnisse liefert und einen Beitrag zu einer permanenten Planungsbereitschaft leistet (ten Hompel, Schmidt, Nagel 2007, S. 322).

Zudem eignet sich diese Struktur, spezifisches Methodenwissen des Industrial Engineering, wie z. B. in den Bereichen Zeitwirtschaft oder Ergonomie, im Modell abzubilden. Dies objektiviert die häufig in der manuellen Planung auftretenden Expertenmeinungen und einfachen Faustregeln und schafft eine integrierte Datenlage auf Basis anerkannter Industrial Engineering-Methoden. Somit ist spezifisches Methodenwissen für den Planer nicht zwingend erforderlich, da die Eingabe von Einflussgrößen nicht auf der Ebene bestimmter Methoden, sondern höher aggregierter Gestaltungsmerkmale, wie LT-Eigenschaften, erfolgt.

Viele dieser Anforderungen stehen aufgrund der ihr innewohnenden Komplexität jedoch im Konflikt mit der einfachen Anwendbarkeit und Transparenz des Modells. Hierbei soll das Modell als Entscheidungsunterstützung fungieren, bei dem der Planer die Entscheidungsgewalt behält und nicht im Sinne einer Entscheidungsautomatisierung die Lösungsfindung dem Modell überlässt (vgl. Feige, Klaus 2008, S. 23ff.). So ist es erforderlich, die Komplexität der abgebildeten Realität so zu reduzieren, dass zum einen die relevanten Einflussgrößen für den Modellzweck ausreichend detail-

liert modelliert werden. Zum anderen darf eine nicht mehr interpretierbare Anzahl an Stellgrößen und Abhängigkeiten die Handhabbarkeit des Modells nicht beeinträchtigen. Daher sind im weiteren Modellierungsverlauf sinnvolle Annahmen und Einschränkungen zu treffen.

4.3 Herleitung der Zielgröße für die Planung

Zur strukturierten Planung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme ist es erforderlich, Zielgrößen festzulegen, nach denen sich der Planungsprozess ausrichten kann. Bisherige Ansätze zur Planung umfassen in der Regel mathematische Entscheidungsmodelle, welche die Maximierung bzw. Minimierung bestimmter Größen zum Ziel haben (vgl. Abschnitt 4.1.2). So stehen häufig die Minimierung von Investitions- und Betriebskosten im Vordergrund, welche durch Verbesserung der Mitarbeiter- und Betriebsmittelauslastung (z. B. in Form von Wartezeitenreduzierung) erzielt werden können. Andere Ansätze bestimmen bei gegebener Taktzeit des Milkrun ein Minimum an Material im Arbeitssystem, ohne Versorgungsabbrisse (Starvation) an einzelnen Arbeitsplätzen hervorzurufen.

Durch die Minimierung von Investitions- und Betriebskosten können zwar möglichst ressourcenoptimale Materialbereitstellungsprozesse geplant werden, jedoch kann die Fokussierung auf die Optimierung der eigenen Prozesse zu einer suboptimalen Lösung des Kundenprozesses Montage führen. Die Reduzierung der Bestände im Arbeitssystem stellt dagegen eine geeignete Zielgröße dar, welche jedoch in Abhängigkeit einer zuvor zu ermittelnden, festen Taktzeit des Milkrun-Systems bestimmt wird.

Es zeigt sich, dass die Anforderungen und Charakteristika der Montage in einem nicht ausreichenden Maße in die existierenden Ansätze einfließen. Dies ist jedoch für die Planung eines den Montageprozess möglichst optimal unterstützenden Bereitstellungssystems zwingend erforderlich (Meißner, Günthner 2009, S. 282; Schneider 2008, S. 60). Daher wird im Folgenden die Zielgröße für die Planung von den Anforderungen der Montage abgeleitet.

Theoretische Grundlage hierfür stellt das häufig in der Automobilindustrie angewandte Line Back-Prinzip. Hierbei werden, ausgehend von den Anforderungen des Kunden Montage, sukzessive die vorgelagerten Prozesse über die Bereitstellung, das Wareneingangslager und den Transport bis zum Lieferanten geplant. Ziel ist die Sicherstellung optimaler Verhältnisse am Ort der höchsten Wertschöpfung (Ihme 2006, S. 50; Schneider 2008, S. 60).

Bezogen auf die Materialbereitstellung bedeutet dies, dass die Anforderungen der Montage hinsichtlich einer ergonomischen, prozesssicheren und wertschöpfungsorientierten Bereitstellung in der Planung berücksichtigt werden müssen (Klug 2010, S. 80). So sind dem internen Kunden Montagemitarbeiter alle erforderlichen Materialien zu der Zeit und in genau der Form zur Verfügung zu stellen, die er für einen idealen Montageprozess benötigt (Boppert, Schedlbauer, Günthner 2007, S. 349). Es gilt, die wertschöpfenden Montagezeiten zu erhöhen und gleichzeitig die Wege-, Such- und Greifzeiten des Montagemitarbeiters zu minimieren (Schedlbauer, Tenerowicz 2007, S. 50).

Somit ergibt sich aus den materialbestandsbezogenen Anforderungen der Montage eine Zielgröße für die Planung von Milkrun-Systemen (vgl. Abbildung 10).

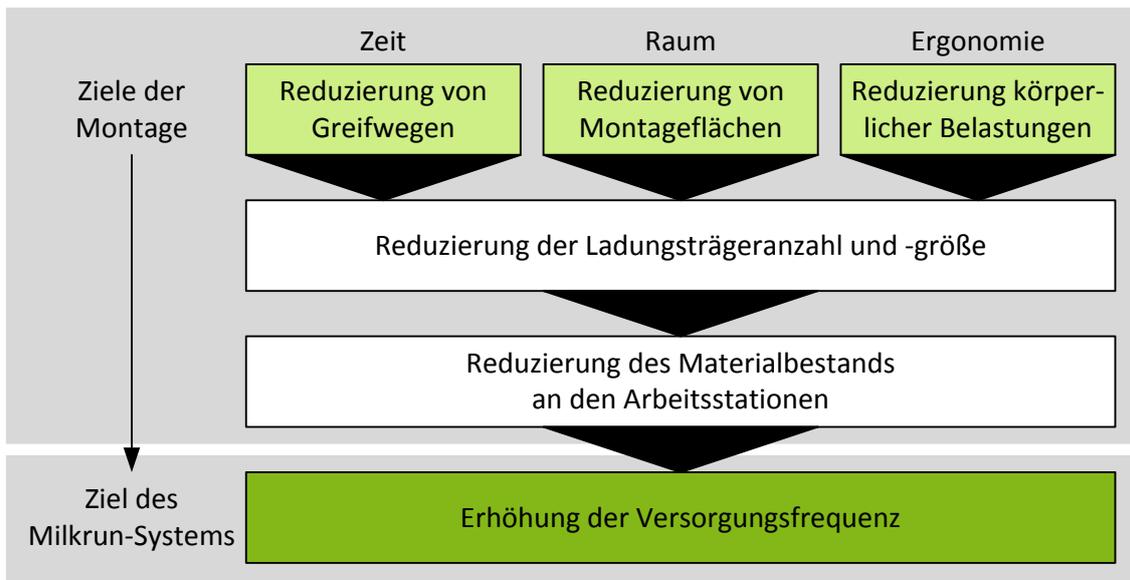


Abbildung 10: Herleitung der Planungszielgröße des Milkrun-Systems

Die Reduzierung von Greifwegen zielt auf den Faktor Zeit im Montageprozess ab. Durch eine möglichst fügeortnahe Bereitstellung werden die Greifweiten vom Materialbehälter zum Fügeort reduziert, was wiederum die dafür erforderlichen Zeiten verringert. Dabei sollte der Greifbereich eines Montagemitarbeiters 80 cm nicht überschreiten, da ansonsten ggf. zeitbeanspruchende Körperunterstützungen oder gar Schritte erfolgen müssen. Jede noch so kleine Reduzierung der Greifwege kann bei gegebenem Takt über die Lebenszykluszeit eines Produktes zu erheblichen Einsparungen führen (Klug 2010, S. 168). Diese Anforderung kann durch eine Verkleinerung der bereitgestellten LT erzielt werden, da diese meist näher an den Fügeort platziert und zudem aufgrund der Abmaße über kürzere Greifwege Teile entnommen werden können (vgl. Wänström, Medbo 2009, S. 31f.).

Eine Reduzierung von Montageflächen zielt auf den Faktor Raum in der Montage ab. Da stetig versucht wird, die Flächenproduktivität in der Montage zu erhöhen, müssen Bereitstellflächen optimal dimensioniert sein (Bukchin, Meller 2005, S. 51; Seeck 2010, S. 125). Die Montage verlangt eine flächeneffiziente Art der Bereitstellung, so dass die Anlieferung von platzeinnehmenden Großbinden an den Arbeitsstationen möglichst zu vermeiden ist. Dies führt zu einer Reduzierung der LT-Anzahlen und -Größen in Richtung KLT, die zumeist durch den Einsatz von Durchlaufregalen eine weitaus höhere Flächeneffizienz und eine verbesserte Teilepräsentation für den Montagemitarbeiter nach sich ziehen (Klug 2010, S. 168). Weiterhin werden hierdurch lange Wege und Suchvorgänge vermieden, so dass durch die positive Beeinflussung des Faktors Zeit die Montageeffizienz steigt (Röhrig 2002, S. 61).

Eine Reduzierung körperlicher Belastungen zielt auf den Faktor Ergonomie in manuellen Montagesystemen ab. Aufgrund der Taktgebundenheit vieler Montagesysteme führen repetitive Tätigkeiten zu hohen und häufig einseitigen Belastungen der Mitarbeiter (Landau et al. 2001, S. 15). Durch eine ergonomische Bereitstellung des Materials am Arbeitsplatz können diese Belastungen auf ein adäquates Maß reduziert werden. Zu den Zielen zählen die Vermeidung von übermäßigen Lastgewich-

ten sowie von Beuge-, Streck- und Drehbewegungen des Rumpfs bei der Materialentnahme (Klug 2010, S. 169f.). So werden ebenfalls durch eine Umstellung der Behälter von GLT auf KLT-Größen z. B. Beugevorgänge in Gitterboxen oder Drehbewegungen beim Greifen vom Material auf einer Europalette hinter dem Mitarbeiter vermieden, da Material in kleinen Behältern über kurze Wege direkt am Fügeort gegriffen werden kann (vgl. Erlach 2010, S. 292).

Eine Reduzierung der LT-Größen allein würde in vielen Fällen jedoch nicht zum gewünschten Effekt führen. Besonders für eine hohe Flächeneffizienz ist auch eine Reduzierung der LT-Anzahl in der Montage erforderlich, was einer Reduzierung des Materialbestands an den Arbeitsstationen gleichkommt. Weniger Materialbestand in der Montage führt bei ansonsten konstanten Randbedingungen somit schneller zu Materialabrissen. Daher muss die Versorgungsfrequenz der Arbeitsstationen steigen, um stets ausreichend Material zur Montage verfügbar zu haben (vgl. Abbildung 11).

Wird diese Kausalkette invertiert, lässt sich schließen, dass durch eine möglichst hohe Versorgungsfrequenz die Bestände im Arbeitssystem durch geringere LT-Anzahlen und -Größen reduziert werden können und somit über die Verbesserung der Faktoren Zeit, Raum und Ergonomie zu einer wertschöpfungsorientierten Montage maßgeblich beitragen. Hieraus ergibt sich das Ziel des Planungskonzepts in der Maximierung der Versorgungsfrequenz, was gleichbedeutend mit der Minimierung der Milkrun-Taktzeit ist. Je kürzer die Taktzeit angesetzt wird, desto geringer wirken sich zudem Abrufspitzen aus (Klug 2010, S. 275).

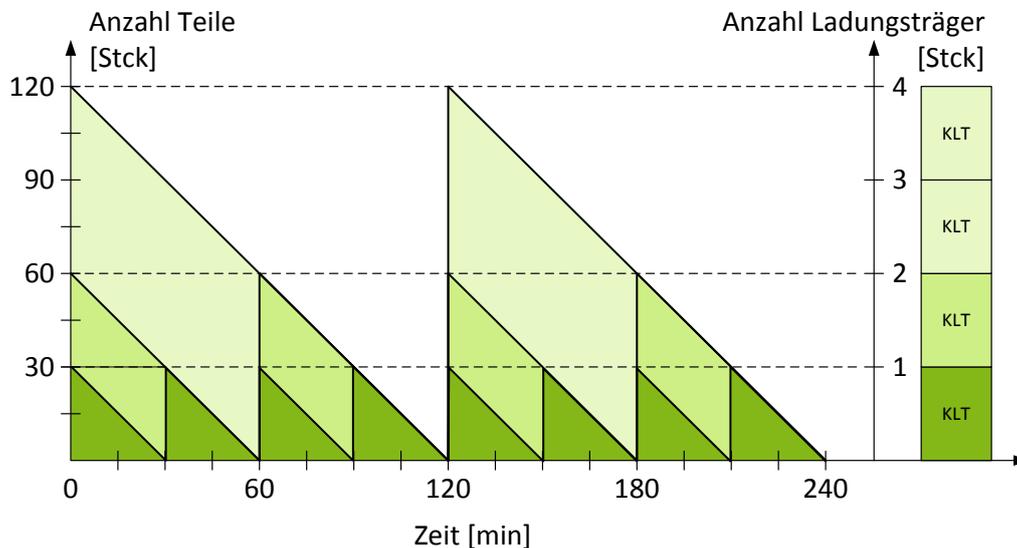


Abbildung 11: Idealisierter Bestandsverlauf an einer Arbeitsstation
(in Anlehnung an Nyhuis, Wiendahl 2012, S. 251)

Dies bedeutet jedoch in letzter Konsequenz nicht, dass eine infinitesimal kleine Taktzeit als optimaler Zustand anzustreben ist. Vielmehr ist der Idealzustand derart anzusehen, dass die optimale Taktzeit des Milkrun-Systems identisch ist mit der des Montagesystems. In diesem Fall erfolgt in jedem Montagetak eine Bereitstellung der genau für diesen Takt erforderlichen Menge an Material. Da sich Montagetak und Milkrun-Takte in der industriellen Praxis jedoch in der Regel stark unter-

scheiden, ist eine montagetaktsynchrone Milkrun-Taktzeit in vielen Fällen nicht wirtschaftlich oder gar technisch-physikalisch nicht möglich. Somit stellt sich die Frage, welche minimale Taktzeit für ein Milkrun-System unter gegebenen Randbedingungen erzielt werden kann. Diese Frage bildet im weiteren Verlauf die Zielgröße der Planung.

4.4 Herleitung der zu berücksichtigenden Planungsdimensionen

Die Formulierung einer geeigneten Prozesszielgröße allein ist jedoch für die Milkrun-Planung nicht ausreichend. Eine Auslegung ohne die Berücksichtigung systemrelevanter Rahmenbedingungen würde zu suboptimalen Ergebnissen führen, da keinerlei Annahmen über die Grenzen des Systems getroffen werden. Aufgrund der zeitlichen Taktgebundenheit des Systems und der physikalisch begrenzten Kapazität des Transportmittels müssen zeitliche und kapazitive Randbedingungen berücksichtigt werden, damit ein Milkrun-System technisch und organisatorisch stabil realisiert werden kann. Zudem ist im Rahmen der manuellen Handhabung der LT auf die Ergonomie der Bereitstellmitarbeiter ebenso zu achten, wie in der Montage. Aus systemtheoretischer Sicht wird das Milkrun-System hinsichtlich verschiedener Systemaspekte betrachtet, die aufgrund einer Filterung bestimmte Eigenschaften von Elementen bzw. Beziehungen zwischen den Elementen gegenüber anderen in den Vordergrund stellen (Haberfellner et al. 2012, S. 39) (vgl. Abbildung 12).

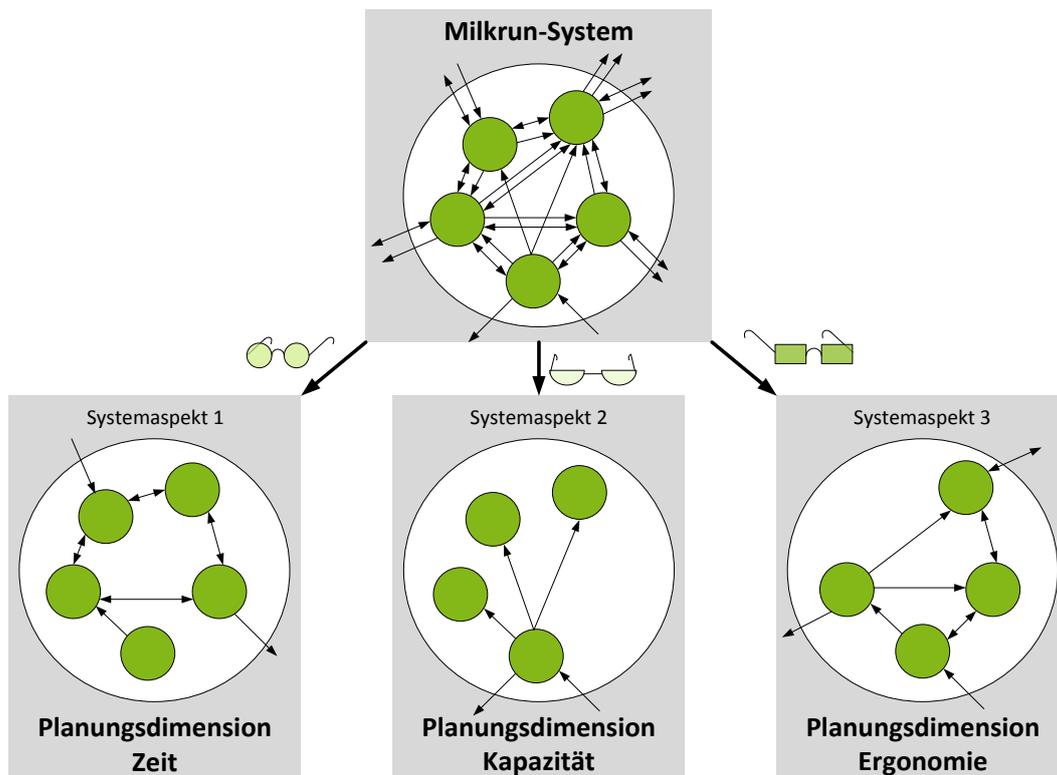


Abbildung 12: Systemtheoretische Sicht der Planungsdimensionen als Systemaspekte
(in Anlehnung an Haberfellner et al. 2012, S. 39)

Im Rahmen des Projekts werden daher die drei Planungsdimensionen Zeit, Kapazität und Ergonomie eingeführt, welche die Randbedingungen, unter denen eine minimale Taktzeit möglich ist,

darstellen und ggf. einschränken. Eine Planungsdimension stellt in diesem Kontext eine bei der Planung zu berücksichtigende und von systeminternen und -externen Einflussgrößen abhängige Größe dar, welche Auswirkungen auf die Zielgröße und somit das Planungsergebnis hat. Diese Planungsdimensionen werden nachfolgend näher beschrieben.

4.4.1 Planungsdimension Zeit

Der Faktor Zeit spielt, wie in vielen anderen Unternehmensbereichen, auch in der Materialbereitstellung eine herausragende Rolle (Droste, Deuse 2011, S. 607f.). So ist eine zeitpunktgenaue Bereitstellung für die Montage erstrebenswert, da so Bestände im System minimiert und Durchlaufzeiten optimiert werden. Durch die enge Verknüpfung zwischen Materialbereitstellung und Montage ist eine zeitliche Bewertung der Materialbereitstellungsprozesse sinnvoll, um den Zielen einer zeitpunktgenauen Materialanlieferung gerecht zu werden. Zeitdaten dienen des Weiteren zur Ableitung von Gestaltungshinweisen technisch-organisatorischer als auch ergonomischer Zielsetzungen (Heinz, Grünz, Mayer 2003, S. 24).

Für ein getaktetes Milkrun-System stellt der Faktor Zeit jedoch eine weitaus größere Bedeutung dar. Im Kontext der anzustrebenden Zielgröße für die Planung ist es daher erforderlich, weitere Zeitbegriffe einzuführen (vgl. Abbildung 13).

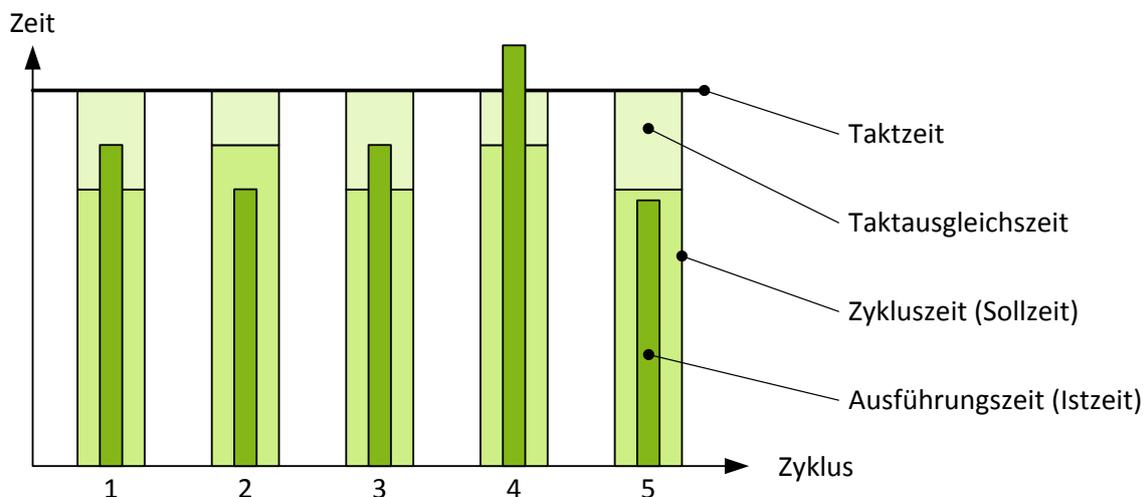


Abbildung 13: Zeitbegriffe im Kontext innerbetrieblicher Milkrun-Systeme
(in Anlehnung an Deuse, Busch 2012, S. 92)

Die Taktzeit ist das geplante Zeitintervall, in welchem sich der Milkrun-Zyklus wiederholt (Günthner 2012, S. 17). Die Zykluszeit stellt die Summe der in einem Milkrun-Zyklus geplanten Einzelzeiten dar (Hopp, Spearman 2008, S. 327f.). Anders als in der Montage schwanken diese Zeiten geplant (geplante Variabilität), da nicht in jedem Zyklus die gleiche Anzahl an LT angeliefert werden muss. Die Taktzeit kann mit der Zykluszeit des Milkrun-Systems identisch sein. Häufig wird jedoch die Taktzeit höher angesetzt. Die Differenz wird Taktausgleichszeit genannt und stellt für den Milkrun-Mitarbeiter eine Wartezeit auf den nächsten Zyklus dar (Roscher 2008, S. 22). Dies

dient zum einen dazu, dass Schwankungen der Zykluszeit die Taktzeit nicht beeinflussen und zum anderen kann z. B. eine errechnete minimale Zykluszeit von 13,78 min durch die Taktausgleichszeit auf 15 min angehoben werden, so dass sich ein für alle Beteiligten einfach hochzurechnender Milkrun-Takt ergibt. Die Taktzeit ist die entscheidende Größe für die Wiederbeschaffungszeit. Ziel des Ansatzes ist es daher, die Taktzeit des Milkrun-Systems zu minimieren.

Darüber hinaus können die tatsächlichen Ausführungszeiten (Istzeiten) in Abhängigkeit von z. B. individueller Leistungsdisposition der Mitarbeiter oder Behinderungen anderer Fördermittel auf der Route schwanken, sollten jedoch die vorgegebene Taktzeit nicht überschreiten. Solche Verspätungen müssen in den nachfolgenden Zyklen ausgeglichen werden (Ciemnoczolowski 2007, S. 6f.). Je nach bestehender Sicherheitsreichweite (oder Sicherheitsbestand) an den Arbeitsstationen können erhebliche zeitliche Verzögerungen auch zu Materialabrissen und somit zu Produktionsausfällen führen. Daher umfasst die Sicherheitsreichweite in vielen Systemen zusätzlich mindestens einen weiteren Versorgungszyklus (Helfrich 2002, S. 137f.; Klug 2010, S. 168).

Es wird deutlich, dass eine minimale Milkrun-Taktzeit als Zielgröße von den jeweiligen Zykluszeiten der zur Bereitstellung erforderlichen Prozesse abhängig ist. Diese Zeiten, welche sich aus den manuellen Tätigkeitszeiten des Materialbereitstellers und den Transportzeiten zusammensetzen, stellen den Kern dieser Planungsdimension dar.

Die Zeiten sind wiederum abhängig von verschiedenen Einflussgrößen, die sich aus technisch-organisatorischen Charakteristika des Materials, der Lager- und Transportmittel, physiologischen Charakteristika des Bereitstellmitarbeiters sowie externen Montagesystemrestriktionen ableiten lassen. Der Planungsdimension Zeit ist hierbei eine hohe Bedeutung beizumessen und ihre Einflussgrößen müssen bei der Planung detailliert und für die Ermittlung der Prozesszeiten herangezogen werden.

4.4.2 Planungsdimension Kapazität

Unter der Planungsdimension Kapazität ist in diesem Kontext die Beladungskapazität des Transportmittels zu verstehen. Diese auch als Transportkapazität bekannte Größe ist ein wichtiges Kriterium für eine ressourceneffiziente Materialbereitstellung durch Milkrun-Systeme, da sie in der Regel begrenzt ist und somit bestmöglich ausgelastet werden muss (Nyhuis, Wiendahl 2012, S. 13). In diesem Zusammenhang sind sowohl gewichtsbezogene als auch volumenbezogene Kapazitätsgrenzen der Transportmittel einzubeziehen. Bei der Gewichtsauslastung darf die zulässige Gesamttraglast der Transportmittel nicht überschritten werden. Diese wird, z. B. bei Etagenanhängern, häufig durch zulässige Fachtraglasten der Ebenen ergänzt (Hoffbauer, Hoffbauer 2009, S. 70).

Eine bestmögliche Volumenauslastung bedeutet im Milkrun-Kontext, für ein gegebenes Materialspektrum in definierten LT, welches bereitgestellt werden soll, eine möglichst geringe Transportkapazität zu beanspruchen. Dies kann durch zweierlei Schritte erfolgen. Zum einen sollten die im Milkrun verwendeten LT optimal befüllt sein, um so den Stauraum des Transportmittels bestmöglich zu nutzen (Schneider 2008, S. 62). Dieser Aspekt ist jedoch durch das Milkrun-System nicht

beeinflussbar, da die Füllmengen in der Regel durch die Verpackungsfestlegung vorgegeben sind und daher auch im Rahmen des Projekts als fest angenommen werden. Zum anderen sollten die LT selbst auf dem Transportmittel stauraumoptimal angeordnet sein. Unterstützt wird dies durch ein möglichst modulares Ladungsträgerkonzept. Ist dies der Fall, ergibt sich ein minimaler Transportkapazitätsbedarf, welcher die Anzahl der erforderlichen Transportmittel determiniert.

Das Ziel der Planungsdimension Kapazität ist somit die Lösung eines Milkrun-spezifischen Stauraumproblems, welches die Ladeeinheiten und deren Anordnung auf dem Transportmittel als grundlegenden Bestandteil zur Ermittlung des Transportkapazitätsbedarfs ansieht. Dem durch die zeitlich variierende Behälterstruktur des bereitzustellenden Materials bestimmten Transportkapazitätsbedarf stehen in der Praxis häufig zu berücksichtigende Kapazitätsbeschränkungen gegenüber, welche das Kapazitätsangebot des Transportmittels limitieren (vgl. Abbildung 14).

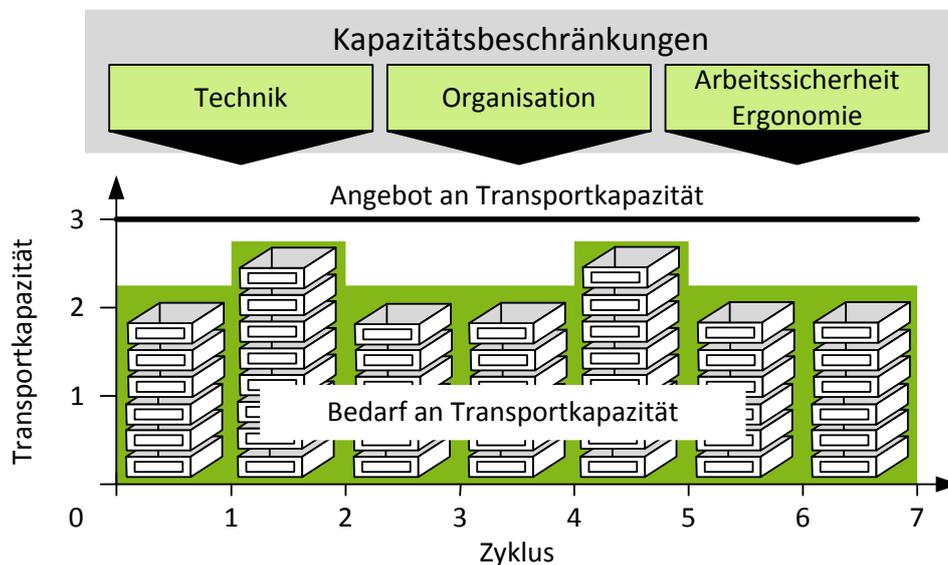


Abbildung 14: Kapazitätsbedarf und -angebot des Transportmittels

Diese Kapazitätsbeschränkungen können sowohl technischer und organisatorischer, aber auch arbeitssicherheitstechnisch-ergonomischer Natur sein. Technische Beschränkungen der Kapazität sind auf die maximale Zugkraft eines Schleppers sowie die maximale Volumen- oder Gewichtsgrenzen der Anhänger zurückzuführen. Diejenige Grenze, die zuerst überschritten wird, bildet die technische Kapazitätsbeschränkung eines Transportmittels.

Eine organisatorische Kapazitätsbeschränkung kann durch die Vermeidung von Behälterstapelungen auf den Ebenen des Transportmittels hervorgerufen werden. Je nach Art des Anhängers könnten zwar technisch mehr Behälter durch eine Stapelung transportiert werden (die technische Beschränkung greift hier demnach noch nicht), jedoch wird hiervon abgesehen, um einfache Bewegungsabläufe an den Be- und Entladepunkten durch einen stapelfreien Behälterladeplan zu unterstützen (Klug 2010, S. 275). Zudem kann durch eine Beschränkung der Anhängeranzahl die organisatorische Abwicklung im Supermarkt, d. h. geringere Laufwege durch eine geringere Schleppzuglänge, vereinfacht werden.

Arbeitssicherheitstechnisch-ergonomische Beschränkungen der Transportkapazität umfassen mögliche Begrenzungen der Anhängerhöhe und die Anzahl der Anhänger, die im innerbetrieblichen Werksverkehr von Schleppern gezogen werden dürfen. Hierdurch werden schlechte ergonomische Handhabungsbedingungen und die Kippgefahr von Transportmitteln vermieden. Wird eine der Kapazitätsbeschränkungen wirksam, ohne dass alle LT auf dem Transportmittel untergebracht werden können, sind entsprechende Maßnahmen, wie z. B. der Einsatz höherkapazitiver oder zusätzlicher Transportmittel, einzuleiten.

4.4.3 Planungsdimension Ergonomie

Neben den beiden technisch-organisatorischen Planungsdimensionen Zeit und Kapazität spielt bei einem Milkrun-System mit manuellen Bereitstellungsanteilen der Faktor Mensch eine zentrale Rolle (Bullinger, Lung 1994, S. 2). Durch einen Mitarbeiter ausgeführte Prozesse sind neben dem Führen des Transportmittels das manuelle Handhaben der LT, welches sich aus der Kommissionierung und der Bereitstellung des Vollguts an der Arbeitsstation sowie dem Einsammeln und der Abgabe des Leerguts zusammensetzt. Besonders durch die Manipulation des Materials im Kommissionier- und Abgabeprozess entstehen Arbeitsbelastungen beim Mitarbeiter, die sich vor allem auf das Muskel-Skelettsystem auswirken (Jäger et al. 2002, S. 93). Belastungen sind hierbei objektive, von außen auf den Menschen einwirkende Faktoren. Dem gegenüber steht die Beanspruchung, welche eine von individuellen Merkmalen abhängige Reaktion des Mitarbeiters auf die Arbeitsbelastung darstellt (Rohmert 1984, S. 193ff.).

Nach Angaben der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) belaufen sich die geschätzten Produktionsausfallkosten durch Arbeitsunfähigkeit im Jahr 2009 auf ca. 43 Mrd. €. Dabei wurden 22,8 % der Arbeitsunfähigkeitstage durch Muskel-, Skelett- und Bindegewebserkrankungen verursacht (BAuA 2011, S. 1f.). In einer Studie der Technischen Universität München wurden bei der Untersuchung von 40 Arbeitsplätzen in der Intralogistik vor allem gesundheitliche Risiken für die Wirbelsäule und Muskulatur durch das häufige Umsetzen von Lasten bei der Kommissionierung festgestellt (Günthner, Kammergruber 2011, S. 509f.).

Bei der Planung von Materialbereitstellungsprozessen wird im Besonderen auf die ergonomische Gestaltung der Materialzuführung für den Montagemitarbeiter geachtet (Vojdani, Lootz, Kirwitzke, S. 4). Die ergonomische Gestaltung umfasst die Gestaltung von Arbeitssystemen und ihren Elementen nach Kriterien, die durch die physiologischen Leistungen und psychologischen Bedingungen des Menschen und seinen Abmessungen bestimmt werden (Schlick, Bruder, Luczak 2010, S. 949). Nach DIN EN ISO 6385 (2004, S. 6) ist das Ziel einer ergonomischen Arbeitssystemgestaltung die Optimierung der Arbeitsbeanspruchung, die Vermeidung beeinträchtigender sowie die Förderung erleichternder Auswirkungen. Die in den vorgelagerten Prozessen auftretenden, teils hohen körperlichen Belastungen der Materialbereitsteller werden dabei jedoch häufig vernachlässigt (Bierwirth 2004, S. 147). Dies wird auch in der durchgeführten Studie ersichtlich, nach der bei über der Hälfte der befragten Unternehmen mit Milkrun-Einsatz kein Bewertungsverfahren in der Planung genutzt wird. Den auftretenden Belastungen ist bereits in der Planungsphase durch geeignete prospektive

Maßnahmen Rechnung zu tragen (Bruder et al. 2009, S. 383; Deuse, Hartung 2012, S. 219). So sind auch gemäß Arbeitsschutzgesetz (§ 4 Nr. 3 ArbSchG) und Betriebsverfassungsgesetz (§ 90 Abs. 2 BetrVG) bei der Neugestaltung von Arbeitsverfahren, -abläufen oder -plätzen die gesicherten arbeitswissenschaftlichen Erkenntnisse über die menschengerechte Gestaltung der Arbeit vom Arbeitgeber zu berücksichtigen.

Eine anzustrebende Belastungsreduzierung setzt jedoch die Kenntnis von Belastungsursachen und -höhen voraus. In den Vorschriften BGI 504-46 (DGUV 2009, S. 3) und BGI 7011 (DGUV 2007, S. 4) werden folgende Ursachen aktiver physischer Arbeitsbelastung unterschieden:

- Manuelle Lastenhandhabung
- Arbeit in erzwungener Körperhaltung (Zwangshaltungen)
- Arbeit mit erhöhter Kraftanstrengung und/oder Krafteinwirkung
- Repetitive Tätigkeiten mit hohen Handhabungsfrequenzen

In Milkrun-Systemen treten vor allem manuelle Lastenhandhabungen auf. Hierzu zählen das Heben, Halten, Tragen, Absenken, Ziehen und Schieben von Lasten, wie z. B. LT oder handgeführten Transportmitteln, wobei häufig ungünstige Körperhaltungen wie Bücken, Knien, Hocken oder Arme über Schulterhöhe einhergehen (Steinberg 2007, S. 774). Lassen sich manuelle Lastenhandhabungen nicht vermeiden, haben Arbeitgeber im Rahmen der Lastenhandhabungsverordnung (§ 2 Abs. 2 LasthandhabV) Gefährdungsanalysen im Hinblick auf Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer durchzuführen (Pieper 2012, S. 854f.; Steinberg 2007, S. 774). Neben dem Lastgewicht an sich stellen dabei auch Intensität und Dauer bzw. Häufigkeit von Aktions- und Haltungskräften sowie ungünstige Körperhaltungen eine Gefahr für das Muskel-Skelettsystem dar und sind zu berücksichtigen (Schlick, Bruder, Luczak 2010, S. 954). Bei der Planung von Milkrun-Systemen müssen somit manuelle Lastenhandhabungen von KLT anhand von Richtwerten zur körperlichen Belastung bewertet und bei Überschreiten Maßnahmen zur Belastungsreduzierung ergriffen werden (vgl. Abbildung 15).

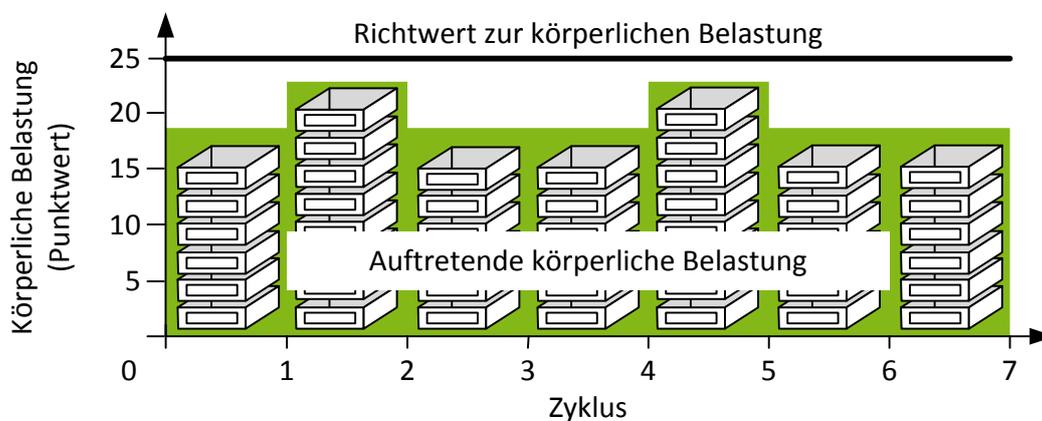


Abbildung 15: Auftretende körperliche Belastung und erlaubter Richtwert

Im Sinne einer menschengerechten Arbeit in der Materialbereitstellung ist der Faktor Mensch als körperlich nur begrenzt belastbare Ressource anzusehen (Bullinger, Lung 1994, S. 113). Aus diesem Grund kommt einer ergonomischen Gestaltung des Milkrun-Systems eine hohe Bedeutung zu, welche die Grundlage für die Integration der Planungsdimension Ergonomie bildet und somit eine menschenzentrierte Auslegung technischer Systeme unterstützt.

Zur Optimierung der Zielgröße werden unternehmensspezifische Einflussgrößen herangezogen, die im Rahmen der drei Planungsdimensionen bewertet werden und so letztendlich zu einer Optimierung des Milkrun-Systems führen.

4.5 Verfahren zur Abbildung der Planungsdimensionen

Ein erster Schritt der Operationalisierung im Rahmen des Planungskonzepts erfolgt durch die Auswahl eines geeigneten Abbildungsverfahrens für jede Planungsdimension. So werden im Rahmen dieses Kapitels verschiedene Verfahren beschrieben und hinsichtlich ihrer Eignung für die jeweilige Planungsdimension beurteilt.

So ist für die Planungsdimension Zeit ein geeignetes Zeitermittlungsverfahren auszuwählen, mit dessen Hilfe die Zeitanteile im Rahmen des Milkrun-Systems systematisch zu Planungszwecken ermittelt werden können. Für die Planungsdimension Kapazität ist im Rahmen der restriktiven Transportmittelkapazität ein geeignetes Verfahren zur Modellierung des volumen- und mengenmäßigen Kapazitätsbedarfs der LT zu ermitteln. Hinsichtlich der Planungsdimension Ergonomie sind etablierte Verfahren zu Ermittlung der körperlichen Belastung bei Lastenhandhabungen zu analysieren.

Abschluss der Betrachtungen bildet die Wahl eines Verfahrens für jede Planungsdimension, welches im weiteren Verlauf als Grundlage für die Erarbeitung eines Entscheidungsmodells dient.

4.5.1 Verfahren zur Zeitermittlung

Für die Planung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme spielt die Zeit eine entscheidende Rolle (vgl. Abschnitt 4.4.1). Im Rahmen der Planungsdimension Zeit sind daher in geeigneter Art und Weise Zeitdaten für die einzelnen Prozesse eines innerbetrieblichen Milkrun zu ermitteln.

Zeitbegriffe und Ermittlungsverfahren

Zeitdaten werden im Rahmen des Projekts nicht ausschließlich auf Zeitpunkte oder Zeitdauern bezogen, sondern können auch Einflussgrößen, Kennwerte und Prozessinformationen, wie z. B. Gewichte, Wege oder Arbeitsbedingungen enthalten, wenn diese einen Zeitwert repräsentieren oder erläutern (Ohm 1998, S. 36; Tschich 2000, S. 8).

Da es sich bei einem Milkrun-System um ein sozio-technisches Arbeitssystem mit hohem manuellem Anteil handelt, kann die Ausführungszeit von Abläufen maßgeblich vom Milkrun-Mitarbeiter selbst beeinflusst werden. Zwar sind Fahrzeiten bei angetriebenen Schleppzügen nur bedingt durch den Mitarbeiter beeinflussbar, jedoch können Zeiten für unbeeinflussbare Abläufe aus den Leis-

tungsdaten der Fördermittel errechnet werden (REFA 1997, S. 62). Daher sind für den weiteren Verlauf besonders mitarbeiterbezogene Zeitbegriffe von Relevanz. Zu ihnen zählen vor allem die Begriffe Istzeit, Normalzeit, Sollzeit, Vorgabezeit und Planzeit (vgl. Abbildung 16).

Die Istzeit beschreibt die tatsächlich von einem Mitarbeiter oder Betriebsmittel für die Ausführung eines bestimmten Arbeitsablaufs benötigte Zeit (Barnes 1980, S. 257). Istzeiten können nur durch direkte Messung am bestehenden Arbeitssystem durch einen Beobachter (Zeitaufnahme, Multimoment-Einzelzeitverfahren) oder durch den arbeitenden Menschen selbst (Selbstaufschreibung) bzw. das Betriebsmittel (selbsttätige Registrierung) erfasst werden. Als Sonderfall kann die Ermittlung von Istzeiten durch Befragen der arbeitenden Person oder dessen Vorgesetzten angesehen werden (REFA 1997, S. 62). Istzeiten sind naturgemäß in hohem Maße individuell ausgeprägt.

Unter der Normalzeit wird die Zeit verstanden, die ein Mitarbeiter für die Ausführung eines Arbeitsablaufs bei „Normalleistung“ benötigt (Petzelt 2010, S. 32). Die Normalleistung zeichnet sich durch eine Bewegungsausführung aus, welche hinsichtlich der Einzelbewegungen, der Bewegungsfolge und ihrer Koordinierung besonders harmonisch, natürlich und ausgeglichen erscheint. Sie kann von einem geeigneten, geübten und voll eingearbeiteten Mitarbeiter auf die Dauer und im Mittel der Schichtzeit erbracht werden (REFA 1997, S. 136). Zur Ermittlung der Normalzeit aus einer Istzeit muss der sogenannte Leistungsgrad des beobachteten Mitarbeiters beurteilt werden, welcher die prozentuale Abweichung der Istleistung von der Normalleistung angibt (Chase, Jacobs, Aquilano 2006, S. 192f.). Dies ist erforderlich, da die individuelle Istleistung eines beobachteten Mitarbeiters nicht als Referenz für andere Mitarbeiter geeignet ist. Die Normalzeit errechnet sich schließlich aus der Multiplikation der beobachteten Istzeit mit dem Leistungsgrad (Groover 2007, S. 349).

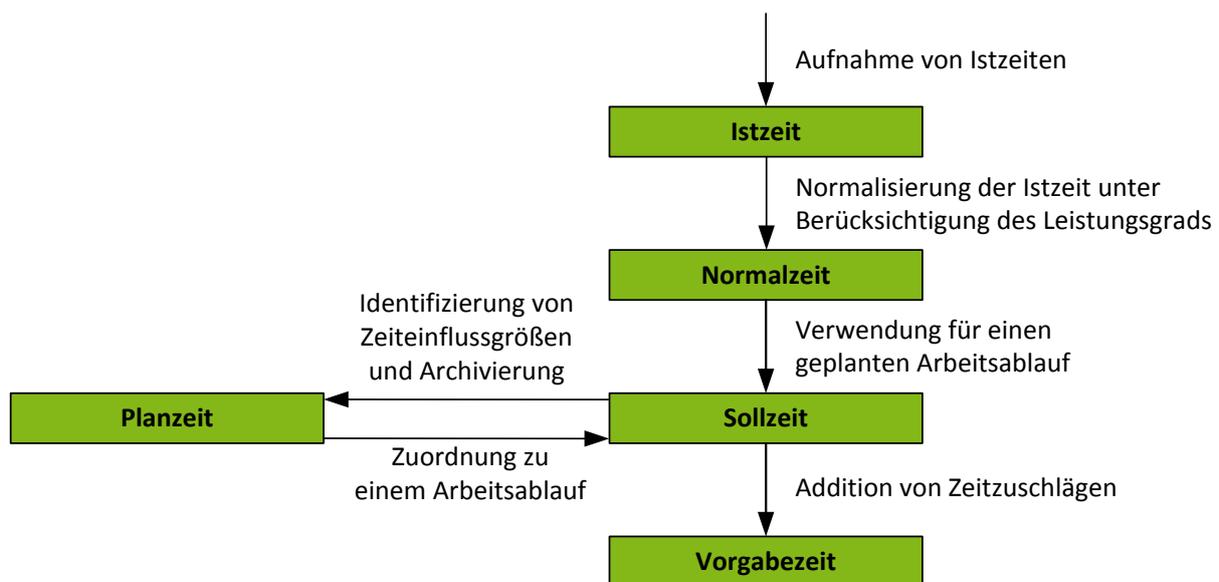


Abbildung 16: Mitarbeiterbezogene Zeitbegriffe und ihre Beziehung zueinander (Petzelt 2010, S. 32)

Die Sollzeit beschreibt nach REFA (1997, S. 62) eine Zeit, die für einen geplanten Arbeitsablauf (Sollablauf) oder einen tatsächlich ausgeführten Ablauf (Istablauf) verwendet wird. Sollzeiten können auf unterschiedliche Weise ermittelt werden. Zum einen können sie direkt aus zuvor erfassten Istzeiten abgeleitet werden. In der Regel werden hierbei jedoch normalisierte Istzeiten (Normalzeiten) verwendet (Petzelt 2010, S. 32). Zum anderen können Sollzeiten unabhängig von der Istzeit durch Befragen, Vereinbaren oder Vergleichen und Schätzen ermittelt werden. Auch können aus so ermittelten Sollzeiten von kürzeren Abläufen auch Sollzeiten für größere Abläufe zusammengesetzt werden (REFA 1997, S. 62). Kennzeichnend hierfür ist, dass die Ermittlung ohne die explizite Berücksichtigung zeitbeeinflussender Größen erfolgt (Olbrich 1993, S. 20). Sollzeiten können weiterhin durch Planzeiten ermittelt werden. Planzeiten sind Sollzeiten für Arbeitsabläufe, die explizit in Abhängigkeit von zeitrelevanten Einflussgrößen beschrieben sind (z. B. als mathematische Funktion oder Tabellenwert) und bei Kenntnis der Einflussgrößen errechnet oder abgelesen werden können (Mesenhöller 2004, S. 14; REFA 1997, S. 348). Durch diese Abhängigkeit können Zeiten nicht nur für real existierende Abläufe, sondern auch für zukünftig zu planende Abläufe bestimmt werden (Olbrich 1993, S. 20).

Vorgabezeiten werden aus Sollzeiten durch die Addition von in der Regel prozentualen Zeitzuschlägen, wie Erholungszeiten und Verteilzeiten, abgeleitet (Nebel, Freivalds 2003, S. 395ff.). Während Erholungszeiten die für das Erholen des Menschen erforderlichen Sollzeiten beschreiben, sind Verteilzeiten unregelmäßig auftretende Sollzeiten, die zusätzlich zur planmäßigen Ausführung eines Ablaufs anfallen. Verteilzeiten lassen sich in persönlich und sachlich bedingte Zeiten unterteilen (REFA 1997, S. 44). Zeitzuschläge können allgemein durch Zeitaufnahmen, Multimoment-Häufigkeitsverfahren, Vereinbaren oder Vergleichen und Schätzen bestimmt werden (Heinz, Mesenhöller 2001, S. 574; REFA 1997, S. 205).

Zusammenfassend können relevante Zeitdaten aus Istzeiten, hieraus ermittelten Sollzeiten oder von zeitrelevanten Einflussgrößen abhängigen Planzeiten ermittelt werden (vgl. Abbildung 17).

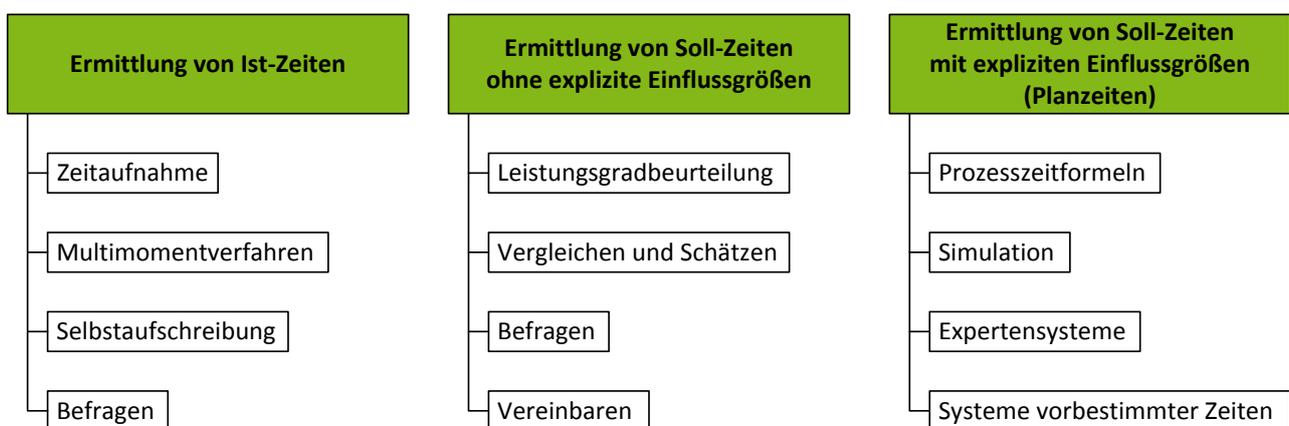


Abbildung 17: Verfahren zur Ermittlung von Zeitdaten (in Anlehnung an Olbrich 1993, S. 25)

Für die Planung eines Milkrun-Zyklus ergibt sich aus obigen Ausführungen die Anforderung einer Sollzeitermittlung als Planungsgrundlage (vgl. Abschnitt 4.4.1). In der Planungsphase ist jedoch die

Verwendung von Istzeiten aus einer Zeitaufnahme zur Ermittlung von Sollzeiten nicht möglich. Das Vergleichen und Schätzen bzw. das Befragen liefern in Abhängigkeit von der Datenbasis bzw. vom Befragten in der Regel nur Ergebnisse mit begrenzter Genauigkeit (Bokranz, Landau 2012a, S. 552; Simons 1987, S. 122). Durch die auch bereits in der Planung prospektiv beschreibbaren Einflussgrößen eines Milkrun-Systems auf die Zeit, wie z. B. LT-Abmaße oder Weglängen des Mitarbeiters, ist eine Ermittlung von Sollzeiten durch zeitrelevante Einflussgrößen explizit abbildende Planzeiten sinnvoll.

Hier stellt Methods-Time Measurement (MTM) als am weitesten verbreitetes Verfahren der Systeme vorbestimmter Zeiten (SvZ) einen industriellen Standard dar, welcher im nachfolgenden näher erläutert wird.

Methods-Time Measurement

Die MTM-Verfahren unterteilen sich in eine Vielzahl an Bausteinsystemen unterschiedlicher Detaillierungsgrade und für unterschiedliche Verwendungszwecke. Grundlage aller MTM-Verfahren ist MTM-1, das detaillierteste Verfahren. Es berücksichtigt neben acht Grundbewegungen der Finger, der Hand und des Arms zwei Blickfunktionen und neun Körperbewegungen (Picker 2006, S. 36). Ca. 85 % der Montageabläufe bestehen hierbei aus den Grundbewegungen Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen, welche einen Zyklus bilden (Lotter 2012a, S. 54). Die Bereitstellung der Zeitwerte in Abhängigkeit der relevanten Einflussgrößen erfolgt über Datenkarten und unterliegt speziellen Anwendungsregeln. Aufgrund des hohen Detaillierungsgrads und der damit verbundenen zeitaufwändigen Analyse eignet sich MTM-1 nur zur Analyse kurzer Bewegungszyklen mit hoher Wiederholhäufigkeit, wie beispielweise in der Massenfertigung (Sackermann 2009, S. 44).

Um auch Tätigkeiten in der Serien- und Einzelteilkfertigung mit längeren Zyklen und geringerer Wiederholhäufigkeit mit vertretbarem zeitlichen Aufwand abbilden zu können, wurden eine Reihe höher aggregierter Analysiersysteme entwickelt (Schlick, Bruder, Luczak 2010, S. 697) (vgl. Abbildung 18). Die hierfür erforderliche Datenreduktion kann prinzipiell in zwei Richtungen erfolgen. Die horizontale Aggregation beschreibt eine stufenweise Verdichtung von Zeitwerten, während die vertikale Aggregation über statistische Verfahren die Anzahl der Bewegungselemente, ihrer Zeiteinflussgrößen und Ausprägungen und somit den Analysieraufwand erheblich reduziert (Schlick, Bruder, Luczak 2010, S. 697).

In Deutschland sind neben MTM-1 vor allem die höher verdichteten Datensysteme Standard-Daten (SD), Universelles Analysier-System (UAS) und MTM in der Einzel- und Kleinserienfertigung (MEK) verbreitet (Bokranz, Landau 2012a, S. 99). Aufgrund der Merkmale eines innerbetrieblichen Milkrun-Systems, welches sich im Gegensatz zu MTM-1, SD und MEK in der Regel durch Routinebildung der Mitarbeiter, gestaltete, aber längerzyklische Arbeitsabläufe und mittlere Arbeitsweisenstreuung auszeichnet, eignet sich MTM-UAS für die Zeitermittlung des Milkrun-Zyklus (Droste, Hasselmann, Deuse 2012, S. 28).

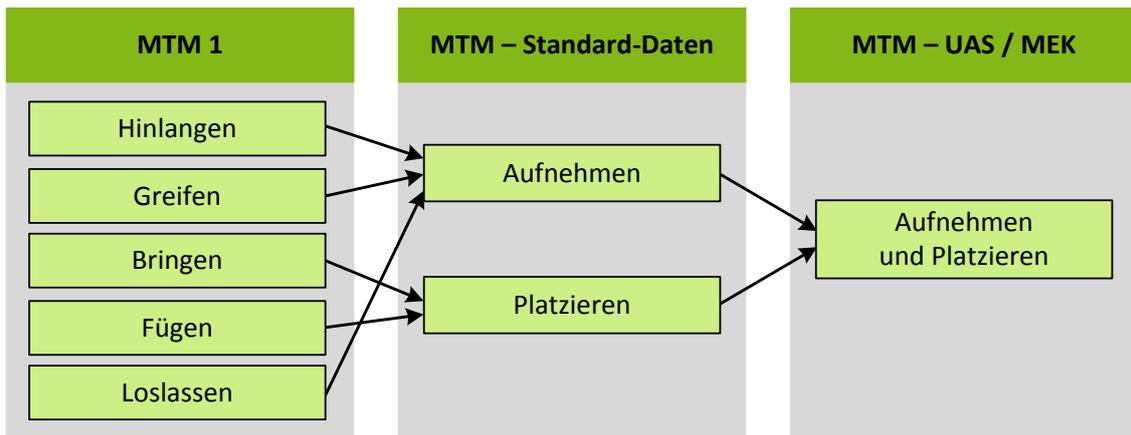


Abbildung 18: Entwicklung von MTM-Datensystemen durch Datenverdichtung
(in Anlehnung an Helms 1980, S. 7)

Bei UAS erfolgt die Ermittlung der Zeitwerte nicht wie bei MTM-1 durch detaillierte Beschreibung der Einflussgrößen des Bewegungsablaufs, sondern vielmehr durch Beschreibung weniger, relevanter Rahmenbedingungen, wie Teilegewicht, Entfernungen oder Platziergenauigkeit, unter denen der Arbeitsablauf ausgeführt wird (Bokranz, Landau 2012a, S. 480) (vgl. Abbildung 44). Dies eignet sich für den Kontext der Arbeit, da in der Milkrun-Planung die für den Abgleich mit der Taktzeit erforderliche Zykluszeit anhand von systembezogenen Einflussgrößen ermittelt werden soll (vgl. Abschnitt 4.5). Der aus MTM-1 bekannte Zyklus der Grundbewegungen wird bei UAS zu einem Grundvorgang Aufnehmen und Platzieren aggregiert, so dass der Analysieraufwand, aber auch die Genauigkeit der Zeitdaten sinken (Petzelt 2010, S. 41). Eine weitere Aggregation kann durch die Verdichtung von UAS-Grundvorgängen zu UAS-Standardvorgängen erzielt werden (Bokranz, Landau 2012a, S. 498ff.).

Neben typischen Montagetätigkeiten lassen sich auf Basis von UAS auch logistische Prozesse analysieren (Droste, Hasselmann, Deuse 2012, S. 28). Die Standardvorgänge Logistik (SVL) stellen hierzu unternehmensübergreifende Bausteine für typische logistische Tätigkeiten zur Verfügung (Bokranz, Landau 2012b, S. 466). Sie lassen sich in Transport- und Handlingsvorgänge unterteilen (Droste, Deuse 2011, S. 608). Sämtliche Zeitdaten zur manuellen Handhabung lassen sich durch UAS-Grundvorgänge beschreiben (Bokranz, Landau 2012b, S. 466). Hierzu gehören das Handhaben, Verpackung öffnen/schließen und Informationen verarbeiten. Zudem beruhen einige Zeitbausteine der Transportvorgänge auf detaillierten Untersuchungen der Leistungsdaten verschiedener Fahrzeugtypen (MTM 2010, S. 5). Sie gliedern sich in allgemeine Bausteine, Staplertransporte, Krantransporte und sonstige Transportmittel, wie Elektroschlepper, Handgabelhubwagen oder Transportwagen. Tabelle 9 zeigt beispielhaft Auszüge aus den Datenkarten für das Aufnehmen und Platzieren (UAS) von Gegenständen und das Fahren mit Elektroschleppern (SVL). Die grau hinterlegten Zeitwerte sind in Time Measurement Units (TMU) angegeben. Eine Sekunde entspricht 27,8 TMU, ein TMU somit 0,036 s bzw. 0,0006 min.

Aufnahmen und Platzieren			Kode	1	2	3	Elektroschlepper		4LT	TMU	
				TMU							
≤ 1 kg/daN	leicht	ungefähr	AA	20	35	50	Fahren	Mit Hänger pro m	EFIM	13	
		lose	AB	30	45	60		Ohne Hänger pro m	EFIO	10	
		eng	AC	40	55	70		Außenbereich	Mit Hänger pro m	EFAM	13
	schwierig	ungefähr	AD	20	45	60			Ohne Hänger pro m	EFAO	7
		lose	AE	30	55	70		Kurve 90°	Mit Hänger	EFKM	92
		eng	AF	40	65	80			Ohne Hänger	EFKO	38
	Hand voll	ungefähr	AG	40	65	80	Verzögerung (Start und Stopp)	Mit Hänger	EFVM	56	
		lose	AH	25	45	55		Ohne Hänger	EFVO	30	
	> 1 kg/daN bis ≤ 8 kg/daN	ungefähr	AJ	40	65	75	Ankuppeln	Mit Hänger ausrichten	EANM	368	
eng		AK	50	75	85	Ohne Hänger ausrichten		EANO	258		
> 8 kg/daN bis ≤ 22kg/daN	ungefähr	AL	80	105	115	Abkuppeln	Mit Hänger ausrichten	EABM	285		
	lose	AM	95	120	130		Ohne Hänger ausrichten	EABO	182		
	eng	AN	120	145	160	Zuschlag	Weg, zusätzlicher Hänger	EAZZ	200		

Tabelle 9: Auszug aus den Datenkarten für MTM UAS (links) und SVL (rechts)
(Becks 1979, S. 6; MTM 2010, S. 42)

Es wird deutlich, dass die manuellen Arbeitsabläufe in einem Milkrun-System ausreichend detailliert mit UAS-Grundvorgängen beschrieben und zeitlich bewertet werden können. Zur Zeitermittlung der Transportprozesse kommen im weiteren Verlauf die Standardvorgänge Logistik zum Einsatz.

4.5.2 Verfahren zur Bewertung der Transportkapazität

Das Ziel im Rahmen der Bewertung der Transportkapazität ist es zu überprüfen, ob die gewichts- und volumenbezogene Kapazität des Transportmittels für die Belieferung aller LT in einem Milkrun-Zyklus ausreicht. Hierzu ist es erforderlich, den durch die LT generierten Kapazitätsbedarf hinsichtlich zu befördernder Gewichte und Volumina zu ermitteln und mit dem von Planer zu bestimmenden Kapazitätsangebot des Transportmittels zu vergleichen. Ist das Angebot größer als der Bedarf, können alle LT transportiert werden. Im anderen Fall sind gestalterische Maßnahmen (z. B. andere oder zusätzliche Transportmittel) durchzuführen.

Während das Kapazitätsangebot der Transportmittel durch maximale Traglasten und Abmaße einfach beschrieben werden kann, bieten spezielle Optimierungsverfahren des Operations Research Möglichkeiten zur Berechnung des Kapazitätsbedarfs. Das vorliegende Problem zur Bestimmung des Kapazitätsbedarfs der LT ist ein Problem aus dem Gebiet der kombinatorischen Optimierung und lässt sich weiterhin den Zuschnitt- und Packproblemen, auch Cutting and Packing (C&P)-Probleme genannt, zuordnen (Domschke, Drexl 2011, S. 122f.). Die gemeinsame logische Struktur eines C&P-Problems beschreibt eine Menge kleiner und durch eine beliebige Anzahl an Dimensionen definierte Objekte, von denen einige oder alle in ein oder mehrere große und durch eine beliebige Anzahl an Dimensionen definierte Objekte gepackt werden und dabei eine eindimensionale oder mehrdimensionale Zielfunktion optimiert wird. Hierbei müssen die kleinen Objekte vollständig innerhalb der großen Objekte liegen und dürfen sich nicht überlappen (Wäscher, Haußner,

Schumann 2007, S. 1110). Hierdurch wird die Relevanz für die Ermittlung des Kapazitätsbedarfs eines Transportmittels im Milkrun-System ersichtlich.

Problemtypen von Packproblemen

Eine weit verbreitete Typologie von C&P-Problemen wurde von Dyckhoff (1990, S. 145ff.) eingeführt und gliedert sich in die Kriterien Dimensionalität, Art der Zuordnung, Zusammenstellung der großen Objekte und Zusammenstellung der kleinen Objekte. Aufgrund vermehrt auftretender Inkonsistenzen der disjunkten Einteilung von Problemstellungen schlagen Wäscher, Haußner und Schumann (2007, S. 1114ff.) eine verbesserte Typologie vor, welche sich zweistufig in grundlegende und erweiterte Problemtypen unterteilen lässt. Grundlage der nachfolgenden Erläuterungen bildet diese verbesserte Typologie.

Die grundlegenden Problemtypen lassen sich über die zwei Kriterien Art der Zuordnung und Zusammenstellung der kleinen Objekte definieren. Die Art der Zuordnung kann in Output-Maximierung und Input-Minimierung unterschieden werden. Probleme mit Output-Maximierung umfassen eine begrenzte Menge an großen Objekten mit entsprechend begrenzten Kapazitäten, so dass ein Auswahlproblem für die Zuordnung der kleinen Objekte besteht, während alle großen Objekte verwandt werden. Für Probleme mit Input-Minimierung existieren unbegrenzt viele große Objekte, so dass alle kleinen Objekte einer möglichst kleinen Anzahl großer Objekte zugeordnet werden müssen. In beiden Fällen kann die Zusammenstellung der kleinen Objekte als zweites grundlegendes Kriterium hinsichtlich der relevanten Dimensionen identisch bzw. beliebig, schwach oder stark heterogen ausfallen (Wäscher, Haußner, Schumann 2007, S. 1114f.).

Aus der Kombination dieser beiden Kriterien lassen sich sechs grundlegende Problemtypen von C&P-Problemen ableiten (vgl. Abbildung 19).

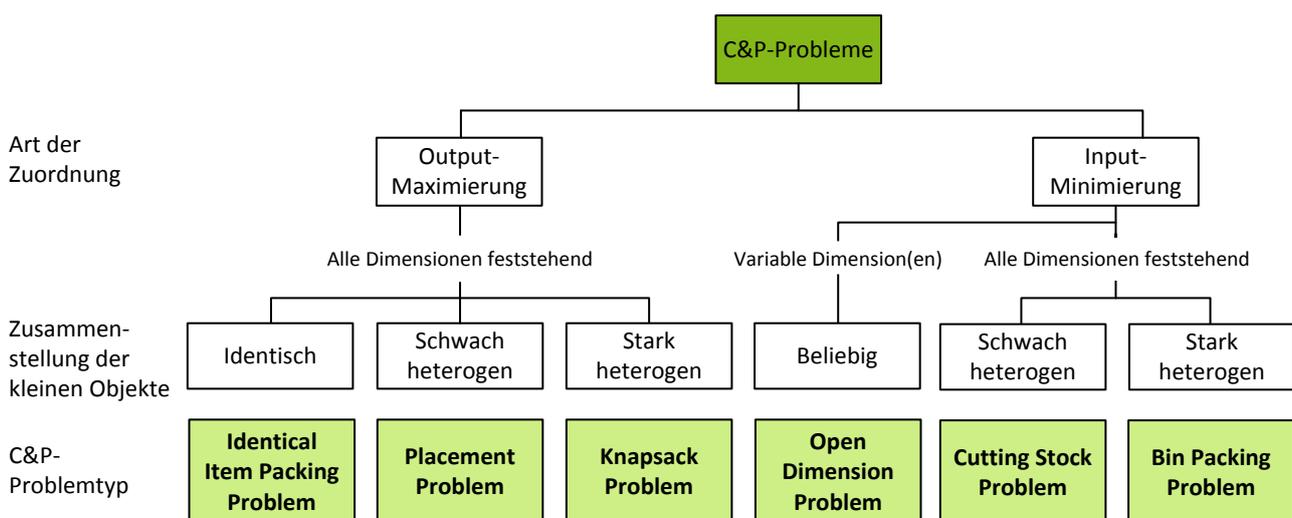


Abbildung 19: Grundlegende Problemtypen von Zuschnitt- und Packproblemen
(in Anlehnung an Wäscher, Haußner, Schumann 2007, S. 1117)

Beim Output-maximierenden Identical Item Packing Problem muss eine möglichst große Anzahl identischer kleiner Objekte einer begrenzten Anzahl in den relevanten Dimensionen definierten großen Objekte angeordnet werden (Martins, Dell 2008, S. 429). Eine bekannte Form des zweidimensionalen Problems ist das Pallet Loading Problem, bei dem möglichst viele, identische Boxen auf einer Palette anzuordnen sind. Das Placement Problem maximiert die Anzahl kleiner Objekte, die in einer begrenzten Anzahl großer Objekte angeordnet werden müssen, wobei die kleinen Objekte wenige unterschiedliche Formen und Größen aufweisen können (Wäscher, Haußner, Schumann 2007, S. 1117). Beim Knapsack Problem liegt eine stark heterogene Anzahl kleiner Objekte vor, die je einen Nutzen aufweisen und möglichst gesamtutzenmaximierend in eine begrenzte Anzahl größerer Objekte zu platzieren sind (Harren 2007, S. 1).

Zu den Input-minimierenden Problemen zählt das Open Dimension Problem, bei dem eine gegebene Anzahl kleiner Objekte in ein oder mehrere große Objekte gepackt werden müssen, wobei eine oder mehr Dimensionen unbekannt sind und minimiert werden sollen (Wäscher, Haußner, Schumann 2007, S. 1118). Ein Beispiel hierfür ist die Schnittmusterbestimmung in der Bekleidungsindustrie, bei der die Stoffrolle als großes Objekt in ihrer Längendimension theoretisch als nicht definiert angesehen werden kann (Lodi, Martello, Monaci 2002, S. 241). Das Cutting Stock Problem beschreibt ein Problem, bei dem eine gegebene, schwach heterogene Anzahl kleiner Objekte einer zu minimierenden Anzahl an großen Objekten zugeordnet werden soll (Cintra et al. 2007, S. 1328). Ziel des Bin Packing Problem (BPP) dagegen ist das Packen stark heterogener kleiner Objekte in eine zu minimierende Anzahl großer Objekte (Scheithauer 2008, S. 41). Industrielle Beispiele finden sich im Zeitungssatz oder dem Metall-, Holz- und Glasplattenzuschnitt (Lodi, Martello, Monaci 2002, S. 241).

Bezogen auf die Bestimmung des Kapazitätsbedarfs des Transportmittels kann gemäß dieser Typologie von einem Bin Packing Problem ausgegangen werden, da ein hinsichtlich der Dimensionen Volumen und Gewicht stark heterogenes Spektrum an LT vollständig auf die Transportebenen der Anhänger angeordnet werden sollen, so dass die Anzahl der Ebenen und somit die Anzahl der Anhänger minimiert wird.

Aus diesem Grund werden nachfolgend erweiterte Problemtypen des Bin Packing beschrieben, welche sich hinsichtlich der Zusammenstellung der großen Objekte weiter einteilen lassen. So können diese ebenso als identische, schwach oder stark heterogene Formen auftreten. Da im Rahmen eines Milkrun-Systems die Ebenen der Transportmittel (große Objekte) gleiche Abmaße aufweisen, kann von einer identischen Zusammenstellung der großen Objekte ausgegangen werden. Demnach liegt gemäß Wäscher, Haußner und Schumann (2007, S. 1120ff.) ein Single Bin Size Bin Packing Problem (SBSBPP) vor, welches die gegebene Anzahl an LT mit heterogenen Dimensionen auf eine zu minimierende Anzahl an identisch dimensionierten Transportmittelebenen anordnet.

Bewertung des gewichtsbezogenen Kapazitätsbedarfs

Während beim standardisierten SBSBPP alle zu berücksichtigenden Dimensionen räumlicher Ausprägung sind, kommt im Fall der Anordnung von LT auf einer Transportmittelebene eine weitere

Dimension hinzu. So muss bei der Platzierung der einzelnen LT auf einer Ebene überprüft werden, ob bei einem neu zu platzierenden LT neben der räumlichen Restriktion die zulässige Ebenenlast überschritten wird. Mathematisch bedeutet dies eine weitere unabhängige Dimension, welche im Modell neben der Fläche berücksichtigt werden muss (Eilon, Christofides 1971, S. 260).

Das klassische Bin Packing Problem zählt zur Klasse der nichtdeterministisch polynomiell (NP)-schweren Probleme (Korte, Vygen 2012, S. 503). Dies bedeutet, dass kein bekanntes Verfahren existiert, dass diese Probleme in polynomieller Zeit zu lösen vermag (Gohout 2009, S. 8). Bei der Lösung solcher Probleme würde aufgrund der exponentiell steigenden Zahl an möglichen Lösungen eine vollständige Enumeration je nach Problem Instanz nicht akzeptable Rechenzeiten beanspruchen (Suhl, Mellouli 2009, S. 136). Daher ist es erforderlich, die Problem Instanz überschaubar zu halten oder mittels Einsatz von Heuristiken eine akzeptable Approximation der optimalen Lösung zu erzielen.

Die Identifikation des vorliegenden Problems als SBSBPP stellt eine wichtige Grundlage zur Ermittlung einer geeigneten Lösungsstrategie dar, welche jedoch im Rahmen der Modellierung (vgl. Abschnitt 5.4) speziell an die Anforderungen des Anwendungsfalls angepasst werden muss.

4.5.3 Verfahren zur Belastungsbeurteilung bei manuellen Lastenhandhabungen

Die Beurteilung der körperlichen Belastung bei manuellen Lastenhandhabungen im betrieblichen Alltag stellt ein wichtiges Element zur Erfüllung der arbeitgeberseitigen Fürsorgepflicht dar (vgl. Abschnitt 4.4.3). Über die Berücksichtigung gesicherter, arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse hinaus ist der Arbeitgeber gemäß §§ 5 und 6 ArbSchG zu einer Gefährdungsbeurteilung der Arbeitsbedingungen und Dokumentation der Ergebnisse verpflichtet. Hierzu eignen sich grundsätzlich Verfahren zur Beurteilung der Belastung bei manueller Lastenhandhabung, von denen sich im deutschsprachigen Raum die Leitmerkmalmethoden etabliert haben.

Leitmerkmalmethoden

Die Leitmerkmalmethoden (LMM) wurden mit speziellem Bezug zur Lastenhandhabungsverordnung entwickelt (vgl. Abschnitt 4.4.3) und werden zur Erfüllung der Beurteilungs- und Dokumentationspflicht gemäß §§ 5 und 6 ArbSchG und § 2 Abs. 2 LasthandhabV zur Anwendung empfohlen (Jürgens et al. 2001, S. 13; Steinberg 2007, S. 774). Grundsätzlich können sie zur hinreichend sicheren Beurteilung aller Tätigkeiten der manuellen Lastenhandhabung angewendet werden und erfordern wenige Daten des Arbeitsplatzes, wie Häufigkeit, Dauer, Lastgewichte, Körperhaltungen und Ausführungsbedingungen (Steinberg, Windberg 1998, S. 13).

Zur Analyse unterschiedlicher Lastenhandhabungsfälle existiert jeweils eine Leitmerkmalmethode zum Heben, Halten, Tragen (LMM-HHT) und zum Ziehen/Schieben (LMM-ZS) von Lasten, die einer identischen Bewertungssystematik folgen (Ellegast 2005, S. 25f.).

Trotz der großen Verbreitung in der industriellen Praxis ist festzuhalten, dass die LMM keine Aussagen zu kumulierten Belastungen verschiedener Lastenhandhabungen liefern können, da nur je-

weils eine Art der Lastenhandhabung (z. B. Tragen von Lasten) bewertet werden kann (Schaub et al. 2010, S. 124). Zudem sind innerhalb einer Handhabungsart bei der Bewertung mehrerer Teiltätigkeiten mit deutlich unterschiedlichen Wichtungskombinationen (multiple Lastenhandhabungen) diese getrennt zu erheben (BAuA 2001, S. 4; Ellegast 2005, S. 26).

In logistischen Bereichen, wie innerbetrieblichen Milkrun-Systemen, treten komplexe Lastenhandhabungstätigkeiten mit einem breiten Spektrum an Handhabungsarten sowie unterschiedlichster Lastgewichte und Häufigkeiten auf, für die eine umfassende Bewertung mittels Leitmerkmalmethoden nur schwer möglich ist (Schaub et al. 2010, S. 124).

Aus diesem Grund wurde das auf der LMM-HHT und LMM-ZS basierende Multiple-Lasten-Tool (MLT) für die integrierte Bewertung unterschiedlicher Arten von manuellen Lastenhandhabungen zur Anwendung in innerbetrieblichen Milkrun-Systemen entwickelt (Kugler et al. 2010, S. 20). Nachfolgend wird dieses eingehender vorgestellt.

Multiple-Lasten-Tool

Das Multiple-Lasten-Tool wurde im Jahre 2010 für die Bewertung von Logistik-Arbeitsplätzen in der Materialbereitstellung mit Schleppzügen entwickelt und wird zur Zeit in der aktuellen Version 1.4 von der Industrie erprobt (Kugler et al. 2010, S. 20).

So ist zu beachten, dass das Verfahren noch nicht schlussendlich validiert ist. Da jedoch kein adäquater Ansatz zur Bewertung von Lastenhandhabungen in Milkrun-Systemen existiert, ist die Anwendung des MLT auch im Teststadium sinnvoll, um zumindest Orientierungswerte für die körperliche Belastung des Milkrun-Mitarbeiters ableiten zu können.

Zur Realisierung einer praxisorientierten Umsetzung wurde bei der Entwicklung auf die Verfahren LMM-HHT und LMM-ZS zurückgegriffen (Schaub et al. 2012, S. 4434f.). Durch diese Integration bezieht sich das MLT zwar ausschließlich auf die Belastungsart „Manuelle Lastenhandhabung“, kann jedoch als Kombinationsverfahren angesehen werden (Kugler et al. 2010, S. 19). Die vom MLT berücksichtigten Leitmerkmale und ihre Wichtungen entsprechen denen der LMM. Auch sind ermittelte Punktwerte und der zugehörige Risikobereich äquivalent, so dass eine Vergleichbarkeit entsteht (Schaub et al. 2010, S. 124f.).

Grundlage für die integrierte Betrachtung verschiedener Handhabungsarten bildet die Belastungsdauer (Zeitwichtung). Um einzelne Handhabungsvorgänge detaillierter bewerten zu können, sind im MLT aus den Zeitwichtungsklassen unter Bezugnahme der Klassenmitten als Stützstellen stetige Funktionen interpoliert worden (vgl. Abbildung 20).

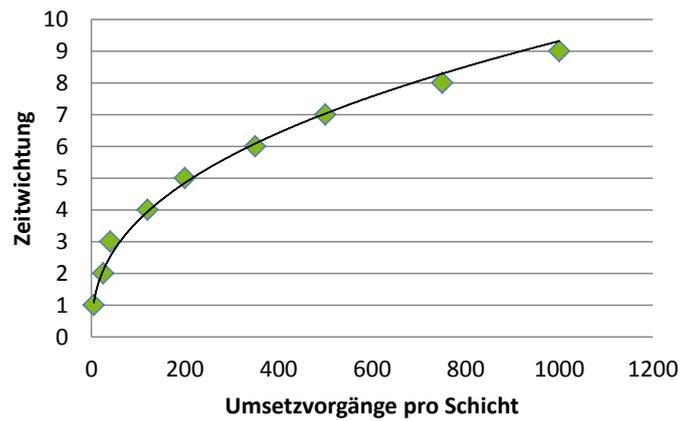


Abbildung 20: Interpolierte Zeitwichtung der Handhabungsart Umsetzen (IAD 2010b, S. 4)

Aufgrund des dargestellten Verlaufs führt eine einfache summarische Bewertung der verschiedenen Arten jedoch zu einer Fehlbewertung, da durch den steilen Anstieg der Kurven geringere Häufigkeiten zu stark gewichtet werden (Schaub et al. 2012, S. 4434). Daher sind im MLT die Zeitskalen zwischen den einzelnen Belastungsarten angepasst worden, so dass z. B. einem Umsetz- oder Hebevorgang ein Tragen über eine Distanz von 3 m entspricht (Schaub et al. 2010, S. 126).

Für eine solche kombinierte Betrachtung der einzelnen Handhabungsarten werden diese zunächst getrennt voneinander bewertet und anschließend auf eine gemeinsame Größe umgerechnet (IAD 2010b, S. 5). Hierzu nutzt das Verfahren die Anzahl an Umsetzvorgängen (vgl. Abbildung 21).

Dies bedeutet, dass die Zeitwichtungseinheiten Minuten (beim Halten) und Meter (beim Tragen und Ziehen/Schieben lang) durch entsprechende Umrechnungen in Anzahläquivalente überführt werden. Diese werden über beide Handhabungsgruppen (LMM-HHT und LMM-ZS) addiert und anschließend anteilig innerhalb der Gruppe auf jede Handhabungsart zurückverteilt (Schaub et al. 2010, S. 126f.).

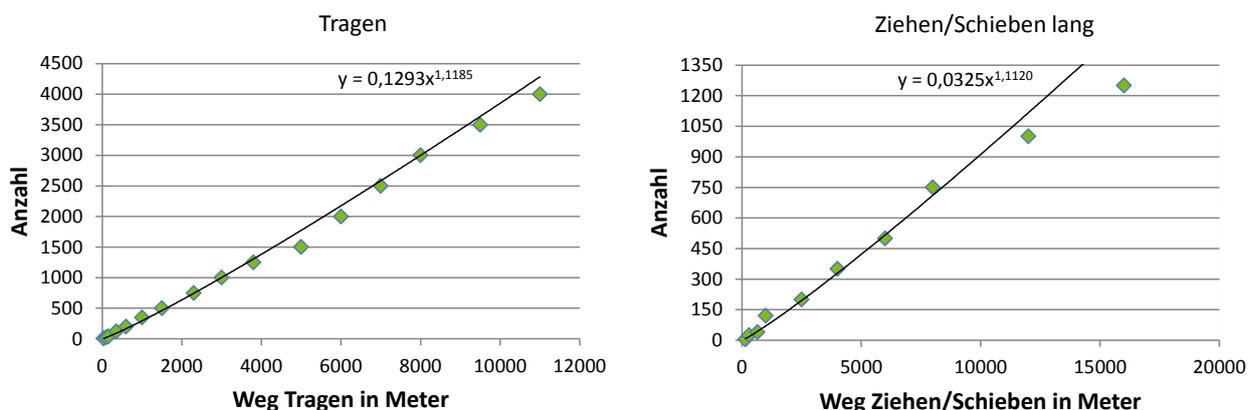


Abbildung 21: Berechnung der Anzahläquivalente für relevante Handhabungsarten (IAD 2010b, S. 6)

Zur Berechnung der Lastwichtung sind aus den Skalen der LMM ebenfalls stetige Funktionen interpoliert worden, über die für jedes zu manipulierende Gewicht Lastwichtungen in Abhängigkeit der Handhabungsart ermittelt werden können. Beim Heben, Halten und Tragen erfolgt die Unterteilung nach Männern und Frauen, während beim Ziehen/Schieben die Ausprägungen „mit Bockrollen“ und „nur Lenkrollen“ entscheidend sind (IAD 2010b, S. 7). Aus den so ermittelten Einzellastwichtungen wird für jede Handhabungsart ein häufigkeitsgewichteter Mittelwert zur Ermittlung der Gesamtlastwichtung berechnet (Schaub et al. 2010, S. 127). Mit den weiteren Leitmerkmalen Positioniergenauigkeit, Bewegungsgeschwindigkeit, Körperhaltung und Ausführungsbedingungen wird ebenso verfahren (IAD 2010b, S. 8).

Die abschließende Gesamtbewertung erfolgt analog zu den LMM auch beim MLT durch die Summierung der häufigkeitsgemittelten Leitmerkmalwichtungen und die anschließende Multiplikation dieser mit der jeweiligen Zeitwichtung. Durch die kumulierte Schichtbetrachtung bleibt jedoch die Verteilung der Belastungs- und Erholungszeiten über die Zeit unberücksichtigt (Ellegast 2005, S. 26). Durch die anteilige Zeitwichtung für jede Handhabungsart sind zusätzlich diese Punktwerte zu einer Gesamtbewertung zu summieren (Schaub et al. 2010, S. 128). Mit Hilfe des MLT können somit unterschiedliche Handhabungsarten mit heterogenen Ausprägungen im innerbetrieblichen Milkrun erfasst und ergonomisch bewertet werden. Durch den grundlegenden Bezug des Verfahrens zu den etablierten LMM ist von einer hohen Validität und Akzeptanz auszugehen, so dass zur planungsbasierten Bewertung der Belastung von manuellen Lastenhandhabungen in innerbetrieblichen Milkrun-Systemen das MLT im Rahmen des Projekts eingesetzt wird.

Im nachfolgenden Kapitel wird die mathematische Modellierung des bisher erarbeiteten Planungskonzepts detailliert beschrieben und in Form eines rechnergestützten Planungshilfsmittels implementiert.

4.6 Zusammenführung der Elemente in ein Planungskonzept

Zur Planung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme müssen die Randbedingungen und Anforderungen der Montage berücksichtigt werden. Die Analyse dieser zeigt, dass die Minimierung der Taktzeit eines Milkrun-Systems als sinnvolle Zielgröße angesehen werden kann (vgl. Abschnitt 4.3).

Der Erreichung dieses Ziels stehen jedoch die drei Planungsdimensionen Zeit, Kapazität und Ergonomie mit ihren Restriktionen gegenüber. So hat ein Milkrun-Zyklus innerhalb einer festen Taktzeit mit vertretbaren körperlichen Belastungen und beschränkten Transportkapazitäten zu erfolgen (vgl. Abschnitt 4.4). Diese Planungsdimensionen sind wiederum abhängig von Einflussgrößen, die direkt oder indirekt auf eine oder mehrere Planungsdimensionen wirken. So hat z. B. die Anzahl bereitzustellender LT sowohl einen zeitlichen, kapazitiven und ergonomischen Einfluss (vgl. Abschnitt 4.5). Durch diesen Mechanismus sind die Planungsdimensionen nicht unabhängig voneinander, sondern stehen teilweise in Wechselwirkungen.

Die Einflussgrößen ergeben sich aus unternehmensspezifischen Randbedingungen und hängen somit in entscheidendem Maße von den Gestaltungsfeldern eines Milkrun-Systems ab. Aus diesen

Zusammenhängen ergibt sich eine hierarchische Gliederung eines Planungsmodells für innerbetriebliche Milkrun-Systeme (vgl. Abbildung 22).

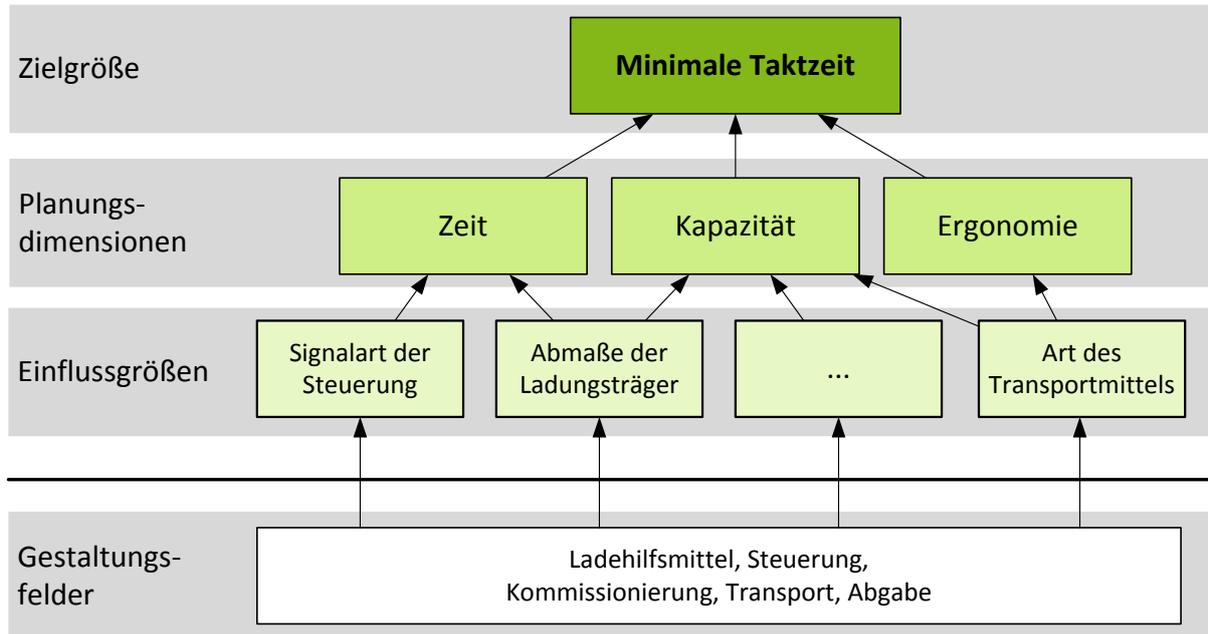


Abbildung 22: Schematische Modellhierarchie zur Planung von Milkrun-Systemen

Zur Optimierung der Zielgröße werden somit unternehmensspezifische Einflussgrößen herangezogen, die im Rahmen der drei Planungsdimensionen Zeit, Kapazität und Ergonomie hinsichtlich einer Überschreitung von Randbedingungen bewertet werden und so letztendlich zu einer Optimierung des Milkrun-Systems führen.

Zur Erarbeitung eines mathematischen Entscheidungsmodells müssen die Planungsdimensionen und Einflussgrößen operationalisiert werden. In diesem Zusammenhang ist es erforderlich, für jede Planungsdimension ein geeignetes Verfahren zur operativen Abbildung und Verarbeitung der Einflussgrößen auszuwählen.

5 Entwicklung eines mathematischen Planungsmodells

Nachdem in den vorherigen Kapiteln das Planungskonzept mit seinen Planungsdimensionen und die Verfahren zur Abbildung qualitativ beschrieben wurden, stellt der Kern dieses Kapitels die detaillierte Ausformulierung und mathematische Modellierung der Sachverhalte und Zusammenhänge im Planungskonzept dar. Die grundlegende Struktur des Planungsmodells lässt sich in die drei aufeinander folgenden Schritte Input, Verarbeitung und Output unterteilen (vgl. Abbildung 23).

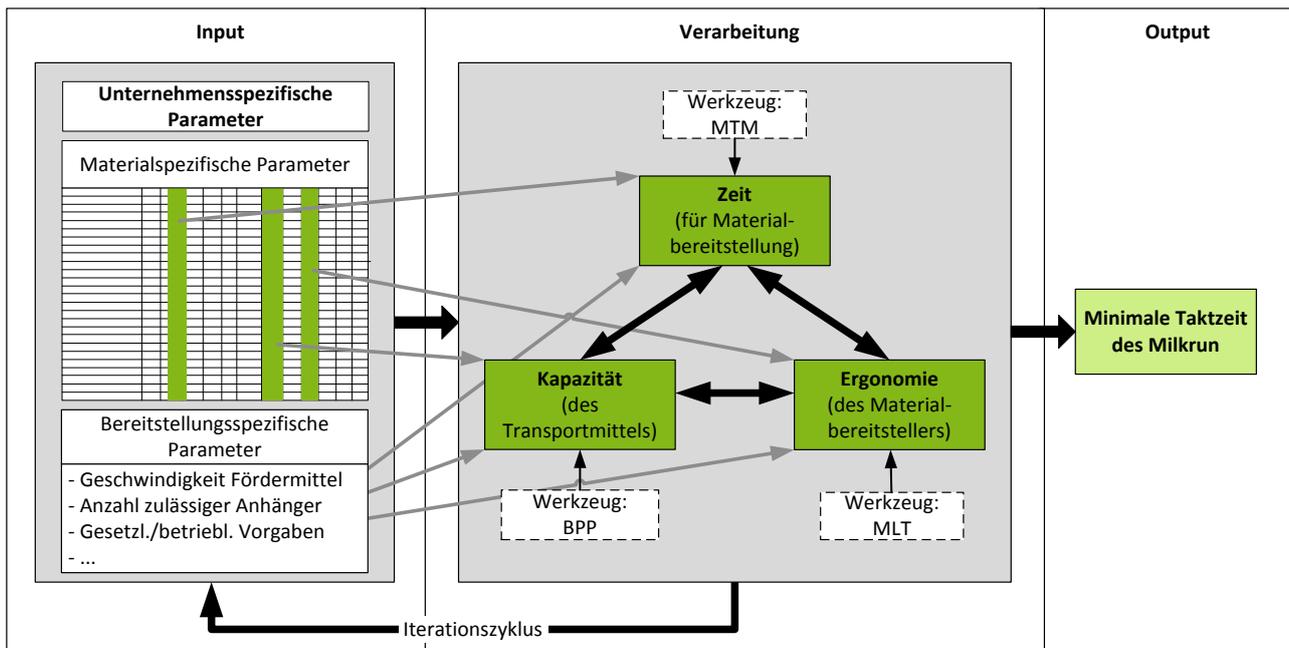


Abbildung 23: Grundlegende Struktur des Planungsmodells
(in Anlehnung an Droste, Hasselmann, Deuse 2012, S. 27)

Im ersten Schritt (Input) sind unternehmensspezifische Parameter durch einen Planer festzulegen, welche als Eingangsgrößen in das Modell einfließen. Für die Berechnung der einzelnen Planungsdimensionen sind LT-Verbräuche und -Gewichte von entscheidender Bedeutung, welche zunächst aus den unternehmensspezifischen Parametern ermittelt werden müssen (vgl. Abschnitt 5.2).

Diese Verbräuche und Gewichte gehen zusammen mit den anderen Eingangsgrößen in den nachfolgenden Schritt (Verarbeitung) ein. Hier erfolgt die Berechnung der jeweiligen Planungsdimensionen Zeit (vgl. Abschnitt 5.3), Kapazität (vgl. Abschnitt 5.4) und Ergonomie (vgl. Abschnitt 5.5).

Im letzten Schritt (Output) wird das Ergebnis der Berechnung anhand der planerischen Restriktionen bewertet (vgl. Abschnitt 5.6). Gesucht ist die kleinstmögliche Taktzeit eines Milkrun-Systems, bei der die mit MTM bewertete Zykluszeit kleiner ist als diese Taktzeit und die Transportkapazität sowie ergonomische Belastung einen vom Planer vorgegebenen Grenzwert nicht überschreitet. Hierbei wird zunächst von einem Milkrun-System ausgegangen, welches durch einen Schleppzug und einen Mitarbeiter repräsentiert ist. Zeigt die Bewertung, dass unter gegebenen Eingangsgrößen

dieses System nicht durchführbar ist, folgt im Rahmen einer Iteration die Anpassung der Eingangsgrößen, was zu größeren Milkrun-Systemen mit mehr Schleppzügen und/oder Mitarbeitern führt.

Anhand der oben dargestellten Abbildung wird die Struktur des Modells deutlich, welches nachfolgend mathematisch formuliert wird.

5.1 Material- und bereitstellungsspezifische Parameter

Zur Beschreibung der materialspezifischen Parameter werden diese in die Kategorien Materialstammdaten, Ladungsträger, Quelle und Senke unterteilt, wodurch eine systematische Erhebung der Daten durch den Planer möglich ist. Einen Überblick über die von ihm zu erhebenden Informationen für jedes bereitzustellende Material ist in Abbildung 24 dargestellt.

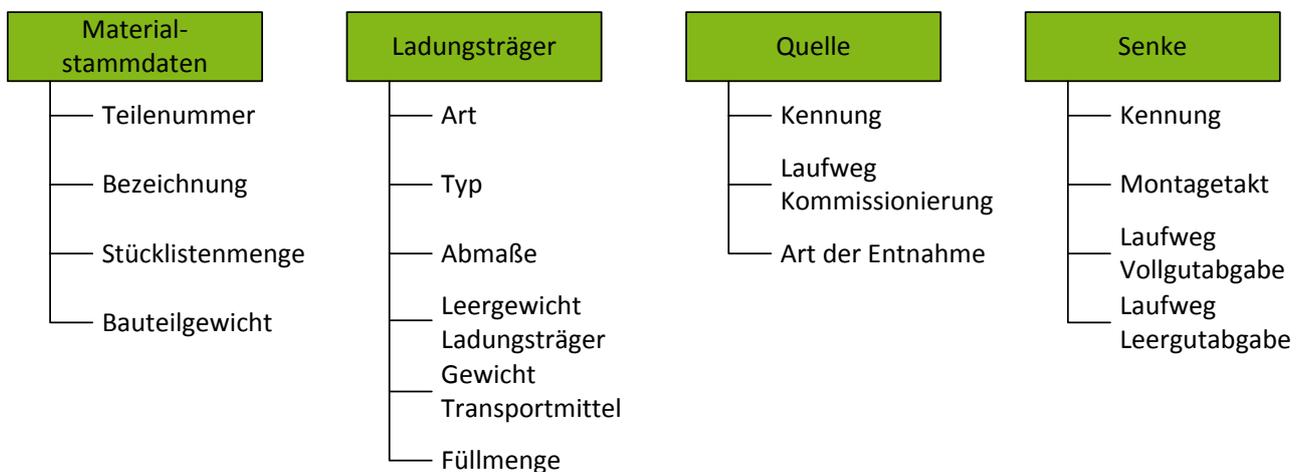


Abbildung 24: Erforderliche materialspezifische Parameter

Die Materialstammdaten beziehen sich jeweils auf ein Bereitstellungsgut, welches durch die Teilenummer eindeutig identifiziert ist und weiterhin die Parameter Bezeichnung, Stücklistenmenge und Bauteilgewicht umfasst. Durch den Parameter Bezeichnung kann der Planer in Klartext das Material beschreiben. Diese ersten Größen sind für die Modellierung im engeren Sinne nicht erforderlich, unterstützen jedoch bei der sinnvollen Weiterverarbeitung des Ergebnisses, in dem sie dem Planer eine Vorstellung des Materials geben. Die Stücklistenmenge $n_{SL,i}$ beschreibt in Analogie zu einer Stücklistenauflösung nach DIN 199-1 (2002, S. 13) die Anzahl an Mengeneinheiten eines Materials i , dass in ein Produkt einfließt. Diese Information ist erforderlich, um den LT-Verbrauch zu ermitteln. Das Bauteilgewicht $m_{Teil,i}$ ist das Gewicht eines Bauteils oder einer Baugruppe des Materials i in kg und wird zur Berechnung des LT-Gewichts herangezogen.

Die zweite Kategorie stellt mit den Parametern Art, Typ, Abmaße, Leergewicht und Füllmenge Charakteristika des LT dar. Der Parameter Art dient der Unterscheidung zwischen KLT und GLT und kann somit nur diese Ausprägungen annehmen. Der Typ $\lambda_{LT,i}$ ist ein alphanumerischer Wert, welcher den LT des Materials i eindeutig identifiziert. Beispielhaft seien hier die Bezeichnung

„4315“ für einen VDA-KLT mit den Nennmaßen 400 x 300 x 147 mm zu nennen (VDA 4500:2006, S. 7). Hinsichtlich der Abmaße des LT eines Materials i sind vor allem die Länge $l_{LT,i}$ und Breite $b_{LT,i}$ von Relevanz. Die Höhe ist aufgrund der Restriktion, dass LT nicht gestapelt werden, zu vernachlässigen (vgl. Abschnitt 4.4.2). Das Leergewicht eines LT $m_{LT,i}^{leer}$ und das Gewicht $m_{TM,i}$ der GLT-Anhänger bzw. Bodenroller von Material i sind ebenfalls vom Planer anzugeben, da sie Komponenten zur Errechnung des Gesamtgewichts eines LT in der Materialbereitstellung darstellen. Abschließend ist im Rahmen der Kategorie Ladungsträger die Füllmenge $n_{Fill,i}$ eines LT von Material i relevant, da hierdurch der Inhalt des LT und somit die Reichweite von Material i ermittelt werden kann.

Die Kategorie Quelle umfasst die drei Parameter Kennung, Laufweg Kommissionierung und Art der Entnahme. Über die Kennung der Quelle q_i , von der Material i kommissioniert wird, kann die Anzahl der Quellen N_Q im Milkrun-System bestimmt werden. Durch den Laufweg in der Kommissionierung $d_{KOM,i}$ prägt der Planer die einfache Distanz zwischen Schleppzug und dem jeweiligen Material i aus. Die Art der Entnahme α_i für Material i kann gemäß der erarbeiteten Morphologie (vgl. Abschnitt 3.4) in vier Prozessausprägungen unterteilt werden, welche für die Berechnung innerhalb der Planungsdimensionen von Bedeutung sind. Mathematisch kann die Gesamtmenge aller Materialien in vier disjunkte, strikt geordnete Teilmengen KR , KP , GA und GB unterteilt werden:

- $(KR, <)$ mit $KR = \{i | \alpha_i = KR\}$
Menge aller Materialien i mit KLT-Entnahme aus Regal
- $(KP, <)$ mit $KP = \{i | \alpha_i = KP\}$
Menge aller Materialien i mit KLT-Entnahme von Palette (Bodenlagerung)
- $(GA, <)$ mit $GA = \{i | \alpha_i = GA\}$
Menge aller Materialien i mit GLT-Entnahme durch Ankuppeln von Anhängern
- $(GB, <)$ mit $GB = \{i | \alpha_i = GB\}$
Menge aller Materialien i mit GLT-Entnahme durch Schieben von Bodenrollern in Trägerwagen

Diese Ausprägungen determinieren die weiteren Prozessschritte in der Anstellung am Arbeitssystem und der Leergutabgabe (vgl. Abbildung 43). So ist für KLT die Ausprägung KP bei der Materialanstellung nicht relevant, da kommissionierte LT an den Arbeitsstationen nicht wieder in Bodenlagerung abgegeben werden. Ebenso ist bei der Leergutabgabe von KLT die Ausprägung KR nicht relevant, da diese auf Paletten wieder zu Großgebinden zusammengestellt werden.

Die Kategorie Senke besteht aus den Größen Kennung, Montagetak, Laufweg Vollgutabgabe und Laufweg Leergutabgabe. Die Kennung s_i kennzeichnet die Senke, an der Material i bereitgestellt

werden soll und gibt Aufschluss über die Anzahl an Senken N_S , die beliefert werden müssen. Die Parameter Laufweg Vollgutabgabe $d_{VGA,i}$ und Laufweg Leergutabgabe $d_{LGA,i}$ beschreiben analog zur Kommissionierung die Distanz zwischen Schleppzug und jeweiligem Abgabeplatz von Material i an den Arbeitsstationen und im Leergutbereich. Letzter Parameter der Kategorie ist die Taktzeit $t_{Takt,i}$ der Senke (Montagetakt), an der Material i bereitgestellt wird. Bei der Belieferung mehrerer Montagesysteme innerhalb eines Milkrun-Systems kann dieser je nach Senke variieren und stellt somit einen materialspezifischen Parameter dar. Bei der Ausprägung des Parameters sollte vom kürzesten Montagetakt ausgegangen werden, da diese Worst Case-Betrachtung zu einem maximalen Verbrauch an LT über einen längeren Zeitraum führt, wofür das System ausgelegt sein muss (vgl. Abbildung 42).

Neben diesen Parametern ist ein weiterer Aspekt für den Planer bei der Datenerhebung zu berücksichtigen. Variantenwechsel in der Montage führen zu unterschiedlichen Kombinationen bestimmter Variantenmaterialien. Diese gehören nach REFA (1991a, S. 358ff.) zu den Strukturvarianten und können dahingehend eingeteilt werden, ob alternativ zwischen verschiedenen Materialien entschieden werden muss (Mussvarianten) oder Materialien zusätzlich gewählt werden können (Kannvarianten).

Um dies mittels der eingeführten materialspezifischen Parameter abbilden zu können, stehen dem Planer grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen können im Sinne einer Konsolidierung alle erforderlichen Stücklisten zu logistisch relevanten Varianten zusammengeführt werden. Hierbei werden alle Ausprägungen eines Variantenteils in ein generisches Variantenteil zusammengefasst, so dass möglichst alle logistisch relevanten Eigenschaften, wie Größen, Gewichte oder Füllmengen der LT repräsentativ sind. Zum anderen kann für jede zu fertigende Produktvariante die entsprechende Materialkombination parametrisiert und somit für jede Variante eine spezifische Milkrun-Taktzeit ermittelt werden.

Neben den materialspezifischen existieren weitere bereitstellungsspezifische Parameter, welche vom Planer anzugeben sind. Diese können in die Kategorien Kommissionierung und Abgabe sowie Transport unterteilt werden (vgl. Abbildung 25).

In der Kategorie Kommissionierung und Abgabe existieren eine Reihe an ausprägenden Parametern. Durch die Binärvariable μ wird ausgeprägt, ob im Kommissionierbereich der Quelle einseitig ($\mu = 0$) oder beidseitig ($\mu = 1$) des Transportmittels Material aus den Bereitstellplätzen entnommen wird, d. h. eine einseitige oder beidseitige Beladung des Transportmittels durchgeführt wird.

Für die Ermittlung von Beugeanteilen des Mitarbeiters bei der Kommissionierung und Abgabe geben die Parameter Höhe eines KLT-Anhängers h_{AH} und Höhe der untersten Ebene eines KLT-Anhängers h_{UE} Aufschluss über die Greif- bzw. Abgabehöhe.

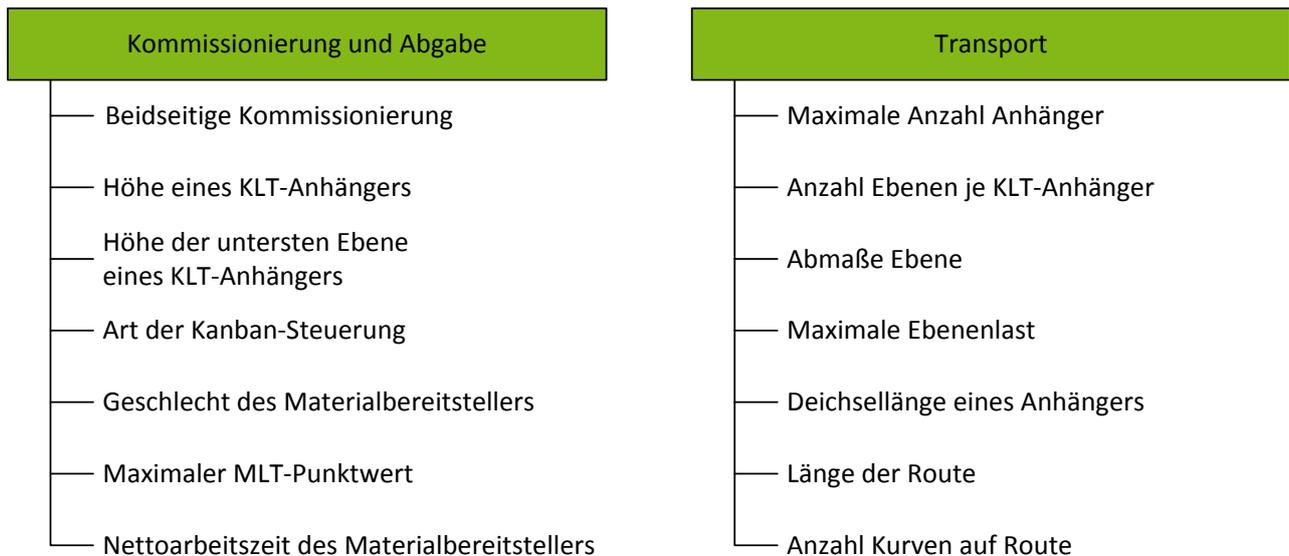


Abbildung 25: Erforderliche bereitstellungsspezifische Parameter

Die Art der Kanban-Steuerung φ wird als Parameter wie folgt dargestellt:

- $\varphi = KK$: Karten-Kanban
- $\varphi = BK$: Behälter-Kanban
- $\varphi = EK$: eKanban

Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass keine materialspezifischen Steuerungen zum Einsatz kommen, sondern alle Materialien durch das gleiche Kanban-System gesteuert werden.

Einen weiteren, besonders für die Ergonomie relevanten Parameter stellt das Geschlecht des Materialbereitstellers g_{MA} mit $g_{MA}=0$ für männliche und $g_{MA}=1$ für weibliche Materialbereitsteller dar. Weiterhin sind der maximal zulässige Punkt看wert PW_{max} nach LMM und MLT sowie die Nettoarbeitszeit t_{AZ} des Materialbereitstellers wichtige vom Planer vorzugebende Kriterien für die Ergonomie.

Beim Transportprozess sind vor allem die technischen Ausprägungen des Transportmittels von Relevanz. So gibt die maximale Anzahl Anhänger $n_{AH,max}$ je Schleppfahrzeug für die Planungsdimension Kapazität eine Obergrenze der Transportkapazität an. Hierfür sind zudem die Anzahl Ebenen je KLT-Anhänger $n_{E,AH}$, die Abmaße einer Ebene l_E und b_E sowie die Maximallast einer Ebene $m_{E,max}$ zu berücksichtigen. Die Deichsellänge l_D eines Anhängers ist für die Berechnung der Wegzeiten um den Schleppzug von Relevanz. Zur Berechnung der Transportzeit sind die Länge der Route d_{Route} und die Anzahl der 90° -Kurven n_{Kurve} entlang der Route von Relevanz.

5.2 Ermittlung von Ladungsträgerverbrauch und -gewicht

Auf Basis der material- und bereitstellungsspezifischen Parameter ist in einem nachfolgenden Schritt die Ermittlung der LT-Verbräuche und -Gewichte jedes Materials i möglich. Die Vorabrechnung dieser Werte ist erforderlich, da sie in alle drei Planungsdimensionen als Eingangsgrößen einfließen.

Zur Bestimmung des LT-Verbrauchs von Material i ist es erforderlich, die Reichweite $t_{RW,i}$ eines LT zu ermitteln, welche sich ergibt aus:

$$t_{RW,i} = \frac{n_{Füll,i} \cdot t_{Takt,i}}{n_{SL,i}} \quad (1)$$

$t_{RW,i}$ beschreibt somit, nach welcher Zeit ein LT des Materials i bei gegebenem Montagetakt und Stücklistenmenge verbraucht ist. Der reziproke Wert stellt folglich die Verbrauchsrate $r_{LT,i}$ dar:

$$r_{LT,i} = \frac{1}{t_{RW,i}} \quad (2)$$

Sie gibt an, welcher Anteil eines LT pro Minute verbraucht wird. Hierdurch kann durch Multiplikation der geplanten Taktzeit τ die mittlere Anzahl verbrauchter LT $n_{LT,i}$ von i in diesem Zeitraum ermittelt werden:

$$n_{LT,i} = r_{LT,i} \cdot \tau \quad (3)$$

Um Starvation von einzelnen Materialien an den Senken zu vermeiden, ist es daher erforderlich, die geplante Taktzeit durch den Milkrun einzuhalten, d.h. die Zykluszeit zur Belieferung der verbrauchten LT (Wiederbeschaffungszeit) muss kleiner sein als die geplante Taktzeit (LT-Verbrauch) (vgl. Abschnitt 4.4.1).

Rein rechnerisch treten häufig nicht-ganzzahlige LT-Verbräuche, wie z. B. 2,3 LT eines Materials pro 15 min, auf. Dies bedeutet, dass in zwei Bereitstellungszyklen jeweils zwei und im dritten Zyklus einmal drei LT gehandhabt werden. Hierdurch wird ein Verbrauchs- und somit Bereitstellungsmuster der Art 2, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 2, 3, ... erzeugt. Die Grundlast von zwei LT wird als Base Flow (BF), die durch den wiederkehrenden, zusätzlichen LT beschriebene Obergrenze als Additional Flow (AF) bezeichnet (in Anlehnung an Ciernoczołowski 2007, S. 17). Daher ergibt sich für den Base Flow eines Materials i :

$$n_{BF,i} = \lfloor r_{LT,i} \cdot \tau \rfloor \quad \text{mit} \quad n_{BF,i} \leq r_{LT,i} \cdot \tau \leq n_{BF,i} + 1 \quad (4)$$

Der Additional Flow kann dagegen als ein um eins erhöhter Base Flow oder als aufgerundete mittlere Anzahl an LT angesehen werden. Für den Base Flow des gesamten Systems für k unterschiedliche Materialien schwankt die Gesamtzahl an LT um k , da Base Flow und Additional Flow sich genau um k Einheiten unterscheiden. Zur Berechnung der einzelnen Planungsdimensionen werden

sowohl mittlere Anzahlen als auch Additional Flow-Anzahlen an LT herangezogen, auf welche an den entsprechenden Stellen im weiteren Verlauf näher eingegangen wird.

Zur Ermittlung der LT-Gewichte muss zunächst zwischen Leergewichten und Vollgewichten unterschieden werden. Während das Leergewicht eines LT $m_{LT,i}^{leer}$ bereits als Eingangsparameter ausgeprägt ist, ergibt sich das Vollgewicht eines LT von Material i durch die allgemeine Gleichung:

$$m_{LT,i} = (m_{Teil,i} \cdot n_{Füll,i}) + m_{LT,i}^{leer} + m_{TM,i} \quad (5)$$

Für LT eines Materials i , welche auf Transportmitteln bereitgestellt werden, ist zu dem Leergewicht $m_{LT,i}^{leer}$ des LT selbst das Gewicht des Transportmittels $m_{TM,i}$ zu berücksichtigen. Für KLT, bei denen ein manueller Umschlag erfolgt, sei $m_{TM,i} = 0$ kg. Weiterhin setzt sich bei der Bereitstellung von KLT-Türmen $m_{LT,i}^{leer}$ aus der Summe der einzelnen KLT-Leergewichte und dem Leergewicht des GLT zusammen und muss entsprechend vom Planer bei der Erhebung berücksichtigt werden.

Aufbauend auf den dargestellten Vorberechnungen können nachfolgend die einzelnen Planungsdimensionen modelliert werden.

5.3 Modellierung der Planungsdimension Zeit

Als wichtige Eingangsgröße zur Berechnung der geplanten Zykluszeit eines Milkrun dienen die LT-Verbräuche. Für die Planungsdimension Zeit ist es sinnvoll, die mittlere Anzahl verbrauchter LT $n_{LT,i}$ heranzuziehen, da der zeitliche Aufwand für den zyklisch auftretenden Additional Flow in den nachfolgenden Zyklen wiederum ausgeglichen werden kann (vgl. Abbildung 42). Eine Worst Case-Betrachtung dagegen führt in der Planung zu in der Realität nicht erforderlichen Zeitpuffern, welche die Taktzeit unnötig vergrößern.

Zentrale Anforderung der Planungsdimension ist es, dass die nachfolgend zu ermittelnde Zykluszeit t_z kleiner oder gleich der geplanten Taktzeit τ des Milkrun-Systems ist, da nur so der LT-Verbrauch eines Milkrun-Takts innerhalb des nachfolgenden Takts wieder bereitgestellt werden kann (vgl. Abschnitt 4.4.1):

$$t_z \leq \tau \quad (6)$$

Die Zykluszeit t_z in Minuten ergibt sich aus der Zeit für den manuellen Umschlag der verbrauchten LT t_{HH} , der Zeit für die Informationsverarbeitung der Verbrauchssignale t_{IV} und der Zeit für den Transport der LT t_{TP} entlang der Route:

$$t_z = t_{HH} + t_{IV} + t_{TP} \quad (7)$$

Nachfolgend werden die einzelnen Zeitanteile der Zykluszeit näher beschrieben und mittels MTM im Detail modelliert. Diese gelten unter der aus wirtschaftlicher Sicht bevorzugten Prämisse, dass der Milkrun-Mitarbeiter in einem gekoppelten Zyklus alle Prozesse selbstständig durchführt. Stehen

Restriktionen, wie eine unzulässige körperliche Belastung oder nicht ausreichende Transportkapazität der Ausführung entgegen, können Prozesse, wie das Kommissionieren oder die Abgabe an zusätzliche Mitarbeiter übergeben werden. Hierdurch ändert sich der Handhabungszeitanteil. Nachfolgend wird jedoch von einem gekoppelten Zyklus ausgegangen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit erfolgt die Berechnung der Zykluszeitanteile im weiteren Verlauf in TMU, deren Summe anschließend in Minuten umgerechnet werden muss.

5.3.1 Handhabungszeit

Die Handhabungszeit t_{HH} umfasst alle zur LT-Handhabung erforderlichen Tätigkeiten des Milkrun-Mitarbeiters und setzt sich aus den Zeitanteilen der Kommissionierung t_{KOM} , der Vollgutabgabe an den Arbeitsstationen t_{VGA} und der Leergutrückgabe t_{LGA} zusammen:

$$t_{HH} = t_{KOM} + t_{VGA} + t_{LGA} \quad (8)$$

Sie ist maßgeblich von der Art des handzuhabenden LT abhängig, da durch sie unterschiedliche Prozesse auftreten. Daher wird im weiteren Verlauf der Modellierung die Handhabungszeit nach KLT und GLT unterschieden.

Kommissionierung

Der Kommissionierprozess beginnt, sobald der Materialbereitsteller das Schleppfahrzeug verlassen hat und endet nach seiner Rückkehr zum Schleppfahrzeug. Der Einstieg in und Ausstieg aus dem Fahrzeug wird im Rahmen der Transportzeit berücksichtigt (vgl. Abschnitt 5.3.3). Zur einfacheren Modellierung wird als Abgabepunkt von kommissionierten LT der Mittelpunkt der Anhänger (Basispunkt) herangezogen, von welchem die Umschlagprozesse ausgehen. Somit setzt sich die Zeit für die Kommissionierung aus der Zeit t_B für den Gehweg vom Schleppfahrzeug zum Basispunkt, der Zeit für einen möglichen Seitenwechsel bei der beidseitigen Kommissionierung t_{SW} und den Zeiten für den LT-Umschlag von KLT und GLT zusammen:

$$t_{KOM} = t_B + t_{SW} + t_{KOM}^{KR} + t_{KOM}^{KP} + t_{KOM}^{GA} + t_{KOM}^{GB} \quad (9)$$

Der Zeitanteil t_B ist wiederum abhängig vom zurückgelegten Weg d_B bis zur Mitte der Anhänger und zurück, welcher sich aus 1 m zur Überbrückung des Schleppfahrzeugs und der halben Gesamtlänge der Anhänger samt Deichsel ergibt (vgl. Abbildung 26). Hierbei ist zu beachten, dass Laufwege und Fahrwege nach MTM stets auf ganze Meter aufzurunden sind.

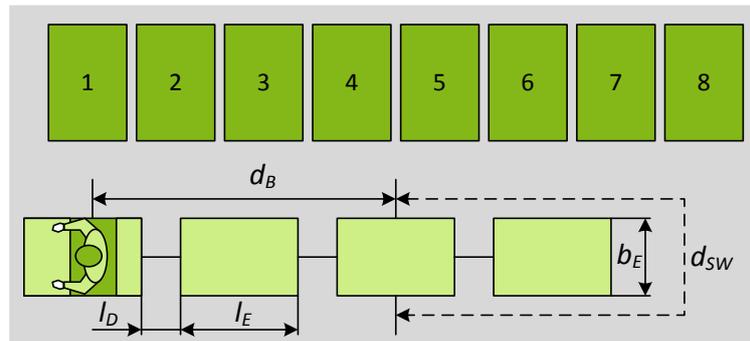


Abbildung 26: Bestimmung der Wege d_B und d_{SW} für die Kommissionierung

Hieraus ergibt sich nachfolgender mathematischer Zusammenhang für die Berechnung von t_B :

$$t_B = KA \cdot 2 \cdot \lceil d_B \rceil = KA \cdot 2 \cdot \left\lceil 1 + \frac{n_{AH} \cdot (l_E + l_D)}{2 \cdot 1.000 \text{ mm}} \right\rceil \quad (10)$$

Für eine beidseitige Kommissionierung ($\mu = 1$) ergibt sich unter der Annahme, dass der Schlepplager über die Hinterseite umrundet wird, der Zeitanteil t_{SW} von Mittelpunkt der einen zu Mittelpunkt der anderen Seite aus der Gesamtlänge der Anhänger samt Deichsel und der Anhängerbreite.

$$t_{SW} = \mu \cdot KA \cdot \lceil d_{SW} \rceil = \mu \cdot KA \cdot \left\lceil \frac{n_{AH} \cdot (l_E + l_D) + b_E}{1.000 \text{ mm}} \right\rceil \quad (11)$$

Zur Berechnung der weiteren Kommissionierzeitanteile sind zunächst einige Annahmen zu treffen. Erstens sind alle Bereitstelleinheiten in Längseinlagerung zu platzieren, da sie so für nachbeschickende Stapler einfacher handzuhaben sind und GLT auf Anhängern oder Bodenrollern aufgrund des Rangierplatzes nur so bereitgestellt werden können (vgl. Abbildung 26). Zweitens hält der Schlepplager stets in der Mitte des Supermarkts, um eine optimale Erreichbarkeit aller Materialstellplätze zu gewährleisten. Drittens ist der Parameter $d_{KOM,i}$ so zu bemessen, dass er die Strecke vom Basispunkt der jeweiligen Seite des Schlepplagers bis zur Mitte der Stellplatz beschreibt. Unter der Annahme, dass durch den Mitarbeiter aufgrund der typischen Gangbreiten von maximal 3,0 bis 3,4 m im Lager kein zeitrelevanter Weg quer zur Fahrtrichtung des Zugs zu überbrücken ist (Gudehus 2010, S. 589), kann für den Planer zur Bestimmung von $d_{KOM,i}$ von einem Palettenmodul l_M ausgegangen werden. Die hierfür erforderlichen Abstände (auch Freimaß oder Freiraum) zwischen den Paletten sind nach DIN EN 15620 (2010, S. 23) auf Bodenhöhe mit mindestens 75 mm zu bemessen. Da gängige Regalmodulmaße einen Abstand von 100 mm aufweisen, sollte nachfolgend von Palettenmodul l_M von 900 mm ausgegangen werden (vgl. Abbildung 27).

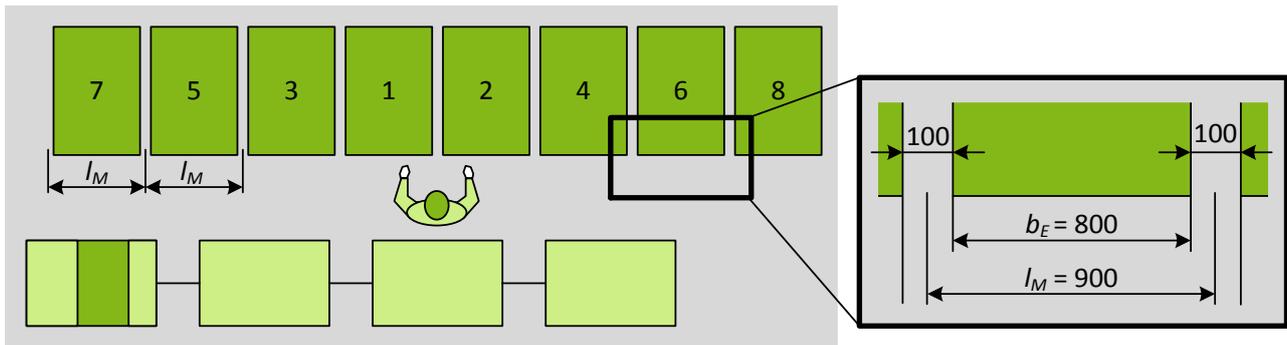


Abbildung 27: Möglichkeit zur Ermittlung des Wegs $d_{KOM,i}$ für die Kommissionierung

Die Handhabung von KLT im Supermarkt kann durch Entnahme aus einem Regal ($\alpha_i = KR$) oder von einem Großgebäude, wie einem KLT-Turm ($\alpha_i = KP$), erfolgen.

Für die Bereitstellung in einem Regal wird die zurückzulegende Wegzeit bei MTM UAS mittels des Zeitbausteins KA für das Laufen pro Meter in der entsprechenden Anzahl und Häufigkeit bewertet.

Zudem fällt ein anteiliges Beugen je nach Entnahmehöhe an (vgl. Goldscheid 2008, S. 21f.). Nach MTM UAS wird ein Beugen bewertet, wenn der Rumpf derart vorgeneigt wird, dass die Hände die Knie erreichen können. Gemäß DIN 33402-2 (2005, S. 14) liegt dieser Tibialhöhe genannte Wert für Männer bei 460 mm bzw. für Frauen bei 425 mm. Somit kann für das Aufnehmen von KLT aus den Bereitstellplätzen auf Basis des von Gudehus (2010, S. 686) empfohlenen Greifintervalls von 200 bis 1.800 mm ein geschlechtsabhängiger, prozentualer Beugeanteil für die KLT-Entnahme am Regal von 16,3 % für Männer und 14,1 % für Frauen ermittelt werden (vgl. Abbildung 28).

$$p_{BG}^{KR} = \frac{(460 \text{ mm} - 35 \text{ mm} \cdot g_{MA}) - 200 \text{ mm}}{1.800 \text{ mm} - 200 \text{ mm}} \quad \text{für } g_{MA} = \{0;1\} \quad (12)$$

Ein weiteres anteiliges Beugen ist für den gesamten Zyklus beim Platzieren des LT auf dem Anhänger erforderlich. Dies ist neben dem Geschlecht des Mitarbeiters abhängig von der Höhe der ersten Ebene über dem Boden und der Gesamthöhe eines beladenen Anhängers, welcher sich je nach betrieblicher Ausführung stark unterscheiden kann und somit parametrisiert wird.

$$p_{BG}^{AH} = \frac{(460 \text{ mm} - 35 \text{ mm} \cdot g_{MA}) - h_{UE}}{h_{AH} - h_{UE}} \quad \text{für } g_{MA} = \{0;1\} \quad (13)$$

Zur zeitlichen Bewertung des Aufnehmens eines KLT aus einem Regal wird ein von den Abmaßen (Sperrigkeit) und dem Gewicht des vollen LT abhängiger Baustein AP_i^{voll} herangezogen. Weiterhin ist aufgrund der Gegebenheiten von einem leichten Aufnehmen und ungefähren Platzieren auszugehen, was den UAS Bausteinen AA, AH und AL entspricht (vgl. Tabelle 9). Der Entfernungsbereich liegt als Restentfernung stets bei eins, da das Aufnehmen und Platzieren aus dem Laufen erfolgt (Bokranz, Landau 2012a, S. 493). Unter der Annahme, dass jeweils nur ein LT pro Umsetzvorgang

manipuliert wird, ergibt sich für die Kommissionierzeit von KLT aus Regalen t_{KOM}^{KR} daher folgender Zusammenhang:

$$t_{KOM}^{KR} = \underbrace{KA \cdot \sum_{i \in KR} (n_{LT,i} \cdot 2 \cdot \lceil d_{KOM,i} \rceil)}_{\text{Zeit für Laufweg}} + \underbrace{KB \cdot (p_{BG}^{KR} + p_{BG}^{AH}) \cdot \sum_{i \in KR} (n_{LT,i})}_{\text{Zeit für anteiliges Beugen beim Aufnehmen und Platzieren}} + \underbrace{\sum_{i \in KR} (n_{LT,i} \cdot AP_i^{voll})}_{\text{Zeit für Aufnehmen und Platzieren}} \quad (14)$$

Für den Prozess KLT von Großbinde entnehmen fallen grundsätzlich die gleichen Bewegungen des Mitarbeiters an wie zuvor. Zusätzlich werden jedoch aufgrund der sich immer weiter reduzierenden Anzahl an LT auf der Palette neben dem Beugen anteilige Zeiten für das Betreten der Palette zum LT fällig (vgl. Abbildung 28).

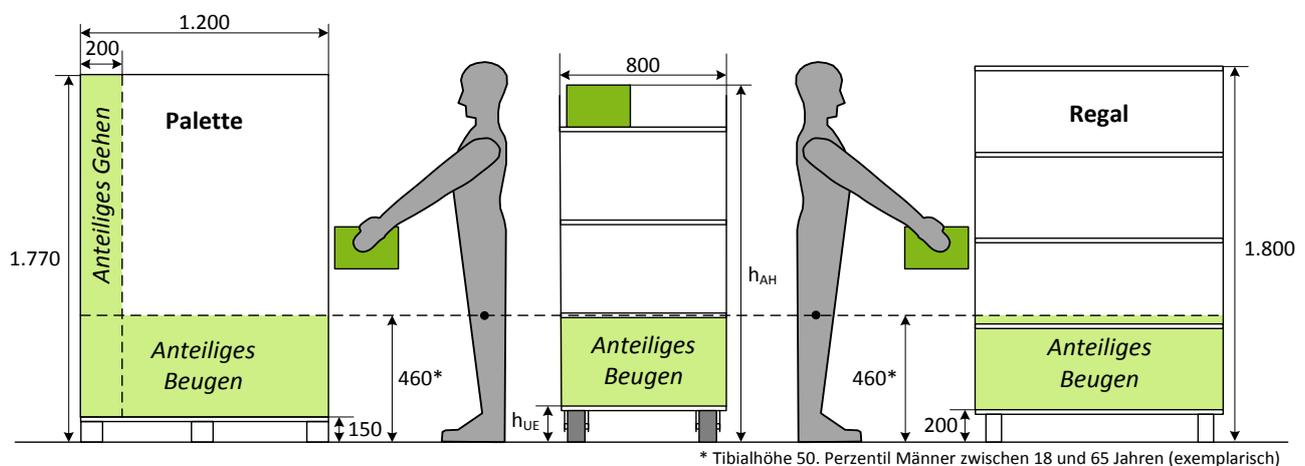


Abbildung 28: Bestimmung der prozentualen Anteile für Beugen und Betreten der Palette

Ab einer Greiftiefe größer 1 m unternimmt der Mitarbeiter einen Schritt auf die Palette und verlässt diese nach dem Aufnehmen des LT wieder. Bei einer Palettentiefe von 1.200 mm fällt dieser Vorgang gemittelt in 16,7 % der Fälle an.

Hinsichtlich des Beugeanteils bei der KLT-Aufnahme von Palettenstellplätzen kann gemäß Empfehlung der Centrale für Coorganisation GmbH (CCG) von Ladungshöhen zwischen 1.450 und 1.800 mm (CCG II-Maß) ausgegangen werden (ten Hompel, Schmidt, Nagel 2007, S. 21). Da KLT nach VDA 4500 (2006, S. 27) über standardisierte Höhen von 147,5 bzw. 280 mm verfügen und sich auch mit den Stapelmaßen von 135 bzw. 270 mm in der Höhe modular zusammensetzen lassen, ergeben sich bei einem sortenreinen KLT-Turm im CCG II-Intervall ausschließlich drei mögliche Ladungshöhen von 1.485, 1.620 bzw. 1.755 mm. Da die Höhe von 1.620 mm von beiden KLT-Standardhöhen erreicht werden kann, soll sie für die weiteren Berechnungen als Maß dienen. Zusätzlich einer Palettenhöhe von 150 mm ergibt sich daher eine Ladehöhe von 1.770 mm, woraus sich der geschlechtsspezifische Beugeanteil bei der KLT-Entnahme von Palettenstellplätzen errechnen lässt.

$$p_{BG}^{KP} = \frac{(460 \text{ mm} - 35 \text{ mm} \cdot g_{MA}) - 150 \text{ mm}}{1.770 \text{ mm} - 150 \text{ mm}} \quad \text{für } g_{MA} = \{0;1\} \quad (15)$$

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen für den zweiten Summanden beschreibt die folgende, dreiteilige Gleichung die Berechnung der Kommissionierzeit von auf Paletten bereitgestellten KLT:

$$\begin{aligned}
 t_{KOM}^{KP} = & \underbrace{KA \cdot \sum_{i \in KP} (n_{LT,i} \cdot 2 \cdot \lceil d_{KOM,i} \rceil)}_{\text{Zeit für Laufweg}} + \underbrace{(2 \cdot KA \cdot 0,167 + KB \cdot (p_{BG}^{KP} + p_{BG}^{AH})) \cdot \sum_{i \in KP} (n_{LT,i})}_{\text{Zeit für anteiliges Betreten der Palette und Beugen beim Aufnehmen und Platzieren}} \\
 & + \underbrace{\sum_{i \in KP} (n_{LT,i} \cdot AP_i^{voll})}_{\text{Zeit für Aufnehmen und Platzieren}}
 \end{aligned} \quad (16)$$

Eine prozentuale Betrachtung des zweiten Summanden ist an dieser Stelle sinnvoll, da die schlechteste Kombination (in einem Zyklus 100 % Palette betreten und Beugen) nur äußerst selten anfällt und die resultierende Mehrzeit in den folgenden Zyklen ausgeglichen werden kann.

Hinsichtlich der Kommissionierung von GLT sind ebenfalls zwei Prozessvarianten zu unterscheiden. Zum einen kann eine GLT-Entnahme durch das direkte Ankuppeln von Anhängern an den Schleppzug erfolgen ($\alpha_i = GA$), zum anderen besteht die Möglichkeit, Bodenroller durch das Hineinschieben in Trägerwagen zu transportieren ($\alpha_i = GB$). Beide Fälle unterscheiden sich nur geringfügig und setzen sich aus Zeitanteilen für den Hinweg ohne LT, den Rückweg mit LT und die variierende Kupplung an den Schleppzug zusammen.

Während sich der Hinweg zum Bereitstellplatz durch den Mitarbeiter als einfache Gehbewegung ohne Zieh- und Schiebevorgänge ausprägt, ist für den Rückweg zum Schleppzug ein Anhänger bzw. Bodenroller zu manipulieren. Hier sind mittels MTM UAS eine Schiebezeit WF_i pro Meter sowie eine Beschleunigungs- und Verzögerungszeit WV_i^{voll} zu berücksichtigen, welche je nach Masse des zu manipulierenden Objektes unterschiedliche Werte annehmen können (vgl. Abbildung 45).

Zur zeitlichen Abbildung des Kupplungsvorgangs wird bei einem Anhänger der Baustein EANM (Ankuppeln, mit Hänger ausrichten) herangezogen, da ein Rangieren des Anhängers erforderlich ist. Hierbei kann jedoch in einem Ziehvorgang der Anhänger aus dem Stellplatz gefahren werden, so dass keine weiteren Beschleunigungs- und Verzögerungsprozesse anfallen. Auch erforderliche Körperbewegungen, wie das Beugen zum Aufnehmen der Deichsel, sind im Baustein bereits enthalten.

$$\begin{aligned}
 t_{KOM}^{GA} = & \underbrace{KA \cdot \sum_{i \in GA} (n_{LT,i} \cdot \lceil d_{KOM,i} \rceil)}_{\text{Zeit für Hinweg}} + \underbrace{\sum_{i \in GA} (n_{LT,i} \cdot (WV_i^{voll} + WF_i^{voll} \cdot \lceil d_{KOM,i} \rceil))}_{\text{Zeit für Rückweg mit Anhänger}} + \underbrace{EANM \cdot \sum_{i \in GA} (n_{LT,i})}_{\text{Zeit für Ankuppeln des Anhängers}}
 \end{aligned} \quad (17)$$

Im Gegensatz dazu wird ein Bodenroller in der Regel zunächst aus dem Stellplatz herausgezogen, abgebremst und anschließend mit einem erneuten Beschleunigungsprozess ebenerdig in den Trägerwagen geschoben. Die Arretierung für die Fahrt erfolgt in der Regel automatisch. Für das Einschieben wird daher der Baustein WV_i^{voll} in folgender Gleichung für t_{KOM}^{GB} zweimal berücksichtigt:

$$t_{KOM}^{GB} = KA \cdot \underbrace{\sum_{i \in GB} \left(n_{LT,i} \cdot \lceil d_{KOM,i} \rceil \right)}_{\text{Zeit für Hinweg}} + \underbrace{\sum_{i \in GB} \left(n_{LT,i} \cdot \left(2 \cdot WV_i^{voll} + WF_i^{voll} \cdot \lceil d_{KOM,i} \rceil \right) \right)}_{\text{Zeit für Rückweg mit Bodenroller und Einschieben in Trägerwagen}} \quad (18)$$

Für die Kommissionierung sind alle zeitrelevanten Prozesse bewertet, so dass im folgenden Abschnitt der Abgabeprozess detaillierter modelliert werden kann.

Vollgutabgabe und Leergutaufnahme

Der Abgabeprozess erfolgt zum einen an den Arbeitsplätzen, wo Vollgut gegen Leergut getauscht wird und zum anderen im Leergutsammelbereich, wo beim Tausch aufgenommenes Leergut abgegeben wird. Aufgrund der Übersichtlichkeit wird der Abgabeprozess nachfolgend in diese Teilprozesse untergliedert.

Von den vier in der Kommissionierung auftretenden Prozessvarianten finden sich beim LT-Tausch drei äquivalente Varianten wieder. So kann ein KLT in einen Zuführschacht und GLT als Anhänger oder Bodenroller bereitgestellt werden. Die Bereitstellung von KLT auf Paletten dagegen wird aufgrund mangelnder Praxisrelevanz nicht berücksichtigt (vgl. Abschnitt 5.1). Somit ergibt sich analog zur Kommissionierung für den LT-Tausch folgende Gleichung für t_{VGA} :

$$t_{VGA} = t_B + t_{VGA}^{KR} + t_{VGA}^{GA} + t_{VGA}^{GB} \quad (19)$$

Identisch zur Kommissionierung ist der Zeitanteil t_B zur Überbrückung des Wegs zwischen Schleppfahrzeug und der Mitte der Anhänger. Von dort ist die Distanz $d_{VGA,i}$ zum jeweiligen Abgabepunkt von Material i vom Planer angegeben, da dieser Parameter stark von den konkreten Gegebenheiten im Produktionslayout abhängig ist (vgl. Abbildung 29).

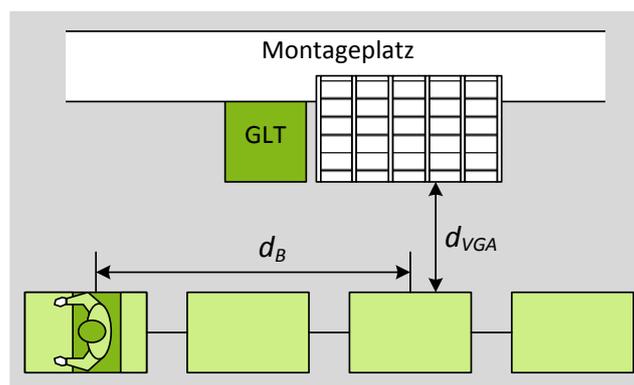


Abbildung 29: Wege beim Tausch der Ladungsträger an den Arbeitsstationen

Die manuelle Bereitstellung von vollen KLT am Arbeitsplatz in einem Regal, z. B. in Form eines Zuführschachtes, und Rückführung von leeren KLT ähneln in ihrer formalen Struktur der Gleichung des entsprechenden Kommissionierprozesses. Unterschiede liegen beim anteiligen Beugen und beim Aufnehmen und Platzieren:

$$\begin{aligned}
t_{VGA}^{KR} = t_{VGA}^{KP} = & \underbrace{KA \cdot \sum_{i \in KR \cup KP} (n_{LT,i} \cdot 2 \cdot \lceil d_{VGA,i} \rceil)}_{\text{Zeit für Laufweg}} + \underbrace{KB \cdot p_{BG}^{AH} \cdot \sum_{i \in KR \cup KP} (n_{LT,i})}_{\text{Zeit für anteiliges Beugen am Anhänger}} \\
& + \underbrace{\sum_{i \in KR \cup KP} (n_{LT,i} \cdot (AP_i^{voll} + AP_i^{leer}))}_{\text{Zeit für Aufnahmen und Platzieren voller und leerer KLT}}
\end{aligned} \quad (20)$$

Da die Abgaberegale über der Arbeitshöhe des Montagemitarbeiters angebracht sein müssen, um diesem ein optimales Greifen zu ermöglichen, fallen für den Materialbereitsteller keine Beugevorgänge beim Platzieren an. Zudem geht beim Aufnehmen der vollen und leeren LT aufgrund des vorangegangenen Platzierens am gleichen Ort kein Laufen voran, so dass diese Prozesse im Entfernungsbereich drei analysiert werden. Ebenso sind die Prozesse AP_i^{voll} und AP_i^{leer} unterschiedlich auszuprägen, da sich die Gewichte der LT unterscheiden.

Bei der Anstellung von GLT an den Arbeitsplätzen besteht der erste Prozess aus dem Abkuppeln eines beladenen Anhängers, dem Verfahren zum Abstellplatz und dem Verfahren sowie Ankuppeln des leeren Anhängers an den Schleppzug. Zum einen ist für den Hin- und Rückweg ebenfalls nach vollen bzw. leeren GLT-Anhängern zu unterscheiden, zum anderen ist von einem zweimaligen Ab- und Ankuppeln auszugehen, um den bereitzustellenden Anhänger aus dem Verbund herauszulösen, da bis auf den letzten alle GLT-Anhänger jeweils einen Anhänger vor und nach sich aufweisen. Hierfür ist ein Weg von 2 m zwischen zwei Deichseln zu berücksichtigen. Für den Planer ist zu beachten, dass das Material der Kategorie „GA“ mit dem höchsten Verbrauch am Ende des Zugs angekuppelt wird, um einen möglichst zeitgünstigen Prozess zu gewährleisten. Mathematisch kann dieser letzte Anhänger als $k = \max(GA)$ bezeichnet werden. Hieraus ergibt sich für die vorherigen Anhänger die Menge $GA' = GA \setminus \{k\}$, womit sich folgender Zusammenhang darstellen lässt:

$$\begin{aligned}
t_{VGA}^{GA} = & \underbrace{\sum_{i \in GA} (n_{LT,i} \cdot (WV_i^{voll} + WF_i^{voll} \cdot \lceil d_{VGA,i} \rceil))}_{\text{Zeit für Hinweg mit vollem Anhänger}} + \underbrace{\sum_{i \in GA} (n_{LT,i} \cdot (WV_i^{leer} + WF_i^{leer} \cdot \lceil d_{VGA,i} \rceil))}_{\text{Zeit für Rückweg mit leerem Anhänger}} \\
& + \underbrace{\left(2 \cdot (EABM + EANM + KA \cdot \lceil l_E + l_D \rceil) \cdot \sum_{i \in GA'} (n_{LT,i}) \right)}_{\text{Zeit für An-/Abkuppeln aller bis auf einen Anhänger}} + \underbrace{n_{LT,k} \cdot (EABM + EANM)}_{\text{Zeit für An-/Abkuppeln des letzten Anhängers}}
\end{aligned} \quad (21)$$

Für die Anstellung von Bodenrollern existieren ein Zeitanteil für das Herausfahren aus einem Trägerwagen und die Überbrückung des Wegs für volle Bodenroller sowie ein Zeitanteil für die Überbrückung des Wegs und das Einschieben des leeren Bodenrollers.

$$\begin{aligned}
t_{VGA}^{GB} = & \underbrace{\sum_{i \in GB} (n_{LT,i} \cdot (2 \cdot WV_i^{voll} + WF_i^{voll} \cdot \lceil d_{VGA,i} \rceil))}_{\text{Zeit für Hinweg mit Bodenroller}} + \underbrace{\sum_{i \in GB} (n_{LT,i} \cdot (2 \cdot WV_i^{leer} + WF_i^{leer} \cdot \lceil d_{VGA,i} \rceil))}_{\text{Zeit für Rückweg mit Bodenroller und Einschieben in Trägerwagen}}
\end{aligned} \quad (22)$$

Hierbei gestaltet sich der Prozess wie in der Kommissionierung durch ein Herausziehen, Abbremsen und Schieben des Bodenrollers an den Bereitstellungsplatz (analog für das Rückführen leerer Bodenroller).

Nach Darstellung der Prozesse an den Arbeitsstationen ist der zweite relevante Abgabeprozess die Leergutabgabe, welche im Folgenden detaillierter modelliert wird.

Abgabe des Leerguts

Die Abgabe des Leerguts im Leergutsammelbereich kann als rückwärtige Kommissionierung aufgefasst werden. Neben dem bereits beschriebenen Zeitanteil t_B setzt sich die Zeit für die Leergutabgabe aus den folgenden drei Summanden zusammen:

$$t_{LGA} = t_B + t_{LGA}^{KP} + t_{LGA}^{GA} + t_{LGA}^{GB} \quad (23)$$

Für KLT ergibt sich eine Besonderheit. Da sie leer zurückgeführt sind und nicht mehr nach dem Inhalt unterschieden werden müssen, können sie sortenrein nach Typen auf Paletten für eine weitere Rückführung zusammengefasst werden. Daher wird die Annahme getroffen, dass von jedem KLT-Typ ein Palettenstellplatz im Leergutsammelbereich existiert. Diese Annahme schränkt zugleich die Art der Abgabe ein, da die Variante KLT im Regal bei der Leerguthandhabung nicht berücksichtigt wird.

Analog zum Vorgehen in der Kommissionierung und der Vollgutabgabe wird der Parameter $d_{LGA,i}$ vom Planer vorgegeben. Hierbei kann der Weg ebenso mit Hilfe des Palettenmoduls l_M ermittelt werden, welches unter der Annahme sortenreiner LT-Rückführung mit der Anzahl unterschiedlicher KLT-Typen und der Anzahl an Stellplätzen für GLT auf Anhängern und Bodenrollern multipliziert werden muss.

Für die Modellierung der KLT-Abgabe vom Schleppzug zu den entsprechenden Palettenstellplätzen sind analog zur Kommissionierung Zeitanteile für den Hin- und Rückweg, das anteilige Beugen und Betreten der Palette sowie für das Aufnehmen und Platzieren der leeren KLT zu berücksichtigen:

$$t_{LGA}^{KR} = t_{LGA}^{KP} = \underbrace{KA \cdot \sum_{i \in KR \cup KP} (n_{LT,i} \cdot 2 \cdot \lceil d_{LGA,i} \rceil)}_{\text{Zeit für Laufweg}} + \underbrace{(2 \cdot KA \cdot 0,167 + KB \cdot (p_{BG}^{KP} + p_{BG}^{AH})) \cdot \sum_{i \in KR \cup KP} (n_{LT,i})}_{\text{Zeit für anteiliges Betreten der Palette und Beugen beim Aufnehmen und Platzieren}} + \underbrace{\sum_{i \in KR \cup KP} (n_{LT,i} \cdot AP_i^{leer})}_{\text{Zeit für Aufnehmen und Platzieren}} \quad (24)$$

Um die KLT passgenau auf den Paletten aufstapeln zu können, ist im Gegensatz zu den vorherigen Prozessen ein genaueres Fall des Platzierens (AB, AJ oder AM) erforderlich. Der Entfernungsbereich verbleibt wie beim Kommissionieren aufgrund des vorherigen Laufens bei eins.

Die zeitliche Bewertung der Abgabe von leeren GLT auf Anhängern im Leergutsammelbereich lässt sich durch den Hinweg zum Stellplatz mit Anhänger, den Rückweg ohne Anhänger und das Abkuppeln mittels des Bausteins EABM (Abkuppeln, mit Hänger ausrichten) beschreiben:

$$t_{LGA}^{GA} = \underbrace{\sum_{i \in GA} \left(n_{LT,i} \cdot (WV_i^{leer} + WF_i^{leer} \cdot \lceil d_{LGA,i} \rceil) \right)}_{\text{Zeit für Hinweg mit Anhänger}} + \underbrace{KA \cdot \sum_{i \in GA} \left(n_{LT,i} \cdot \lceil d_{LGA,i} \rceil \right)}_{\text{Zeit für Rückweg}} + \underbrace{EABM \cdot \sum_{i \in GA} \left(n_{LT,i} \right)}_{\text{Zeit für Abkuppeln des Anhängers}} \quad (25)$$

Für den Fall von GLT auf Bodenrollern wird die Zeit für das Herausziehen aus dem Trägerwagen und den Hinweg zum Stellplatz sowie die Zeit für den Rückweg bewertet:

$$t_{LGA}^{GB} = \underbrace{\sum_{i \in GB} \left(n_{LT,i} \cdot (2 \cdot WV_i^{leer} + WF_i^{leer} \cdot \lceil d_{LGA,i} \rceil) \right)}_{\text{Zeit für Herausziehen aus Trägerwagen und Hinweg mit Bodenroller}} + \underbrace{KA \cdot \sum_{i \in GB} \left(n_{LT,i} \cdot \lceil d_{LGA,i} \rceil \right)}_{\text{Zeit für Rückweg}} \quad (26)$$

Nach der hiermit abgeschlossenen Darstellung der Handhabungszeit mit ihren Zeitanteilen für die Kommissionierung und Abgabe wird nachfolgend die von der Art der eingesetzten Steuerung abhängige Informationsverarbeitungszeit näher beschrieben.

5.3.2 Informationsverarbeitungszeit

Die Informationsverarbeitungszeit umfasst die Zeit für das Erfassen und Handhaben von Verbrauchssignalen. Je nach eingesetztem Kanban-System können hierbei unterschiedliche Prozesse stattfinden.

Beim Karten-Kanban ($\varphi = KK$) muss in jedem Zyklus die Karte von einem leeren LT an einen vollen umgesteckt werden. Idealerweise erfolgt dies am Schleppzug beim Abstellen des leeren KLT bzw. Ankoppeln des leeren GLT, indem die Karte im Arbeitsbereich (Entfernungsbereich 2) platziert wird (z. B. Brusttasche des Mitarbeiters oder Kanban-Box am Anhänger). Im Supermarkt muss diese Karte mit dem neu kommissionierten LT durch Einstecken wieder verbunden werden. Dieser Prozess wird in Form des MTM-Zeitbausteins IVKK (Informationsverarbeitung, Karten-Kanban) definiert und abgebildet (vgl. Tabelle 10).

Beschreibung (je LT)	Kode	TMU	A x H	Gesamt TMU
Karte aus Einstecklasche aufnehmen und platzieren	AA2	35	1	35
Karte aufnehmen	AA2	35	1	35
Teilenummer (4-6 Stellen) auf Karte lesen	VA	15	2	30
Karte in Einstecklasche platzieren	PB2	30	1	30
Summe				130

Tabelle 10: MTM-Zeitbaustein IVKK zur Abbildung von Karten-Kanban

Da beide Vorgänge bei der Handhabung der LT durchgeführt werden, fallen keine weiteren zeitbestimmenden Prozesse an. Ausgehend von einem routinierten Mitarbeiter in einem eingeschwunge-

nen Zustand, sind ebenso Suchzeiten nach Material im Supermarkt zu vernachlässigen. Somit ergibt sich für t_{IV} in TMU:

$$t_{IV} = IVKK \cdot \sum_{i=1}^k n_{LT,i} \quad \text{für } \varphi = KK \quad (27)$$

Beim Behälter-Kanban ($\varphi = BK$) sind die Informationen fest mit dem LT verbunden. Dieser fungiert somit selbst als Verbrauchssignal. Als Folgerung fallen zur Informationsverarbeitung keine zeitbestimmenden Prozesse an, da diese zeitparallel zur LT-Handhabung erfolgen:

$$t_{IV} = 0 \text{ TMU} \quad \text{für } \varphi = BK \quad (28)$$

eKanban-Systeme ($\varphi = EK$) bedienen sich eines elektronischen Verbrauchssignals. Hierzu muss der Mitarbeiter jeden leeren LT beim Aufnehmen scannen, was im UAS-Zeitbaustein IVES (Informationsverarbeitung, eKanban, Scannen) beispielhaft definiert wird (vgl. Tabelle 11).

Beschreibung (je Zyklus)	Kode	TMU	A x H	Gesamt TMU
Zu Drucker gehen	KA	25	4	100
Kommissionierliste aufnehmen (Restweg)	AA1	20	1	20
Zu Drucker gehen	KA	25	4	100
Kommissionierliste ablegen (Restweg)	PA1	10	1	10
Summe				230

Beschreibung (je LT)	Kode	TMU	A x H	Gesamt TMU
Barcode mit Handscanner erfassen	HA2	45	1	45
Kommissionierliste vor Körper	PA2	20	1	20
Teilenummer (4-6 Stellen) auf Karte lesen	VA	15	2	30
Summe				95

Tabelle 11: MTM-Zeitbausteine IVES und IVEK zur Abbildung von eKanban

Alle so in einem Zyklus gesammelten Informationen werden sodann im Supermarkt einmal pro Zyklus als Kommissionierliste ausgedruckt. Hierzu ist ein weiterer Stopp am Drucker erforderlich, welcher bei der Transportzeit berücksichtigt wird. Im Rahmen der Informationsverarbeitungszeit erfolgt ein angenommener Weg von 2 m zum Drucker und zurück. Die Kommissionierliste bleibt während des Kommissionierens in der Hand des Mitarbeiters und wird nach Abschluss am Drucker wieder abgelegt. Dies ist im UAS-Zeitbaustein IVEK (Informationsverarbeitung, eKanban, Kommissionieren) zusammengefasst. Somit ergibt sich für t_{IV} folgender Zusammenhang:

$$t_{IV} = IVEK + IVES \cdot \sum_{i=1}^k n_{LT,i} \quad \text{für } \varphi = EK \quad (29)$$

Es wird deutlich, dass je nach Eingabe des Planers hinsichtlich des Parameters Art der Kanban-Steuerung drei unterschiedliche Prozesse für die Informationsverarbeitungszeit resultieren. Die konkrete Ausprägung der Prozesse kann je nach unternehmensspezifischer Steuerung variieren, so

dass die beschriebenen MTM-Bausteine exemplarisch anzusehen sind und durch einen MTM-versierten Planer angepasst werden können.

5.3.3 Transportzeit

Die Transportzeit ist nach MTM SVL maßgeblich durch die zurückzulegende Strecke sowie die Anzahl der 90°-Kurven und Stopps entlang der Route beeinflusst. Der Schleppzug bewegt sich mit seinen Anhängern in einer Produktionshalle, was sich durch den Baustein EFIM (Fahren, Intern, mit Hänger pro m) ausdrücken lässt und einen Zeitwert von 13 TMU beansprucht (vgl. Tabelle 9). Für das Befahren von in industriellen Hallenlayouts typischen 90°-Kurven entlang der Route muss der Schleppzug seine Geschwindigkeit drosseln, was je Kurve durch den Baustein EFKM (Fahren, Kurve 90°, mit Hänger) zum Ausdruck kommt und zu einem zeitlichen Zuschlag von 92 TMU führt (vgl. Tabelle 9). Hält der Schleppzug an Quellen und Senken, muss er beschleunigt und verzögert werden. Dies wird je Haltevorgang durch den Baustein EFVM (Fahren, Verzögerung, mit Hänger) modelliert, welcher einen Zeitwert von 56 TMU aufweist (vgl. Tabelle 9). Die Transportzeit beginnt vor dem Einsteigen in den Schleppzug und endet nach dem Absteigen, so dass jeweils ein Wegbaustein KA von 25 TMU für das Ein- und Aussteigen je Haltevorgang berücksichtigt werden muss. Daher ergibt sich für die Transportzeit t_{TP} :

$$t_{TP} = EFIM \cdot d_{Route} + EFKM \cdot n_{Kurve} + (EFVM + (2 \cdot KA)) \cdot n_{Halt} \quad (30)$$

Die Länge der Route d_{Route} ist entsprechend der baulichen Restriktionen der Produktionsumgebung vom Planer zu ermitteln. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass sich keine Hindernisse auf den Materialrouten befinden und die Schleppzüge ungestört verfahren können. Die Route sollte zudem so angelegt sein, dass sie möglichst kreuzungsfrei verläuft. Ebenso sind enge Kurven und Sackgasen zu vermeiden. Ist der Streckenverlauf bestimmt, kann die Anzahl an 90°-Kurven n_{Kurve} entlang der Route ermittelt werden.

Die Identifikation der Anzahl an Haltevorgängen n_{Halt} erfordert eine weitergehende Betrachtung und kann anhand der materialspezifischen Parameter durchgeführt werden. So gibt der Planer zu jeder Materialposition an, aus welcher Quelle q_i es kommissioniert und an welcher Senke s_i es bereitgestellt wird. Dies bedeutet:

$$Q = \{q_i\} \quad \text{und} \quad S = \{s_i\} \quad (31)$$

Mathematisch gesehen ist dies eine Menge an Elementen, dessen jeweilige Mächtigkeit $|Q|$ bzw. $|S|$ die Anzahl verschiedener Quellen und Senken im System beschreibt. Dies wiederum gibt planerisch die Anzahl an Haltevorgängen auf der Route an:

$$|Q| = N_Q \quad \text{und} \quad |S| = N_S \quad (32)$$

Hieraus ergibt sich, dass sich die Anzahl an Haltevorgängen n_{Halt} auf einer Route durch die Summe der Quellen- und Senkenhaltepunkte und einem Haltepunkt bei der Leergutsammelstelle darstellen lässt:

$$n_{Halt} = N_Q + N_S + 1 \quad (33)$$

Einen Sonderfall stellt die Steuerung per eKanban dar, da hier ein weiterer Haltepunkt am Kommissionierlistendrucker stattfinden muss:

$$n_{Halt} = N_Q + N_S + 2 \quad \text{für } \varphi = EK \quad (34)$$

Sonstige Tätigkeiten, wie z. B. das Platznehmen auf dem Fahrersitz, das Anziehen und Lösen einer Feststellbremse oder das An- und Ablegen des Sicherheitsgurts treten häufig bei Sitzstaplern auf längeren Außenfahrten auf. Da ein Großteil der am Markt verfügbaren Schleppzüge für den Milkrun-Einsatz jedoch als Stehschlepper ohne Sicherheitsgurt und mit automatischen Bremsen ausgelegt sind, werden derartige Prozesse nicht weiter betrachtet (vgl. Heider-Peschel 2006, S. 20; Heider-Peschel 2008, S. 38).

Nachfolgend wird die zweite Planungsdimension, die Transportkapazität des Milkrun-Schleppzugs, mathematisch näher beschrieben.

5.4 Modellierung der Planungsdimension Kapazität

Zur Modellierung der Planungsdimension Kapazität ist es erforderlich, das Kapazitätsangebot des Transportmittels in Form von flächen- und gewichtsmäßigen Restriktionen mit dem Kapazitätsbedarf der zu transportierenden LT abzugleichen (vgl. Abschnitt 4.4.2). Hierzu ist es erforderlich, dass der Kapazitätsbedarf der LT auf den Anhängern kleiner oder gleich dem maximalen Kapazitätsangebot des Schleppzugs sein muss. Der Kapazitätsbedarf der LT lässt sich mathematisch als die Anzahl Anhänger je Schleppzug n_{AH} ausdrücken, die durch die LT in Anspruch genommen werden. Dem gegenüber steht die vom Planer auszurägende, maximale Anzahl an Anhängern $n_{AH,max}$, welche durch den Kapazitätsbedarf nicht überschritten werden darf (vgl. Abschnitt 5.1):

$$n_{AH} \leq n_{AH,max} \quad (35)$$

Die Ermittlung der für die Bereitstellung aller LT erforderlichen Anzahl an Anhängern wird nachfolgend weiter detailliert und in Form eines Bin Packing Problems formuliert.

5.4.1 Ermittlung des Kapazitätsbedarfs der Ladungsträger

Als Berechnungsgrundlage für die Anzahl LT dient im Gegensatz zur zeitlichen Bewertung nicht die mittlere, sondern die maximale Anzahl an LT (Additional Flow). Dies liegt darin begründet, dass in jedem Zyklus alles verbrauchte Material bereitgestellt werden muss, so dass eine Auslegung der Transportkapazität auf Mittelwerte zwangsläufig zu nicht belieferten LT führt, welche erst im nächsten Zyklus bereitgestellt werden können und somit Materialengpässe an den Senken entstehen.

Zwar besteht die Möglichkeit, durch ausreichende Dimensionierung von Sicherheitsbeständen an den Senken dies zu umgehen, jedoch steht diesem Vorgehen das Ziel einer möglichst bestands- und somit flächenarmen Montage entgegen.

Hinsichtlich des Kapazitätsbedarfs ist in einem ersten Schritt zwischen GLT und KLT zu unterscheiden.

$$n_{AH} = n_{AH}^{KLT} + n_{AH}^{GLT} \quad (36)$$

GLT beanspruchen aufgrund ihrer Maße und Gewichte einen kompletten Anhänger mit einer Ebene als Auflagefläche für den LT, so dass gilt:

$$n_{AH}^{GLT} = \sum_{i \in GA \cup GB} \lceil n_{LT,i} \rceil \quad (37)$$

Dem gegenüber verfügen KLT-Anhänger über mehrere, übereinander angeordnete Ebenen zur Ablage von KLT. Hieraus ergibt sich die Anzahl an KLT-Anhängern n_{AH}^{KLT} aus der minimalen Anzahl an erforderlichen Ebenen n_E , welche es zu bestimmen gilt, und der vom Planer anzugebenen, bauartbedingten Anzahl an Ebenen pro KLT-Anhänger $n_{E,AH}$:

$$n_{AH}^{KLT} = \left\lceil \frac{n_E}{n_{E,AH}} \right\rceil \quad (38)$$

Eine möglichst flächenoptimale Anordnung aller KLT stellt somit zur Ermittlung der minimalen Anzahl erforderlicher Ebenen den entscheidenden Faktor dar, den es mittels eines Optimierungsproblems zu formulieren und zu lösen gilt.

5.4.2 Formulierung des zweidimensionalen Bin Packing Problems

Ziel der Modellierung ist die Ermittlung der minimalen Anzahl an Ebenen n_E . Hierfür ist es zunächst erforderlich das in Abschnitt 0 identifizierte SBSBPP weiter zu spezifizieren. In der standardisierten Form handelt sich für diesen Anwendungsfall um ein vierdimensionales Problem, da die räumlichen Ausmaße Länge, Breite und Höhe sowie das Gewicht der LT berücksichtigt werden müssen. Um diese komplexe Form im Rahmen der Modellierung zu vereinfachen, werden durch die folgenden Annahmen sinnvolle Dimensionsreduktionen vorgenommen.

Erstens ist das Stapeln von LT nicht zulässig (vgl. Abschnitt 4.4.2), so dass die Höhe als Dimension entfallen kann. Weiterhin liegen aufgrund der gängigen Modulmaße nur stark eingeschränkte LT-Größen mit festgelegten Seitenverhältnissen von Länge zu Breite vor. Dies führt dazu, dass eine weitere Dimensionsreduktion vorgenommen und als Kriterium die LT-Grundfläche $A_{LT,i}$ für jedes Material $i \in KR \cup KP$ angenommen werden kann. Das Gewicht $m_{LT,i}$ der LT ist als eigenständige Dimension nicht weiter reduzierbar, so dass durch diese Annahmen das Ausgangsproblem in ein zweidimensionales SBSBPP überführt werden kann.

Die Formulierung eines derartigen Optimierungsmodells besteht stets aus der Formulierung einer Zielfunktion, die es zu minimieren oder maximieren gilt, der Angabe von Nebenbedingungen, die den Lösungsraum einschränken und der Definition von Entscheidungsvariablen, von denen eine oder mehrere zu bestimmende Kombinationen die Zielfunktion unter Einhaltung der Nebenbedingungen optimal werden lassen (Domschke, Drexl 2011, S. 4f.; Gohout 2009, S. 7f.).

Als Entscheidungsvariablen werden die Anzahl KLT von Material i auf eine Ebene h für alle $i \in KR \cup KP$ als $x_{i,h}$ kodiert. Hinsichtlich der Zielfunktion, welche es zu minimieren gilt, ist entscheidend, dass eine Ebene als belegt angesehen wird, sobald mindestens ein KLT auf dieser Ebene platziert wird. Mathematisch kann diese Bedingung mittels einer modifizierten Signum-Funktion abgebildet werden, bei der der Wert eins angenommen wird, wenn die Summe aller KLT auf einer Ebene mindestens eins beträgt und ansonsten den Wert null annimmt:

$$\text{sgn} \left(\sum_{i \in KR \cup KP} x_{i,h} \right) := \begin{cases} 1 & \sum_{i \in KR \cup KP} x_{i,h} \geq 1 \\ 0 & \sum_{i \in KR \cup KP} x_{i,h} < 1 \end{cases} \quad (39)$$

Somit stellt die Zielfunktion die Summe aller durch die Signum-Funktion ausgedrückten, belegten Ebenen dar und kann mathematisch folgendermaßen formuliert werden:

$$\text{Minimiere } n_E = \sum_{h=1}^w \left(\text{sgn} \left(\sum_{i \in KR \cup KP} x_{i,h} \right) \right) \quad (40)$$

Ohne die Angabe von Restriktionen würde das Optimum der Zielfunktion stets den Wert null annehmen. Um dies zu verhindern, sind vier Nebenbedingungen zu formulieren, welche den Lösungsraum einschränken.

So ist es erforderlich, dass alle KLT auf den Ebenen verteilt werden. Dies bedeutet, dass die Summe aller $x_{i,h}$ der maximalen Anzahl an KLT eines Materials $\lceil n_{LT,i} \rceil$ entsprechen muss:

$$\sum_{i \in KR \cup KP} x_{i,h} = \lceil n_{LT,i} \rceil \quad \text{für } h = 1, \dots, w \quad (41)$$

Weiterhin ist das maximale Flächenangebot einer Ebene A_E durch die Summe der auf ihr platzierten KLT nicht zu überschreiten. Mathematisch bedeutet dies:

$$\sum_{i \in KR \cup KP} A_{LT,i} \cdot x_{i,h} \leq A_E \quad \text{für } h = 1, \dots, w \quad (42)$$

Eine weitere Nebenbedingung betrifft die zulässige Traglast einer Ebene $m_{E,max}$, welche nicht überschritten werden darf. Die Formulierung ist analog zur Flächenrestriktion aufgebaut:

$$\sum_{i \in KR \cup KP} m_{LT,i} \cdot x_{i,h} \leq m_{E,max} \quad \text{für } h = 1, \dots, w \quad (43)$$

Da nur ganze KLT platziert werden können, kann die Variable $x_{i,h}$ ausschließlich positive, ganzzahlige Werte und null annehmen und stellt daher Elemente der Menge der natürlichen Zahlen inklusive null dar:

$$x_{i,h} \in \mathbb{N}_0 \quad \text{für } i \in KR \cup KP \quad \text{und } h = 1, \dots, w \quad (44)$$

Grundsätzlich bieten sich zur Lösung des vorliegenden nichtlinearen, ganzzahligen Optimierungsproblems zwei Prinzipien an. Heuristische Verfahren verfügen über einen polynomiellen Rechenaufwand, liefern in der Regel jedoch durch ihre Approximation nur suboptimale Lösungen (Neumann, Morlock 2002, S. 392).

Zur exakten Lösung des Problems eignen sich analytische Verfahren, welche unter der Annahme eines exponentiellen Rechenaufwands stets eine optimale Lösung ermitteln oder das Problem als unlösbar bzw. unbeschränkt ausweisen (Finke 2010, S. 78; Neumann, Morlock 2002, S. 392).

Wichtigster Algorithmus für das dargestellte Optimierungsproblem ist das Branch and Bound-Verfahren, welches durch eine implizite Enumeration Teilmengen eines als Suchbaum dargestellten Lösungsraums findet, in denen keine optimale Lösung liegt, und diese folglich eliminiert (Gerdt, Lempio 2011, S. 135; Neumann, Morlock 2002, S. 393ff.). Hierbei bezieht sich Branch auf das Verzweigen des Suchbaums, wobei neue Teilmengen generiert werden. Bound dagegen weist auf die Ermittlung unterer und oberer Schranken für einen optimalen Wert hin, mit dessen Hilfe Teilmengen mit Suboptima identifiziert werden (Neumann, Morlock 2002, S. 393). Hierdurch kann der Rechenaufwand erheblich gesenkt werden.

In der Praxis existieren zur exakten Lösung von Optimierungsproblemen spezialisierte Softwarepakete, die teils auch über Schnittstellen in gängige Tabellenkalkulationen integriert werden können und somit eine sinnvolle Modellerweiterung gewährleisten (Suhl, Mellouli 2009, S. 79ff.).

5.5 Modellierung der Planungsdimension Ergonomie

Zur mathematischen Formulierung der Planungsdimension Ergonomie kommt das MLT zum Einsatz. Die für die ergonomische Betrachtung relevanten Lastenhandhabungsprozesse im Milkrun sind das Kommissionieren voller LT, die Abgabe dieser an den Senken sowie die dortige Aufnahme von Leergut und letztendliche Abgabe an einem Sammelpunkt. Der Transportprozess ist für die Berücksichtigung von Lastenhandhabungen nicht relevant.

Die sich hieraus ergebende körperliche Belastung darf einen maximal zulässigen Punktwert PW_{max} nicht überschreiten. Dieser Wert liegt gemäß LMM in der Regel bei zehn oder 25 Punkten. Somit ergibt sich, in Punktwerten ausgedrückt, folgende allgemeine Restriktion für die Planungsdimension Ergonomie:

$$PW_{ges} \leq PW_{max} \quad (45)$$

Zur Ermittlung von PW_{ges} sind nachfolgend tiefergehende Betrachtungen der Systemparameter und der sich hieraus ergebenden Einflussgrößen erforderlich. Allgemein ergibt sich PW_{ges} aus der Summe der Punktwerte der einzelnen Handhabungsarten. Es ist jedoch nicht erforderlich, das MLT als Ganzes im Planungsmodell abzubilden, da die Handhabungsart Halten als statische Kraftaufbringung bei Milkrun-Tätigkeiten nicht relevant ist. Daher ergibt sich für PW_{ges} :

$$PW_{ges} = PW_{Umsetzen} + PW_{Tragen} + PW_{ZS, kurz} + PW_{ZS, lang} \quad (46)$$

Die einzelnen Punktwerte der Handhabungsarten setzen sich wiederum aus den einzelnen Last-, Haltungs-, Ausführungsbedingungs-, Positioniergenauigkeits- und Zeitwichtungen zusammen (IAD 2010b, S. 10). Für das Umsetzen und Tragen bedeutet dies:

$$PW_{Umsetzen} = (LW_{Umsetzen} + HW_{Umsetzen} + AW_{Umsetzen}) \cdot ZW_{Umsetzen} \quad (47)$$

$$PW_{Tragen} = (LW_{Tragen} + HW_{Tragen} + AW_{Tragen}) \cdot ZW_{Tragen} \quad (48)$$

Während das Geschlecht des Mitarbeiters hierbei in der Lastwichtung berücksichtigt wird (vgl. Abschnitt 5.5.1), wird es beim Ziehen/Schieben in Form eines Zuschlagfaktors von 1,3 auf die Last- und Haltungswichtung bei weiblichen Materialbereitstellern berücksichtigt (IAD 2010b, S. 7). Somit ergibt sich:

$$PW_{ZS, kurz} = ((1 + 0,3 \cdot g_{MA}) \cdot (LW_{ZS, kurz} + HW_{ZS, kurz}) + AW_{ZS, kurz} + PosW_{ZS, kurz}) \cdot ZW_{ZS, kurz} \quad (49)$$

$$PW_{ZS, lang} = ((1 + 0,3 \cdot g_{MA}) \cdot (LW_{ZS, lang} + HW_{ZS, lang}) + AW_{ZS, lang} + PosW_{ZS, lang}) \cdot ZW_{ZS, lang} \quad (50)$$

Da die einzelnen Handhabungsarten unterschiedliche Bezugsgrößen, wie z. B. Anzahl Umsetz- bzw. Zieh-/Schiebevorgänge oder den zurückgelegte Weg mit Last, aufweisen, müssen die Größen für die jeweilige Handhabungsart zunächst aus den vorhandenen Parametern ermittelt werden.

Die Entscheidung, ob ein Umsetzen oder Tragen bei KLT bzw. Ziehen/Schieben kurz oder lang bei GLT vorliegt, ist vom unter Last zurückgelegten Weg je Lastenhandhabungsfall j abhängig. Ist dieser kleiner gleich 5 m, wird ein Umsetzen bzw. Ziehen/Schieben kurz, ansonsten ein Tragen bzw. Ziehen/Schieben lang bewertet (IAD 2010a, S. 5).

Mathematisch lässt sich dies als vier disjunkte, strikt geordnete Teilmengen UM , TR , ZS_{kurz} und ZS_{lang} ausdrücken:

- $(UM, <)$ mit $UM = \left\{ j \mid \alpha_i = KR, KP \wedge (d_{KOM,i} \vee d_{VGA,i} \vee d_{LGA,i} \leq 5 \text{ m}) \right\}$ mit $i = \left\lceil \frac{j}{4} \right\rceil$

Menge aller Umsetzvorgänge

- $(TR, <)$ mit $TR = \left\{ j \mid \alpha_i = KR, KP \wedge (d_{KOM,i} \vee d_{VGA,i} \vee d_{LGA,i} > 5 \text{ m}) \right\}$ mit $i = \left\lceil \frac{j}{4} \right\rceil$

Menge aller Tragevorgänge

- $(ZS_{kurz}, <)$ mit $ZS_{kurz} = \left\{ j \mid \alpha_i = GA, GB \wedge (d_{KOM,i} \vee d_{VGA,i} \vee d_{LGA,i} \leq 5 \text{ m}) \right\}$ mit $i = \left\lceil \frac{j}{4} \right\rceil$

Menge aller kurzen Zieh-/Schiebevorgänge

- $(ZS_{lang}, <)$ mit $ZS_{lang} = \left\{ j \mid \alpha_i = GA, GB \wedge (d_{KOM,i} \vee d_{VGA,i} \vee d_{LGA,i} > 5 \text{ m}) \right\}$ mit $i = \left\lceil \frac{j}{4} \right\rceil$

Menge aller langen Zieh-/Schiebevorgänge

So werden die LT in einem Zyklus von der Kommissionierung über die Vollgutabgabe und Leergutaufnahme bis zur Leergutabgabe viermal umgeschlagen. Der Bewertung des MLT liegt stets die Dosis einer Arbeitsschicht zugrunde, so dass sowohl die jeweilige Distanz $d_{KOM,i}$, $d_{LGA,i}$ und $d_{VGA,i}$ als auch die Anzahlen an Umsetzen bzw. Ziehen/Schieben auf einen Nettoarbeitstag hochgerechnet werden müssen:

$$n_{AZ,j} = r_{LT,i} \cdot t_{AZ}$$

$$d_{AZ,j} = \begin{cases} d_{KOM,i} \cdot r_{LT,i} \cdot t_{AZ} \\ d_{VGA,i} \cdot r_{LT,i} \cdot t_{AZ} \\ d_{LGA,i} \cdot r_{LT,i} \cdot t_{AZ} \end{cases} \quad \text{mit } i = \left\lceil \frac{j}{4} \right\rceil \quad (51)$$

Da jeder LT viermal je Zyklus gehandhabt wird, ergibt sich je Material i die vierfache Menge an Umsetz- und Trage- bzw. Zieh-/Schiebevorgänge j .

Auf Basis dieser Vorberechnung aus bestehenden Parametern lassen sich nachfolgend die einzelnen Leitmerkmalwichtungen berechnen, welche je nach LT-Art (KLT, GLT) und Handhabungsart mit individuellen Berechnungen ermittelt werden müssen. In einem ersten Schritt wird jedoch zunächst die jeweilige Leitmerkmalwichtung über die Gesamtanzahl bzw. den Gesamtweg gemittelt.

5.5.1 Lastwichtung

Neben der Abhängigkeit von der zu manipulierenden Last sind das Geschlecht des Materialbereitstellers und ein Zuschlag für die einhändige Lastenhandhabung grundsätzliche Einflussgrößen. Da im Modell jeder LT einzeln gehandhabt wird, erfolgt ausschließlich eine beidhändige Lastenhandhabung, so dass kein Zuschlag berücksichtigt werden muss.

Zur Umrechnung der aus der LMM etablierten Punktwerte wird im MLT eine Lastwichtung $LW_{Umsetzen,j}$ oder $LW_{Tragen,j}$ für jeden Lastenhandhabungsfall $j \in UM$ bzw. $j \in TR$ der entsprechenden Menge UM oder TR errechnet. Hierbei ist zu beachten, dass je nach Handhabungsfall volle oder leere KLT manipuliert werden, so dass das entsprechende Gewicht zu berücksichtigen ist:

$$LW_{Umsetzen,j} = LW_{Tragen,j} = \begin{cases} (0,9225 - 0,1707 \cdot g_{MA}) \cdot e^{(0,101 - 0,037 \cdot g_{MA}) \cdot m_{LT,j}} \\ (0,9225 - 0,1707 \cdot g_{MA}) \cdot e^{(0,101 - 0,037 \cdot g_{MA}) \cdot m_{LT,j}^{leer}} \end{cases} \quad \text{für } g_{MA} = \{0;1\} \quad (52)$$

Hieraus lassen sich in einem zweiten Schritt die über alle Lastenhandhabungsfälle gemittelten Lastwichtungen je Handhabungsart Umsetzen bzw. Tragen ableiten:

$$LW_{Umsetzen} = \frac{\sum_{j \in UM} n_{AZ,j} \cdot LW_{Umsetzen,j}}{\sum_{j \in UM} n_{AZ,j}} \quad \text{und} \quad LW_{Tragen} = \frac{\sum_{j \in TR} d_{AZ,j} \cdot LW_{Tragen,i}}{\sum_{j \in TR} d_{AZ,j}} \quad (53)$$

Für die Ermittlung der Lastwichtung bei der GLT-Handhabung sind nach MLT je nach zurückzulegender Einzeldistanz Ziehen/Schieben kurz oder lang zu bewerten. Die Berechnung beider Handhabungsarten ist davon abhängig, ob das zur Lastenhandhabung verwendete Transportmittel nur über Lenkrollen oder auch Bockrollen verfügt. Da die Handhabung im Falle von ausschließlich Lenkrollen belastender ist, werden diese Werte über eine Umrechnungsfunktion an die Werte für Transportmittel mit Bockrollen angeglichen (IAD 2010b, S. 7). Somit ergibt sich für den Fall „nur Lenkrollen“ folgende zudem vom Lastgewicht voller bzw. leerer GLT abhängige Funktion:

$$LW_{ZS, kurz,j} = LW_{ZS, lang,j} = \begin{cases} \left(-0,000008 \cdot (m_{LT,j})^2 + 0,0136 \cdot m_{LT,j} + 0,1054 \right) \\ \left(-0,000008 \cdot (m_{LT,j}^{leer})^2 + 0,0136 \cdot m_{LT,j}^{leer} + 0,1054 \right) \end{cases} \quad (54)$$

Für die Umrechnung des Falls „mit Bockrollen“ kann nachfolgende Gleichung angesetzt werden.

$$LW_{ZS, kurz,j} = LW_{ZS, lang,j} = \begin{cases} \left(\begin{array}{l} 0,0283 \cdot \left(-0,000008 \cdot (m_{LT,j})^2 + 0,0136 \cdot m_{LT,j} + 0,1054 \right)^3 \\ -0,1653 \cdot \left(-0,000008 \cdot (m_{LT,j})^2 + 0,0136 \cdot m_{LT,j} + 0,1054 \right)^2 \\ +0,8946 \cdot \left(-0,000008 \cdot (m_{LT,j})^2 + 0,0136 \cdot m_{LT,j} + 0,1054 \right) \\ +0,1477 \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{l} 0,0283 \cdot \left(-0,000008 \cdot (m_{LT,j}^{leer})^2 + 0,0136 \cdot m_{LT,j}^{leer} + 0,1054 \right)^3 \\ -0,1653 \cdot \left(-0,000008 \cdot (m_{LT,j}^{leer})^2 + 0,0136 \cdot m_{LT,j}^{leer} + 0,1054 \right)^2 \\ +0,8946 \cdot \left(-0,000008 \cdot (m_{LT,j}^{leer})^2 + 0,0136 \cdot m_{LT,j}^{leer} + 0,1054 \right) \\ +0,1477 \end{array} \right) \end{cases} \quad (55)$$

Da GLT-Anhänger beim Transport im Produktionsumfeld eine hohe Spurtreue einhalten müssen, werden sie konstruktiv mit zwei Bockrollen ausgelegt. Daher wird für den Prozess der GLT-Bereitstellung auf Anhängern die Variante „mit Bockrollen“ angenommen. Bodenroller dagegen sind in der Regel durch vier Lenkrollen gekennzeichnet, die eine flexible Handhabung des GLT erlauben, jedoch ebenso erhöhte Lastkräfte mit sich bringen.

Aus der oben beschriebenen Umrechnung lassen sich somit auch für das Ziehen/Schieben über die Anzahl bzw. Weglänge gemittelte Lastwichtungen ermitteln:

$$LW_{ZS, kurz} = \frac{\sum_{j \in ZS_{kurz}} n_{AZ, j} \cdot LW_{ZS, kurz, j}}{\sum_{j \in ZS_{kurz}} n_{AZ, j}} \quad \text{und} \quad LW_{ZS, lang} = \frac{\sum_{j \in ZS_{lang}} n_{AZ, j} \cdot LW_{ZS, lang, j}}{\sum_{j \in ZS_{lang}} n_{AZ, j}} \quad (56)$$

Für alle Berechnungen gilt, dass beim Umsetzen und Tragen nur Lastgewichte bis zu 40 kg, beim Ziehen/Schieben nur Lastgewichte von 25 bis 950 kg berücksichtigt werden dürfen (IAD 2010a, S. 4).

Neben der Lastwichtung werden zur Berechnung eines Belastungspunktwerts im MLT weitere Leitmerkmale herangezogen. Diese sind in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

5.5.2 Haltungs- und Ausführungsbedingwichtung

Die Bestimmung der Haltungswichtung erfolgt grundsätzlich nach den für die Lastenhandhabung charakteristischen Körperhaltungen. Da die Körperhaltungen je nach Beugeanteil stark variieren können, muss auch die Haltungswichtung spezifisch für jeden einzelnen Lastenhandhabungsfall ausgeprägt werden. Hierzu dienen die Einstufungshilfen mit den entsprechenden Piktogrammen und Punktwerten (IAD 2010a, S. 8f.).

Beim Umsetzen und Tragen liegen je nach Beugeanteil typische Körperhaltungen im Bereich von ein bis vier Punkten vor. Charakteristika eines Punktwerts von acht, wie weites Vorneigen mit gleichzeitigem Verdrehen, körperferne Lastenhandhabung, eingeschränkte Haltungsstabilität beim Stehen bzw. Hocken oder Knien, treten nicht auf. Das zu bewertende Spektrum liegt somit zwischen einem und vier Wichtungspunkten und kann prozentual mit 0,03 Wichtungspunkten je Prozentpunkt untergliedert werden. Somit ergibt sich für die Haltungswichtung abhängig vom mittleren Beugeanteil p_{HW} je Lastenhandhabung $j \in UM$ bzw. $j \in TR$:

$$HW_{Umsetzen, j} = HW_{Tragen, j} = 1 + (3 \cdot p_{HW}) \quad (57)$$

Da ein anteiliges Beugen am Anhänger für jede KLT-Handhabung anfällt, wird dieses in vollem Maße berücksichtigt. Das anteilige Beugen am Regal und an der Palette wird dagegen je nach Lastenhandhabungsvorgang mit den jeweiligen Beugehäufigkeiten gemittelt (vgl. Tabelle 12).

Prozess	Lastenhandhabungsfall		
	Kommissionierung	Vollgutabgabe/ Leergutaufnahme	Leergutabgabe
KR	$p_{HW} = p_{BG}^{KR} + p_{BG}^{AH}$	$p_{HW} = p_{BG}^{KR} + p_{BG}^{AH}$	$p_{HW} = p_{BG}^{KP} + p_{BG}^{AH}$
KP	$p_{HW} = p_{BG}^{KP} + p_{BG}^{AH}$		

Tabelle 12: Ausprägung des Beugeanteils je Lastenhandhabungsfall von KLT

Es ist zu beachten, dass diese Häufigkeiten durch die Berechnung in der Planungsdimension Zeit geschlechtsspezifisch ausgeprägt sind. Es ergibt sich abschließend ein anteiliger Punktwert für $HW_{Umsetzen}$ und HW_{Tragen} von:

$$HW_{Umsetzen} = \frac{\sum_{j \in UM} n_{AZ,j} \cdot HW_{Umsetzen,j}}{\sum_{j \in UM} n_{AZ,j}} \quad \text{und} \quad HW_{Tragen} = \frac{\sum_{j \in TR} d_{AZ,j} \cdot HW_{Tragen,j}}{\sum_{j \in TR} d_{AZ,j}} \quad (58)$$

Da beim Ziehen/Schieben von großvolumigen und entsprechend schweren GLT auf Anhängern oder Bodenrollern die typische Körperhaltung durch eine leichte Rumpfneigung und/oder leichte Drehung gekennzeichnet ist, kann dieser Wert pauschal mit zwei angenommen werden.

$$HW_{ZS, kurz} = HW_{ZS, lang} = 2 \quad (59)$$

Somit sind keine weiteren Mittelwertberechnungen erforderlich. Ebenso verhält es sich mit der Ausführungsbedingungsichtung, für die die zeitlich überwiegenden Ausführungsbedingungen von Relevanz sind. Für das Umsetzen und Tragen können sich je nach Entnahme und Bereitstellungsart unterschiedliche Wichtungen ergeben (vgl. Tabelle 13). So sind in der Kommissionierung die Entnahme aus einem Regal sowie die Abgabe in den Anhänger mit je einem Punkt zu bewerten. Hieraus ergibt sich ein Mittelwert von eins. Die Entnahme von einer Palette dagegen wird aufgrund der Platzverhältnisse mit drei Punkten bewertet, so dass sich ein Mittelwert von zwei Punkten für diesen Kommissionierprozess ergibt. Der LT-Tausch an den Arbeitsstationen ist aufgrund der Regale und des Anhängers durchweg mit einem Punkt zu bewerten. Dagegen ist die Leergutrücknahme durch das Aufpalettieren wiederum mit zwei Punkten angesetzt (vgl. IAD 2010a, S. 10).

Prozess	Lastenhandhabungsfall		
	Kommissionierung	Vollgutabgabe/ Leergutaufnahme	Leergutabgabe
KR	$\frac{1+1}{2} = 1$	$\frac{1+1}{2} = 1$	$\frac{1+3}{2} = 2$
KP	$\frac{1+3}{2} = 2$		

Tabelle 13: Ausführungsbedingungsichtung je Lastenhandhabungsfall von KLT

Hieraus ergibt sich für die Ausführungsbedingungsichtung $AW_{Umsetzen}$ und AW_{Tragen} :

$$AW_{Umsetzen} = \frac{\sum_{j \in UM} n_{AZ,j} \cdot \frac{AW_{Umsetzen,j}}{4}}{\sum_{j \in UM} n_{AZ,j}} \quad \text{und} \quad AW_{Tragen} = \frac{\sum_{j \in TR} d_{AZ,j} \cdot \frac{AW_{Umsetzen,j}}{4}}{\sum_{j \in TR} d_{AZ,j}} \quad (60)$$

Eine Besonderheit stellt hierbei die durch vier geteilte Punktwichtung dar. Dies ist für eine gemeinsame Bewertung aufgrund der unterschiedlichen Punktskalen bei der LMM-HHT (Skala von 0-2) und der LMM-ZS (Skala von 0-8) erforderlich, um eine gemeinsame Bewertungsbasis zu erhalten.

Beim Ziehen/Schieben kann von guten ergonomischen Ausführungsbedingungen ausgegangen werden. Diese sind unabhängig vom jeweiligen Lastenhandhabungsfall, so dass über alle Vorgänge ein Punktwert von null angenommen werden kann:

$$AW_{ZS, kurz} = AW_{ZS, lang} = 0 \quad (61)$$

Daher sind keine weiteren Berechnungen zur Ermittlung einer gemittelten Ausführungsbedingungs-wichtung erforderlich.

5.5.3 Positioniergenauigkeits- und Bewegungsgeschwindigkeitswichtung

Zusätzlich zu den bestehenden Leitmerkmalen der LMM-HHT sind bei der LMM-ZS die Positioniergenauigkeit und Bewegungsgeschwindigkeitswichtung zu ermitteln. Diese sind in einer Vier-Felder-Matrix kombiniert zu bewerten.

Die Positioniergenauigkeit von GLT-Anhängern oder -Bodenrollern im Prozess ist als gering zu bezeichnen. Als standardisierte Bewegungsgeschwindigkeit werden in Abhängigkeit vom zu bewegendem Gewicht nach MTM zudem 0,8 bis zu 1,1 m/s erreicht, so dass diese als schnell charakterisiert wird. Demnach ist die Wichtung mit einem Punktwert von zwei ausgeprägt:

$$PosW_{ZS, kurz} = PosW_{ZS, lang} = 2 \quad (62)$$

Ebenso wie bei Haltungs- und Ausführungsbedingungs-wichtung des Ziehens/Schiebens kann diese Punktwichtung für den gesamten Milkrun festgelegt werden.

5.5.4 Zeitwichtung

Zur Ermittlung der Zeitwichtung ist zunächst eine Angleichung der Bezugsgrößen über die Berechnung von Anzahläquivalenten erforderlich. Während sich die Handhabungsarten Umsetzen und Ziehen/Schieben kurz bereits auf die Bezugsgröße Anzahl beziehen, sind die Handhabungsarten Tragen und Ziehen/Schieben lang mit der Bezugsgröße Distanz in Anzahlen (Häufigkeiten) umzurechnen. Somit ergibt sich gemäß Berechnungsgrundlage des MLT folgender Zusammenhang (vgl. Abbildung 21):

$$N_{Umsetzen} = \sum_{j \in UM} n_{AZ, j} \quad \text{und} \quad N_{ZS, kurz} = \sum_{j \in ZS_{kurz}} n_{AZ, j} \quad (63)$$

$$N_{Tragen} = 0,1293 \cdot \left(\sum_{j \in TR} d_{AZ, j} \right)^{1,1185} \quad \text{und} \quad N_{ZS, lang} = 0,0325 \cdot \left(\sum_{j \in ZS_{lang}} d_{AZ, j} \right)^{1,1120} \quad (64)$$

Nach dieser Bezugsgrößenangleichung ist in einem zweiten Schritt die Berechnung der Zeitwichtungspunkte erforderlich. Hierbei werden sowohl absolute als auch relative Zeitwichtungen ermit-

telt. Zur Berechnung der absoluten Zeitwichtungen je Handhabungsart werden die Anzahlen bzw. Anzahlläquivalente mittels nachfolgender Interpolationsformel für die absoluten Zeitwichtungen berechnet (vgl. Schaub et al. 2012, S. 4435):

$$ZW_{Umsetzen}^{abs} = 0,5782 \cdot (N_{Umsetzen})^{0,4002} \quad \text{und} \quad ZW_{Tragen}^{abs} = 0,5782 \cdot (N_{Tragen})^{0,4002} \quad (65)$$

$$ZW_{ZS, kurz}^{abs} = 0,5782 \cdot (N_{ZS, kurz})^{0,4002} \quad \text{und} \quad ZW_{ZS, lang}^{abs} = 0,5782 \cdot (N_{ZS, lang})^{0,4002} \quad (66)$$

Bei der relativen Zeitwichtung werden dagegen die Anzahlen bzw. Anzahlläquivalente über die beiden Handhabungsgruppen HHT und ZS addiert, aus dem Ergebnis jeweils eine Zeitwichtungspunktzahl ermittelt und diese innerhalb der jeweiligen Gruppe anteilig auf jede Handhabungsart zurückverteilt (Schaub et al. 2010, S. 126f.). Für die Handhabungsgruppe HHT mit den Handhabungsarten Umsetzen und Tragen ergibt sich somit:

$$ZW_{Umsetzen}^{rel} = p_{Umsetzen} \cdot ZW_{HHT} \quad \text{und} \quad ZW_{Tragen}^{rel} = p_{Tragen} \cdot ZW_{HHT} \quad (67)$$

mit

$$ZW_{HHT} = 0,5782 \cdot (N_{Umsetzen} + N_{Tragen})^{0,4002} \quad (68)$$

$$p_{Umsetzen} = \frac{N_{Umsetzen}}{N_{Umsetzen} + N_{Tragen}} \quad \text{und} \quad p_{Tragen} = \frac{N_{Tragen}}{N_{Umsetzen} + N_{Tragen}} \quad (69)$$

Für die Handhabungsgruppe ZS mit den Handhabungsarten Ziehen/Schieben kurz und lang ergibt sich in Analogie zum Vorherigen:

$$ZW_{ZS, kurz}^{rel} = p_{ZS, kurz} \cdot ZW_{ZS} \quad \text{und} \quad ZW_{ZS, lang}^{rel} = p_{ZS, lang} \cdot ZW_{ZS} \quad (70)$$

mit

$$ZW_{ZS} = 0,5782 \cdot (N_{ZS, kurz} + N_{ZS, lang})^{0,4002} \quad (71)$$

$$p_{ZS, kurz} = \frac{N_{ZS, kurz}}{N_{ZS, kurz} + N_{ZS, lang}} \quad \text{und} \quad p_{ZS, lang} = \frac{N_{ZS, lang}}{N_{ZS, kurz} + N_{ZS, lang}} \quad (72)$$

Hierbei ist die relative Zeitwichtung pro Handhabungsart stets niedriger als die absolute, d. h. diejenige Zeitwichtung, die sich ergäbe, wenn allein die betreffende Handhabungsart vorläge. Zur Vermeidung von unerkannten Belastungsspitzen sieht das MLT hier vor, die häufigste Handhabungsart je Gruppe (HHT, ZS) mit der absoluten Zeitwichtung in das Gesamtergebnis eingehen zu lassen (Schaub et al. 2010, S. 127).

5.6 Zusammenführung in ein Gesamtmodell

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die drei Planungsdimensionen mathematisch beschrieben wurden, folgt in diesem Abschnitt ihre Zusammenführung in ein Gesamtmodell. Wie bereits in

Abschnitt 4.3 beschrieben, ergibt sich das Ziel des Planungskonzepts durch die Minimierung der Milkrun-Taktzeit τ unter Einhaltung aller Restriktionen aus den Planungsdimensionen Zeit, Kapazität und Ergonomie:

$$\text{Minimiere } \tau \quad (73)$$

Die Zielgröße τ stellt dabei einen Einflussfaktor auf die Anzahl bereitzustellender LT dar, welches wiederum den Haupteinflussfaktor für alle Planungsdimensionen ausmacht (vgl. Abschnitt 5.2).

Die drei Restriktionen der Planungsdimensionen beschreiben die Nebenbedingungen, unter denen die Zielgröße minimal werden kann. So ist die zeitliche Restriktion so aufzufassen, dass die mit MTM ermittelte Zykluszeit, welche durch die Anzahl an LT indirekt von τ abhängig ist, kleiner oder gleich der Taktzeit sein muss:

$$t_z(\tau) \leq \tau \quad (74)$$

Weiterhin darf die Anzahl erforderlicher Anhänger n_{AH} die maximal zulässige Anzahl $n_{AH,max}$ nicht überschreiten:

$$n_{AH}(\tau) \leq n_{AH,max} \quad (75)$$

Schließlich ist die Planungsdimension Ergonomie zu berücksichtigen, indem der ermittelte Belastungspunktwert PW_{ges} die maximal zulässige Punktwertgrenze PW_{max} einhält:

$$PW_{ges}(\tau) \leq PW_{max} \quad (76)$$

Um eine unter diesen Randbedingungen kleinstmögliche Taktzeit zu erzielen, werden diese als Eingangsparameter variiert, für jeden Wert von τ die einzelnen Planungsdimensionen berechnet und hinsichtlich der Erfüllung der Nebenbedingungen bewertet. Der Lösungsraum und die Nebenbedingungen dieses Modells können hierzu zweidimensional mittels einer Graphik abgebildet werden. Zur besseren Übersicht sind alle Kennlinien durch eine prozentuale Darstellung normiert (vgl. Abbildung 30).

Die Kennlinie der Planungsdimension Zeit stellt eine absteigende Potenzfunktion dar. Kleine Taktzeiten führen dazu, dass die konstante, d. h. von der Anzahl LT unabhängige, Transportzeit einen übermäßigen Anteil an der Zykluszeit aufweist. Dieser Anteil reduziert sich mit zunehmenden Taktzeiten, so dass die zeitliche Auslastung (Verhältnis von t_z zu τ) ab einer bestimmten Taktzeit unter 100 % fällt und somit der Milkrun zeitlich durchführbar ist. Die Kennlinie der Planungsdimension Kapazität folgt einer aufsteigenden Stufenfunktion, da die Anzahl an Anhängern in einem Milkrun-System für steigende Taktzeiten und somit LT-Anzahlen nur ganzzahlige Werte annehmen kann. Daher überschreitet die kapazitive Auslastung (Verhältnis von n_{AH} zu $n_{AH,max}$) mit steigender Taktzeit an einem bestimmten Punkt die 100 %-Grenze, so dass der Milkrun kapazitiv nicht mehr durchführbar ist. Die Kennlinie der Planungsdimension Ergonomie ist als Parallele zur Abszisse unabhängig von der Taktzeit, da sich die ergonomische Berechnung des MLT stets auf die Anzahl

LT pro Schicht bezieht. Somit ist ein Milkrun-System nur durchführbar, wenn die ergonomische Auslastung (Verhältnis von PW_{ges} zu PW_{max}) unter 100 % liegt.

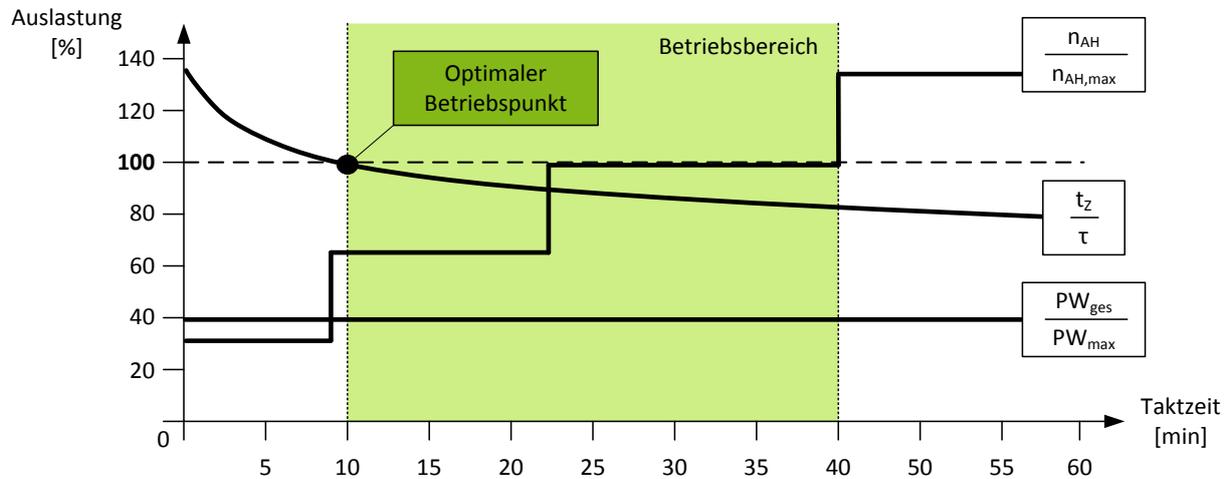


Abbildung 30: Betriebskennlinien für ein Milkrun-System

Hieraus ist erkennbar, dass die Kennlinien der Planungsdimensionen Zeit, Kapazität und Ergonomie einen Betriebsbereich für ein Milkrun-System definieren, in welchem alle Restriktionen erfüllt sind. Der optimale Betriebspunkt im Sinne der Zielgrößenminimierung liegt folglich bei der kleinstmöglichen Taktzeit im Betriebsbereich. In der Praxis kann zugunsten geringerer zeitlicher Auslastungen vom optimalen Betriebspunkt abgewichen werden, um so minimale Taktausgleichszeiten zu vermeiden und einen reibungslosen Ablauf des Zyklus zu gewährleisten. Weiterhin können sich Taktzeiten als rechnerisch optimal erweisen, die im Sinne einer einfachen Hochrechnung über den Tag (Vielfaches der Taktzeit) und daraus resultierender Transparenz für beteiligte Milkrun- und Montagearbeiter ungünstig sind. Hier sollte die Festlegung eines aus Sicht der Praxis „ausreichend befriedigenden“ Betriebspunkts letztendlich dem Planer obliegen (Feige 2009, S. 341).

Existiert keine Taktzeit, für die alle Restriktionen erfüllt sind, ist der Betriebsbereich eine leere Menge und es kann kein optimaler Betriebspunkt ausgewiesen werden. In diesem Fall ist es möglich, Handlungsempfehlungen auszusprechen, welche je nach Art der Restriktionsverletzung variieren können. Im Rahmen einer iterativen Berechnung auf Basis eines kleinstmöglichen Milkrun-Systems mit einem Schleppzug und einem Mitarbeiter führt die Verletzung von Restriktionen in den Planungsdimensionen zu einer Neuauslegung. Liegt die zeitliche oder ergonomische Auslastung stets über 100 %, können durch eine Entkopplung der Kommissionierung oder Feinverteilung die erforderlichen Zykluszeiten und körperlichen Belastungen des Milkrun-Mitarbeiters reduziert werden, um einen akzeptablen Betriebsbereich zu realisieren. Durch die entkoppelten Tätigkeiten sind jedoch weitere Mitarbeiter als Kommissionierer im Supermarkt oder Feinverteiler an den Arbeitsstationen einzuplanen (vgl. Tabelle 14).

Reicht diese Reduktion nicht aus oder ist die Kapazitätsrestriktion verletzt, besteht die Möglichkeit, einen weiteren Schleppzug einzusetzen und das bestehende Material auf die beiden Züge aufzutei-

len. Dies führt zu einer separaten Neuberechnung beider Schleppzüge unter Berücksichtigung des jeweils ihnen zugeordneten Materials. Durch diese Maßnahmen wird das Milkrun-System iterativ mit zusätzlichen Schleppzügen und Mitarbeitern ausgestattet, bis für jeden Zug ein Betriebsbereich und somit optimaler Betriebspunkt gefunden werden kann. Die Entscheidungen für eine entkoppelte Kommissionierung bzw. Feinverteilung oder einen weiteren Schleppzug mit entsprechender Aufteilung des Materials hängen dabei stark vom zugestandenen Betriebsmittelbudget und der möglichen Personalkapazität ab und werden durch den Planer getroffen. Das in diesem Kapitel modellierte Planungsmodell fungiert in diesem Prozess als Entscheidungsunterstützung für den Planer.

Restriktionsverletzung	Handlungsempfehlung	Konsequenz
$t_Z > \tau$	<u>Entkoppelte Kommissionierung:</u> Tätigkeit durch zusätzlichen Mitarbeiter	<u>Vorteil:</u> Reduzierte Zykluszeit und körperliche Belastung <u>Nachteil:</u> Erhöhter Personalbedarf
$PW_{ges} > PW_{max}$	<u>Entkoppelte Feinverteilung:</u> Tätigkeit durch zusätzlichen Mitarbeiter	<u>Nachteil:</u> Erhöhter Personalbedarf
$n_{AH} > n_{AH,max}$	<u>Dopplung des Milkrun-Systems:</u> Erhöhung der Anzahl Schleppzüge um eins	<u>Vorteil:</u> Erhöhte Transportkapazität <u>Nachteil:</u> Erhöhter Betriebsmittel- und Personalbedarf

Tabelle 14: Handlungsempfehlungen und Konsequenzen bei Restriktionsverletzungen

Im nachfolgenden Kapitel wird das erarbeitete Planungsmodell mit seinem zugrundeliegenden mathematischen Zusammenhängen in ein softwarebasiertes Planungshilfsmittel überführt und anhand eines Fallbeispiels exemplarisch erprobt.

5.7 Modellüberführung in ein softwarebasiertes Planungshilfsmittel

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge des entwickelten Planungshilfsmittels ist es nicht zielführend, die einzelnen Berechnungsschritte zur Validierung des Modells in einem industriellen Kontext von Hand durchzuführen. Aus diesem Grund wird das Planungsmodell nachfolgend in ein softwarebasiertes Planungshilfsmittel überführt.

Hierbei ist es erforderlich, dass alle in den vorherigen Abschnitten modellierten Funktionen abgebildet werden können und das Planungshilfsmittel zukünftig flexibel bei Modellerweiterungen angepasst werden kann. Um eine breite und aufwandsarme Anwendbarkeit sicherzustellen, ist eine hohe Verfügbarkeit und Bedienerfreundlichkeit der entsprechenden Softwareumgebung erforderlich. Daher wird zur Abbildung des Modells das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel herangezogen, da Microsoft Office-Produkte in produzierenden Unternehmen weit verbreitet sind und der Umgang mit ihnen den meisten Anwendern vertraut ist. Dies fördert zudem die Akzeptanz des Werkzeugs unter KMU, da keine hohen Investitionen in komplexe Softwarelösungen erforderlich sind.

Mittels der Standardfunktionalitäten von Microsoft Excel lässt sich ein Großteil der mathematischen Zusammenhänge abbilden und die Ergebnisse graphisch visualisieren. Einzig die adäquate Lösung des Bin Packing Problems erfordert die Nutzung spezialisierter Software. So bietet das auf Optimierungssoftware spezialisierte Unternehmen Lindo Systems, Inc. einen Solver namens „What’sBest!“ als Add-In an, dessen Funktionen dem Anwender in Excel als Symbolleiste zur Verfügung stehen. Durch die vollständige Integration des Solvers in die Tabellenkalkulation, die Berücksichtigung von je nach Lizenz unbegrenzter Anzahl an Variablen/Nebenbedingungen sowie die Möglichkeit zur automatisierten Steuerung durch Visual Basic for Applications (VBA)-Skripte bietet „What’sBest!“ hinreichend Funktionalitäten für die Nutzung im Rahmen dieser Modellimplementierung.

Auf Basis dieser ausgewählten Modellierungsumgebung wird das Planungshilfsmittel nachfolgend näher beschrieben und die einzelnen, in Microsoft Excel abgebildeten Module dargestellt. Die Struktur des Planungshilfsmittels besteht aus elf Tabellenblättern (Reitern) in einer Arbeitsmappe, welche sich aufeinander beziehen und mit denen unterschiedliche Eingabe-, Berechnungs- und Ausgabeschritte durchgeführt werden (vgl. Abbildung 31).

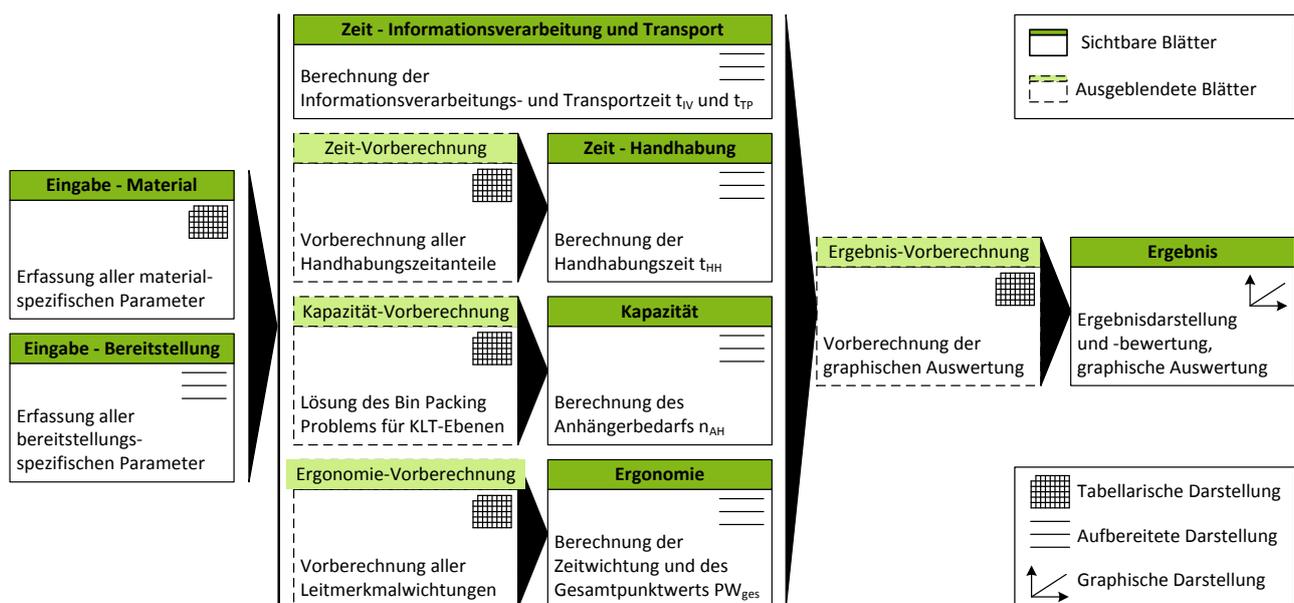


Abbildung 31: Struktur des Microsoft Excel-basierten Planungshilfsmittels

Im Tabellenblatt „Eingabe - Material“ werden alle materialspezifischen Parameter erfasst. Die vom Planer zu tätigen Eingaben umfassen die in Abschnitt 5.1 dargestellten Variablen und sind für jedes bereitzustellende Material separat vorzunehmen (vgl. Tabelle 15).

Nr.	MATERIALSTAMMDATEN				LADUNGSTRÄGER						QUELLE			SENKE				
	Teile- nummer	Bezeichnung	Stücklisten- menge	Gewicht	Art	Typ	Länge	Breite	Füll- menge	Leergewicht t LT	Gewicht TM	Kennung	Distanz KOM	Entnahmeart	Kennung	Taktzeit Montage	Distanz VGA	Distanz LGA
			[Stck]	[kg]			[mm]	[mm]	[Stck/LT]	[kg]	[kg]		[m]			[s]	[m]	[m]
1	7500740	Material A	1	0,712	GLT	Gitterbox	1200	800	500	75,0	125	1	0,5	GB	1	45	3,2	0,5
2	7497780	Material B	1	0,025	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	72	1,85	0	1	0,5	KR	1	45	3,2	0,5
3	7497760	Material C	1	0,034	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	62	1,85	0	1	0,5	KR	1	45	3,2	0,5
4	7497880	Material D	1	0,007	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	500	1,85	0	1	0,5	KR	1	45	3,4	0,5
5	7568680	Material E	1	0,004	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	1000	1,85	0	1	1,4	KR	1	45	1,4	1,4
6	7568680	Material F	1	0,004	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	1000	1,85	0	1	1,4	KR	1	45	2,2	1,4
7	7737980	Material G	1	0,002	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	250	1,85	0	1	1,4	KP	1	45	1,4	1,4
8	5110570	Material H	1	0,023	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	50	1,85	0	1	1,4	KP	1	45	1,4	1,4
9	7519050	Material I	1	0,015	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	54	1,85	0	1	2,3	KP	1	45	2,3	2,3
10	7499420	Material J	1	0,315	KLT	VDA-KLT 6429	600	400	24	2,97	0	1	2,3	KP	1	45	2,3	2,3
11	8769712	Material K	1	0,542	KLT	VDA-KLT 6429	600	400	24	2,97	0	1	2,3	KP	1	45	2,3	2,3
12	7510560	Material L	1	0,377	GLT	VDA-KLT 6429	600	400	48	2,97	0	1	2,3	KR	2	45	2,3	2,3
13	7030881	Material M	1	0,049	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	40	1,85	0	1	3,2	KP	2	45	3,2	3,2
14	7311080	Material N	1	0,047	KLT	VDA-KLT 6429	600	400	72	2,97	0	1	3,2	KP	2	45	3,2	3,2
15	7510680	Material O	1	0,157	KLT	VDA-KLT 6429	600	400	24	2,97	0	1	3,2	KP	2	45	3,2	3,2
16	6169981	Material P	1	0,082	KLT	VDA-KLT 6429	600	400	72	2,97	0	1	3,2	KP	3	45	3,2	3,2
17	7498010	Material Q	1	0,188	GLT	Gitterbox	1200	800	750	75,0	125	1	4,1	GA	3	45	4,1	4,1
18	7498040	Material R	1	0,013	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	200	1,85	0	1	4,1	KP	3	45	4,0	4,1
19	7050982	Material S	1	0,004	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	120	1,85	0	1	4,1	KP	3	45	4,1	4,1
20	7498060	Material T	1	0,021	KLT	VDA-KLT 3429	400	300	72	1,85	0	1	4,1	KP	3	45	4,1	4,1
21																		

Tabelle 15: Eingabemaske zur Erfassung der materialspezifischen Parameter

Das Planungshilfsmittel ist auf die Berechnung von maximal 50 unterschiedlichen Materialien ausgelegt. Ist das gleiche Material z. B. an unterschiedlichen Senken bereitzustellen, muss jeweils eine weitere Zeile für jede zusätzliche Senke angegeben werden. Für die Berechnung von GLT ist das Gesamtgewicht eines leeren GLT anzugeben. Besteht dieser aus einem KLT-Turm, ist das Gesamtgewicht die Summe der Leergewichte der Europalette und aller auf ihr befindlichen KLT-Leergewichte.

Das Tabellenblatt „Eingabe - Bereitstellung“ erfasst analog alle für die Berechnung erforderlichen bereitstellungsspezifischen Parameter, welche in Abschnitt 5.1 hergeleitet wurden (vgl. Tabelle 16). Diese sind um entsprechende Symbolik und Eingabehinweise ergänzt.

Die vom Planer in den vorherigen Tabellenblättern erfassten Daten bilden in Form von Zellbezügen die Ausgangsbasis für die Ermittlung der Planungsdimensionen auf den nachfolgenden Blättern. Die Planungsdimension umfasst die drei Blätter „Zeit - Vorberechnung“, „Zeit - Handhabung“ und „Zeit - Informationsverarbeitung und Transport“. Im Rahmen der Vorberechnung des ersten Blatts werden alle materialspezifischen Handhabungszeitanteile aus Abschnitt 5.3.1 in tabellarischer Form berechnet. Diese Daten sind für den späteren Anwender wenig aussagekräftig, so dass dieses Blatt standardmäßig ausgeblendet ist. Die ermittelten Werte werden auf dem Blatt „Zeit - Handhabung“ summarisch zusammengefasst und für den Planer optisch aufbereitet. Weiterhin bieten die Berechnungen des Blatts „Zeit - Informationsverarbeitung und Transport“ einen aufbereiteten Überblick über die entsprechenden Zeitanteile.

Zur Berechnung der Planungsdimension Kapazität dienen die zwei Tabellenblätter „Kapazität - Vorberechnung“ und „Kapazität“. Wie zuvor ist das Vorberechnungsblatt, auf welchem das in Abschnitt 5.4.2 modellierte Bin Packing Problem mittels des Solvers „What’sBest!“ gelöst wird, für den Planer ausgeblendet. Die für ihn relevanten Informationen über die Anzahl KLT-Anhänger-Ebenen sowie KLT- und GLT-Anhänger finden sich auf dem aufbereiteten Blatt „Kapazität“.

Bereitstellungsspezifische Parameter

Bezeichnung	Symbol	Wert	Mögliche Eingaben
geplanter Milkrun-Takt [min]	τ	8	-

Kommissionierung und Abgabe

Beidseitige Kommissionierung	μ	1	0 = Einseitige Kommissionierung; 1 = Beidseitige Kommissionierung
Höhe eines KLT-Anhängers [mm]	h_{AH}	1650	-
Höhe der untersten Ebene eines KLT-Anhängers [mm]	h_{UE}	200	-
Art der Kanban-Steuerung	φ	KK	KK = Karten-Kanban; BK = Behälter-Kanban; EK = Elektronischer Kanban
Geschlecht des Materialbereitstellers	g_{MA}	1	0 = Männlich; 1 = Weiblich
Maximaler MLT-Punkt看wert	PW_{max}	50	-
Nettoarbeitszeit des Materialbereitstellers [min]	t_{AZ}	420	-

Transport

Maximale Anzahl Anhänger	$n_{AH,max}$	3	ganzzahlige Werte
Anzahl Ebenen je KLT-Anhänger	$n_{E,AH}$	4	ganzzahlige Werte
Ebenenlänge eines Anhängers [mm]	l_E	1200	Modulare Größen (z.B. 600, 300, 150)
Ebenenbreite eines Anhängers [mm]	b_E	800	Modulare Größen (z.B. 400, 200, 100)
Deichsellänge eines Anhängers [mm]	l_D	500	-
Maximal Ebenenlast [kg]	$m_{E,max}$	30	-
Länge der Route [m]	d_{Route}	580	-
Anzahl Kurven auf Route	n_{Kurve}	10	ganzzahlige Werte

Tabelle 16: Eingabemaske zur Erfassung der bereitstellungsspezifischen Parameter

Ebenso verhält es sich mit der Berechnung der Planungsdimension Ergonomie, welches ebenfalls in die Blätter „Ergonomie - Vorberechnung“ und „Ergonomie“ unterteilt ist. Auf ersterem werden sämtliche Leitmerkmalberechnungen aus Abschnitt 5.5.1 bis 5.5.3 tabellarisch durchgeführt und auf letzterem mit der Berechnung der Zeitwichtung aufbereitet.

Alle berechneten Werte werden schlussendlich auf dem Blatt „Ergebnis“ zusammengeführt. Dieses bietet zum einen die Möglichkeit, durch dortige Eingabe einer Taktzeit die konkreten Auswirkungen auf die einzelnen Planungsdimensionen nachzuvollziehen. Zum anderen kann eine Visual Basic-basierte Auswertung gestartet werden, durch die alle Planungsdimensionen in Abhängigkeit beliebiger Taktzeitintervalle graphisch dargestellt werden können (vgl. Abbildung 32 und Abbildung 47).

Graphisch werden stets 60 Taktzeiten abgebildet, die mittels Angabe eines Intervallstarts und eines Intervallschritts in Minuten flexibel skaliert werden können (z. B. 30 min in 0,5 min-Intervallen, 60 min in 1 min-Intervallen oder 120 min in 2 min-Intervallen). Für die Darstellung der Graphiken ist eine Visual Basic-basierte Erfassung der Werte auf dem Blatt „Ergebnis - Vorberechnung“ erforderlich, welches für den Planer ebenfalls ausgeblendet verbleibt.

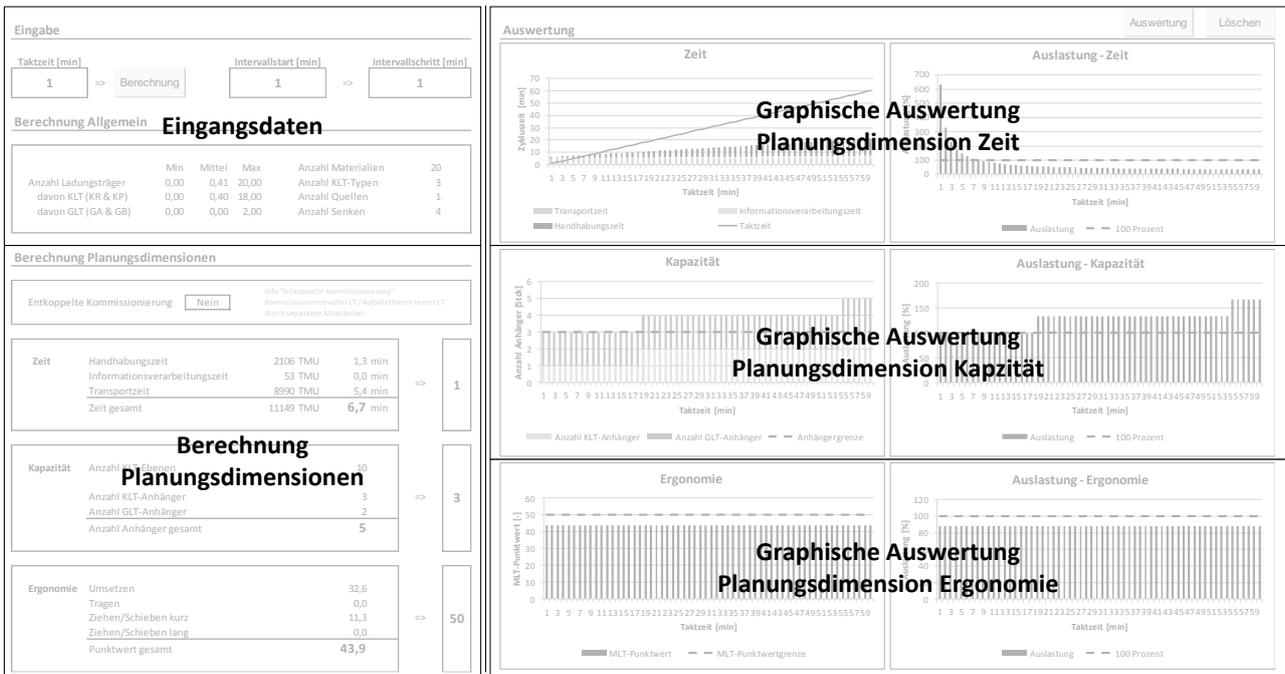


Abbildung 32: Ergebnismaske mit graphischer Auswertung der Planungsdimensionen

Neben dieser detaillierten Auswertung bietet das Planungshilfsmittel zudem die Möglichkeit, den in Abschnitt 5.6 beschriebenen Betriebsbereich und optimalen Betriebspunkt auf dem Blatt „Ergebnis“ festzustellen (vgl. Abbildung 33).

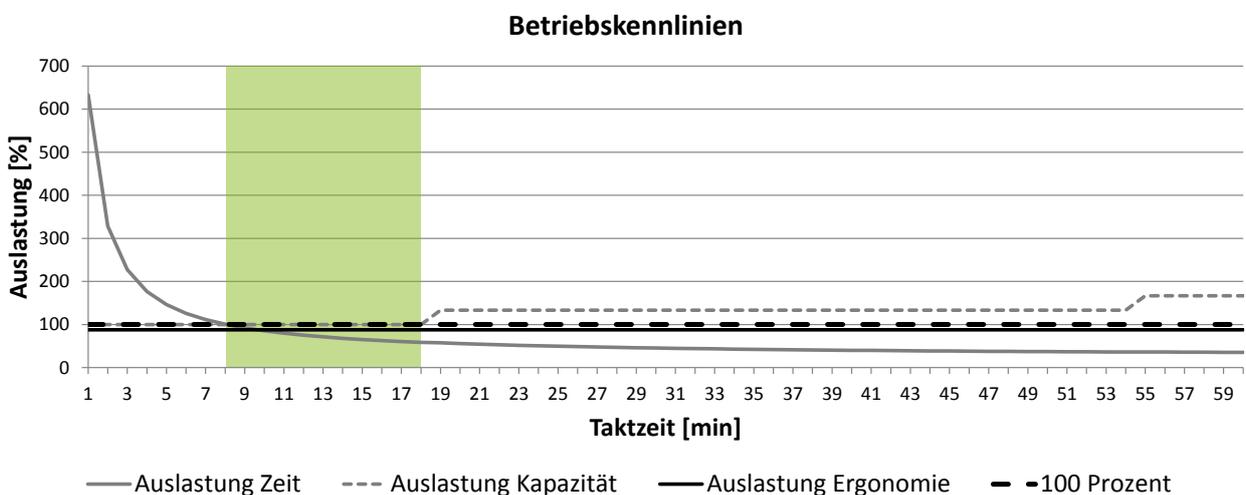


Abbildung 33: Graphische Darstellung des Betriebsbereichs

Hierzu wird zunächst über entsprechende Abfragen entschieden, ob ein Betriebsbereich bei gegebener Datenlage existiert. Ist dies nicht der Fall, erscheint ein entsprechender Hinweis.

Mittels des oben beschriebenen Planungshilfsmittels ist es somit möglich, aufwandsarm eine Validierung des in Kapitel 5 entwickelten Modells in der industriellen Praxis durchzuführen. Diese wird in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

6 Validierung des erarbeiteten Planungshilfsmittels

Um das erarbeitete Konzept im Rahmen einer industriellen Anwendung exemplarisch zu erproben und die Vorteile einer automatisierten Berechnung der Planungsdimensionen nutzen zu können, ist zunächst das mathematische Modell in ein praxistaugliches, softwarebasiertes Planungshilfsmittel zu überführen. Im Anschluss erfolgt die Validierung dieses Planungshilfsmittels bei einem Unternehmen der Elektro-Installationstechnik und Gebäude-Systemtechnik.

6.1 Charakterisierung des Untersuchungsbereichs

Das oben beschriebene Planungshilfsmittel wurde beispielhaft bei einem Unternehmen der Elektro-Installationstechnik und Gebäude-Systemtechnik angewendet. Das Unternehmen stellt neben qualitativ hochwertigen Schaltersystemen und Steckdosen auch Türsprechanlagen und Rufsysteme her. In einem Produktionsbereich werden Schalter- und Steckdosensysteme sowie Elektronikkomponenten für Zeitschaltuhren, Tastsensoren u. ä. in 20 Handarbeitssystemen montiert. Das Artikelspektrum des Bereichs liegt bei mehreren hundert verkaufsfertigen Produkten, welche im Arbeitssystem komplett montiert, verpackt und etikettiert werden.

6.1.1 Produktspektrum

In diesem Produktionsbereich wurde in Abstimmung mit dem Unternehmen eine Fertigungsgruppe als Untersuchungsbereich ausgewählt, in der spritzwassergeschützte Schalter und Steckdosen in 70 Varianten an drei Arbeitssystemen hergestellt werden (vgl. Abbildung 34).



Abbildung 34: Produktspektrum des Untersuchungsbereichs

Da jedes Arbeitssystem ausschließlich auf eine Produktgruppe spezialisiert ist, kann das Produktspektrum disjunkt nach Arbeitssystemen getrennt werden. So weisen Schalter mit 47 Varianten eine große Vielfalt auf, während Kombinationen und waagerechte Steckdosenleisten in elf bzw. zwölf Varianten gefertigt werden. Im Mittel besteht eine Variante aus zwölf Materialien, zu denen neben den eigentlichen Bauteilen des Produkts, wie Gehäuseteile, Schaltereinsätze oder Verbindungselemente, auch Verpackungskartone und Etiketten zählen. Zur Montage aller 70 Varianten

sind in Summe 144 Materialien erforderlich, welche zweistufig durch die innerbetriebliche Logistik bereitgestellt werden.

6.1.2 Materialbereitstellung

Zur Materialversorgung des gesamten Fertigungsbereichs existieren in der Halle ein KLT-Supermarkt mit ca. 1.200 Stellplätzen sowie ein GLT-Supermarkt mit ca. 50 Palettenstellplätzen. Hiervon entfallen für den betrachteten Untersuchungsbereich von insgesamt 78 Supermarkt-Materialien 65 auf KLT- und 13 auf GLT-Stellplätze, welche je nach Umschlagsvolumen als Zwei-Behälter-Prinzip ausgeprägt sind und per eKanban gesteuert werden (vgl. Abbildung 46). Die restlichen 66 Materialien werden ohne Zwischenlagerung im Supermarkt direkt in einem separaten Kommissionierbereich bereitgestellt.

Die Reichweite des Supermarkts ist auf mindestens 24 Stunden ausgelegt, bei vielen Materialien wird dieser Wert jedoch deutlich überschritten. Die Versorgung wird durch den angrenzenden Logistikbereich durchgeführt, welcher KLT und GLT über ein automatisches Kleinteilelager (AKL) bzw. automatisches Hochregallager (HRL) für Paletten auslagert und mittels eines Schlepzugs dem Supermarkt verbrauchsbedingt zuführt.

Hierzu entnimmt eine Logistikmitarbeiterin aus dem Fertigungsbereich die Einweg-Kanban-Karte eines leeren LT und scannt diese an einem fertigungsnahen Terminal. Das elektronische Verbrauchssignal veranlasst eine Auslagerung des entsprechenden Materials im HRL oder AKL. Parallel wird eine neue Einweg-Kanban-Karte gedruckt und dem LT zugeordnet. Lagermitarbeiter bereiten anschließend einen Schlepzug vor, indem sie entweder einen GLT mittels Hubwagen auf einen Anhänger aufsetzen oder einen KLT manuell auf einen Etagenwagen platzieren (vgl. Abbildung 35). Da weder ein fester Takt noch eine feste Route vorgegeben ist, liegt im Sinne der vorangegangenen Definition (vgl. Abschnitt 2.6) kein Milkrun-System vor.



Abbildung 35: Schlepzug (links) und Supermarkt (rechts) des betrachteten Bereichs

Aufgrund der hohen Reichweite im Supermarkt kann der Materialbereitsteller selbst entscheiden, wann ein neuer Zyklus durchgeführt wird, da die Wiederbeschaffung des Materials in der Regel zeitlich unkritisch ist. In der Praxis hat sich eine Frequenz von ein bis zwei Zyklen pro Schicht etabliert, in denen gleichzeitig Fertigwaren auf Palettenanhängern in den Logistikbereich zurücktransportiert werden. Zwischen den Zyklen unterstützt der Mitarbeiter den Logistikbereich. Der Schleppzug besteht aus einem Elektroschlepper und wahlweise anzukoppelnden Etagen-, Paletten- bzw. Trägerwagen für Bodenroller.

Die Rückführung des Leerguts erfolgt durch die Logistikmitarbeiterin im Fertigungsbereich oder sogenannte Saalhelfer, welche KLT an einem montagenahen Leergutplatz auf Anhängern aufstapeln und vom Schleppzug per Zuruf bzw. auf Sicht mitgenommen werden.

6.2 *Vorgehensweise der Untersuchung*

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie soll der Einsatz eines standardisierten und höherfrequent getakteten Milkrun-Systems im betrachteten Bereich untersucht werden. Hierzu ist zunächst eine Grobanalyse der Materialstruktur erforderlich, die neben den zuvor beschriebenen Schwachstellen im Prozessablauf einen Überblick über das Bereitstellungsspektrum gibt. Aus dieser Analyse können anschließend konkrete Ziele für die Anwendung des Planungshilfsmittels abgeleitet und der Betrachtungsbereich weiter eingegrenzt werden.

6.2.1 Grobanalyse der Materialstruktur und Ziele der Untersuchung

Erste Untersuchungen zur Struktur der LT im Untersuchungsbereich zeigen ein ähnliches Bild wie beim gesamten Supermarkt. Durch die im Mittel hohe Reichweite der 79 Kanban-gesteuerten Materialien sind vor allem ein großer Flächenbedarf des bereitgestellten Materials als auch hohe LT-Gewichte prägend.

Hinsichtlich der LT-Abmaße ist zunächst ersichtlich, dass mit 13 Materialien ca. 16,7 % auf Palettenanhängern bereitgestellt werden. Hierbei befinden sich bis zu fünf übereinander gestapelte KLT auf den Anhängern, welche bis zu 50.000 Einzelteile fassen und eine Reichweite von deutlich über 24 Stunden aufweisen.

Neben dem Platzbedarf großer LT im Supermarkt führt dieser Zustand zwangsläufig zu hohen Lastgewichten und somit hohen ergonomischen Belastungen der vorwiegend weiblichen Logistikmitarbeiter im Untersuchungsbereich, welche die Arbeitssysteme mit Material aus dem Supermarkt versorgen (vgl. Abbildung 36).

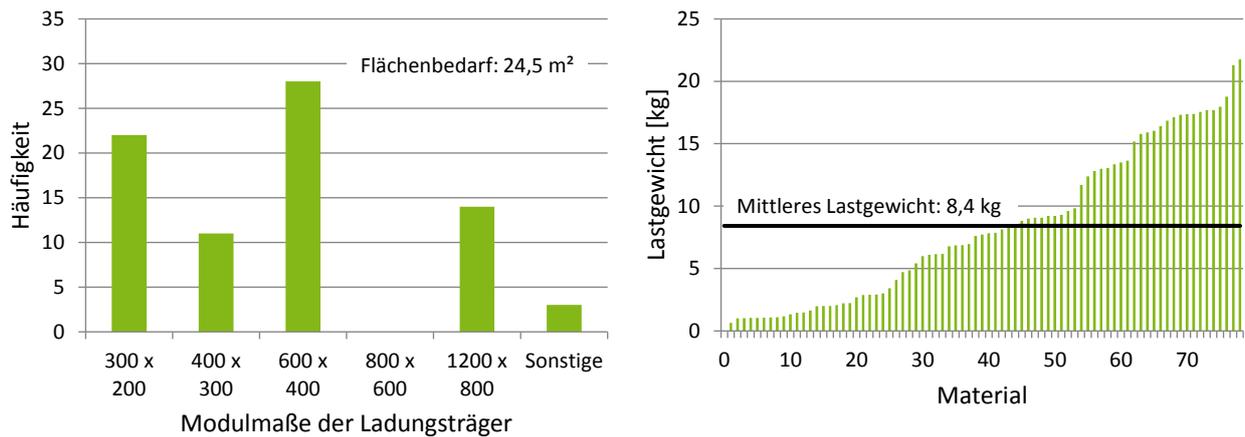


Abbildung 36: Bestehende Ladungsträgerstruktur mit Modulmaßen und Lastgewichten

Neben den 13 Palettenstellplätzen für KLT-Türme zeigt sich ein relativ hoher Anteil an LT mit den Modulmaßen 600 x 400 mm, welche entsprechend hohe Füllmengen aufweisen. Zudem müssen Bündel aus Kartontage mit bis zu 100 Stück ohne LT gehandhabt werden. Der Gesamtflächenbedarf, welcher sich als Summe aller Grundflächen der LT des Untersuchungsbereichs errechnet, beträgt in dieser Ausgangssituation 24,5 m². In Bezug auf die Lastgewichte als Folge der großen LT und Füllmengen zeigt sich, dass ca. ein Drittel aller LT ein Gewicht größer 10 kg aufweisen, dessen regelmäßiges Heben bei Frauen mit einem erhöhten Risiko für die Entwicklung bandscheibenbedingter Erkrankungen der Lendenwirbelsäule verbunden sind (BMAS 2006, S. 7). Das mittlere Lastgewicht liegt bei gegebener LT-Struktur bei 8,4 kg.

Aufgrund dieser Ausgangslage lassen sich Ziele für den Einsatz des Planungshilfsmittels ableiten. Es soll überprüft werden, welchen Einfluss eine standardisierte, höherfrequente Materialbereitstellung mittels Milkrun auf die Reduktion der LT-Abmaße und -Gewichte hat, um den Flächenbedarf des Materialspektrums im Supermarkt und die körperliche Belastung der Logistikmitarbeiterinnen für den Untersuchungsbereich zu reduzieren.

6.2.2 Eingrenzung des zu betrachtenden Materialspektrums

Aufgrund der bestehenden Varianz an zu montierenden Produkten ist es nicht sinnvoll, alle Varianten, die in den drei Arbeitssystemen montiert werden, zu betrachten. Daher ist als nächster Schritt die Auswahl eines repräsentativen Produktspektrums als Grundlage für die Machbarkeitsstudie zu treffen. Als Basis hierfür dient die Jahresproduktionsmenge der Varianten. In die weitere Betrachtung einbezogen werden die Varianten, welche gemäß einer ABC-Verteilung ca. 80 % der Jahresmenge ausmachen (vgl. Abbildung 37).

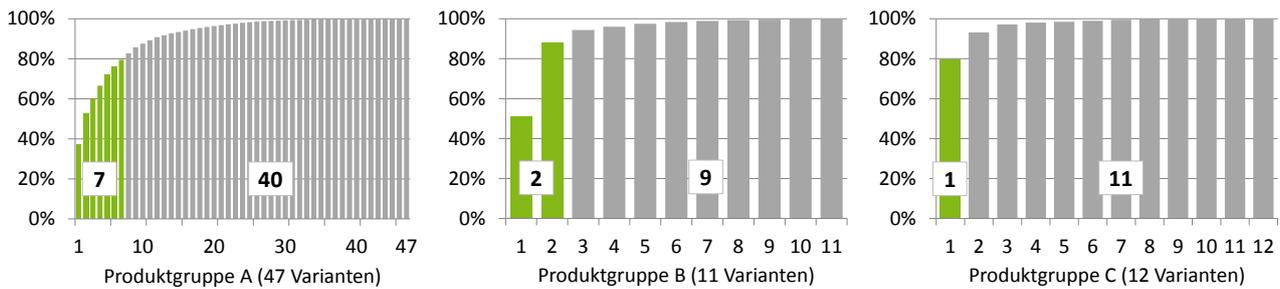


Abbildung 37: ABC-Verteilung der Produktgruppen nach jeweiliger Jahresproduktionsmenge

Es zeigt sich, dass bei Produktgruppe A sieben Varianten einen Anteil von 79,5 % an der Jahresproduktionsmenge ausmachen. Bei Produktgruppe B liegen zwei Varianten bereits bei 88,1 % und Produktgruppe C wird durch eine Variante mit 79,5 % repräsentiert. Somit ergeben sich zehn Varianten, auf welche sich 82,0 % der Jahresproduktionsmenge in diesem Bereich verteilen und die somit einen repräsentativen Anteil darstellen. Die einzelnen Produktvarianten werden im nachfolgenden mit A1, ..., A7, B1, B2 und C1 bezeichnet. Die Taktzeiten der Montage schwanken bei diesen Varianten zwischen 17,7 und 67,1 s und liegen im Mittel bei 41,5 s.

6.2.3 Szenariengenerierung

Zur Verbesserung des Materialbereitstellungsprozesses werden die bestehenden LT-Abmaße und Füllmengen reduziert, um sowohl den Flächenbedarf als auch körperliche Belastungen durch hohe Lastgewichte zu reduzieren.

In diesem Zuge bieten sich einige Prozessveränderungen hinsichtlich der Organisation der Materialbereitstellung an:

- Material in KLT-Türmen auf Palettenanhängern wird in KLT-Mengen angeliefert, um eine adäquate Handhabung des Materials für die Logistikmitarbeiterin zu ermöglichen. Zudem werden hierdurch Palettenstellplätze eliminiert.
- Material wird nicht mehr im Supermarkt, sondern für jedes Arbeitssystem individuell und in unmittelbarer Nähe auf Bereitstelltschen vom Milkrun angeliefert, so dass die nachgelagerte Bereitstellungsstufe zwischen Supermarkt und Arbeitssystem entfällt.
- Leergutabwicklung wird in den Milkrun integriert, so dass der Milkrun-Mitarbeiter leere KLT auflädt und in den Logistikbereich zur Rückführung/Wiederauffüllung transportiert.

Eine besondere Herausforderung im Untersuchungsbereich stellt die Vorverarbeitung der material-spezifischen Eingangsparameter dar. Grundvoraussetzung für das Planungshilfsmittel ist die Herausarbeitung von logistisch relevanten Varianten (vgl. Abschnitt 5.1), sofern nicht für jede mögliche Kombination ein separates Ergebnis erwünscht ist. Für größere Betrachtungsbereiche wäre dies ein ineffizientes Vorgehen, da die möglichen Kombinationen ein nicht beherrschbares Ausmaß annehmen. Zudem entsteht für jede Kombination ein errechneter Betriebsbereich. Aufgrund der geringen Variantenausprägung kann jedoch in diesem Falle eine kombinatorische Betrachtung der Produktgruppen in Form von Bereitstellungsszenarien zugrunde gelegt werden. Da an allen drei

Arbeitssystemen unabhängig voneinander und zeitgleich montiert werden kann, ergeben sich für den Untersuchungsbereich 14 mögliche Kombinationen an Montageaufträgen, welche für die materialspezifischen Eingangsparemeter des Planungshilfsmittels herangezogen werden können (vgl. Tabelle 17).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Produktgruppe A	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Produktgruppe B	B1	B2												
Produktgruppe C	C1													

Tabelle 17: Mögliche Auftragskombinationen bei gegebener Variantenstruktur

Dies bedeutet, dass mit dem Planungshilfsmittel für jede Kombination an Aufträgen ein Betriebsbereich ermittelt wird und im Anschluss ein potenzielles gemeinsames Intervall für den Milkrunbetrieb festgelegt wird. Existiert keine solche Schnittmenge, können zwei oder mehrere Betriebsbereiche je nach aktueller Kombination angegeben werden.

Neben den materialspezifischen Parametern sind weiterhin die bereitstellungsspezifischen Parameter für die Machbarkeitsstudie auszuprägen. Diese lassen sich gemäß Abschnitt 5.1 in die Bereiche Kommissionierung und Abgabe sowie Transport unterteilen (vgl. Tabelle 18).

Aufgrund der vorhandenen Lagerung der Materialien im AKL/HRL wird der Schleppzug durch einen Lagermitarbeiter be- und entladen. Somit liegt eine entkoppelte Kommissionierung vor. Die Anforderung neuer Materialien obliegt der Logistikmitarbeiterin im Fertigungsbereich, welche die Einweg-Kanban-Karten scannt und somit eine Auslagerung im AKL initiiert. Daher ist der Informationsverarbeitungsanteil des Milkrun-Mitarbeiters an der Gesamtzeit mit null zu beziffern. Weiterhin ist der Mitarbeiter im Untersuchungsbereich männlich und der Grenzwert für seine körperliche Belastung nach MLT mit 25 Punkten angesetzt worden. Die Nettoarbeitszeit des Mitarbeiters beträgt 450 min (7,5 Stunden).

Der Transport wird durch einen Schleppzug aus maximal drei Anhängern mit jeweils vier Ebenen durchgeführt. Die Abmaße einer Ebene betragen 1.200 x 800 mm, die Deichsellänge 480 mm. Maximal können LT mit einem Ebenengewicht von 150 kg transportiert werden. Aus einem Hallenlayout konnte die Länge der Route mit 250 m ermittelt werden, auf welcher sechs Kurven zu durchfahren sind.

Kommissionierung und Abgabe

Beidseitige Kommissionierung	μ	0	0 = Einseitige Kommissionierung; 1 = Beidseitige Kommissionierung
Höhe eines KLT-Anhängers [mm]	h_{AH}	1500	-
Höhe der untersten Ebene eines KLT-Anhängers [mm]	h_{UE}	300	-
Art der Kanban-Steuerung	φ	EK	KK = Karten-Kanban; BK = Behälter-Kanban; EK = Elektronischer Kanban
Geschlecht des Materialbereitstellers	g_{MA}	0	0 = Männlich; 1 = Weiblich
Maximaler MLT-Punktwert	PW_{max}	25	-
Nettoarbeitszeit des Materialbereitstellers [min]	t_{AZ}	450	-

Transport

Maximale Anzahl Anhänger	$n_{AH,max}$	3	ganzzahlige Werte
Anzahl Ebenen je KLT-Anhänger	$n_{E,AH}$	4	ganzzahlige Werte
Ebenenlänge eines Anhängers [mm]	l_E	1200	Modulare Größen (z.B. 600, 300, 150)
Ebenenbreite eines Anhängers [mm]	b_E	800	Modulare Größen (z.B. 400, 200, 100)
Deichsellänge eines Anhängers [mm]	l_D	480	-
Maximal Ebenenlast [kg]	$m_{E,max}$	150	-
Länge der Route [m]	d_{Route}	250	-
Anzahl Kurven auf Route	n_{Kurve}	6	ganzzahlige Werte

Tabelle 18: Ausprägung bereitstellungsspezifischer Parameter des Untersuchungsbereichs

Mit diesen im Unternehmen erhobenen Parametern kann in einem zweiten Schritt das Planungshilfsmittel entsprechend der Auftragskombinationen mit 14 Berechnungsläufen gestartet werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden nachfolgend dargestellt.

6.3 Ergebnisdarstellung

Um einen Überblick über das im Rahmen des Planungshilfsmittels abgebildete innerbetriebliche Milkrun-System zu erlangen, kann dieses zunächst mittels des in Kapitel 3 erarbeiteten morphologischen Kastens ausgeprägt werden.

Die Bereitstellungsstufe ist zwischen Lager und Arbeitsplatz angesiedelt, zwischen denen ausschließlich Baugruppen/Bauteile in KLT transportiert werden. Die Auslösungsart ist durch feste Zeitpunkte charakterisiert, zu denen Material mittels einer hybriden Steuerung angefordert wird. Die Kommissionierung wird durch den Logistikbereich übernommen, so dass eine entkoppelte Form vorliegt und die Art der Entnahme somit nicht ausgeprägt werden kann. Zusatztätigkeiten fallen keine an. Der Transport wird zwischen einer Quelle und mehreren Senken mit einem Schleppzug auf statischen Routen durchgeführt. Hinsichtlich der Abgabe liegt die gekoppelte Art vor, bei der Material in Regale abgegeben und Leergut zu einer Leergutsammelstelle im Logistikbereich zurückgeführt wird. Das untersuchte System liegt mit seinen Ausprägungen somit gänzlich im Betrachtungsraum des Modells (vgl. Abbildung 41).

Für die Berechnung der 14 unterschiedlichen Auftragskombinationen wurde das Planungsmodell jeweils mit einem aufbereiteten Datensatz an materialspezifischen Parametern durchlaufen. Die Laufzeiten der 14 Berechnungsdurchgänge schwankten hierbei zwischen 5,07 und 12,75 min. Die mittlere Laufzeit einer Auftragskombination betrug 7,02 min. Die Schwankungen traten dabei

ausschließlich durch die Laufzeit des Solvers zur Lösung des Bin Packing Problems auf und waren abhängig von den Abmaßen der in das Optimierungsmodell eingehenden KLT sowie der Startlösung des Variablentableaus.

Im Anschluss an den Berechnungsdurchgang konnte für jede Auftragskombination ein separater Betriebsbereich identifiziert werden (vgl. Abbildung 38).

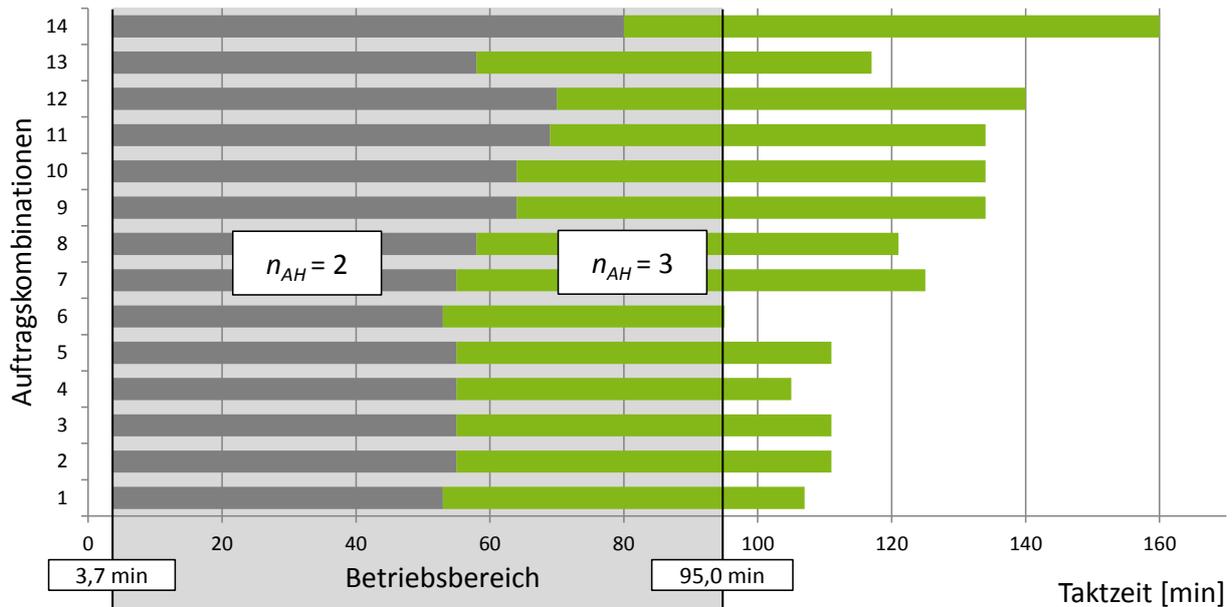


Abbildung 38: Betriebsbereiche der Szenarien mit resultierendem Gesamtbetriebsbereich

Die auf die gesamte Schichtdauer basierende Planungsdimension Ergonomie lag in allen Durchläufen zwischen 20,3 und 23,4 Punkten und liegt somit im betrieblich erlaubten Risikobereich. Die kleinstmögliche Taktzeit des Betriebsbereichs wird daher durch die Planungsdimension Zeit bestimmt und lag bei den 14 Kombinationen relativ konstant zwischen 3,5 und 3,7 min. die größtmögliche Taktzeit hängt von der Planungsdimension Kapazität ab. So waren für jede Kombination mindestens zwei KLT-Anhänger erforderlich. Im Bereich zwischen 53,0 und 80,0 min Taktzeit wird jedoch ein dritter Anhänger benötigt, welcher für maximalen Betriebsbereich von 95 bis 160 min je Kombination die Kapazität bereitstellt. Für Taktzeiten jenseits dieser Werte sind vier Anhänger anzukoppeln, was jedoch durch die betrieblichen Restriktionen untersagt ist.

Zur Ermittlung des Gesamtbetriebsbereichs sind diejenigen Intervallgrenzen zu bestimmen, welche für alle Kombinationen zulässig sind. Dies ist somit ein Taktzeitbereich von 3,7 bis 95,0 min. Dieses Intervall entspricht der Kombination 6 aus den Produkten A6, B1 und C1, deren Betriebsbereich in Abbildung 39 sowie detaillierte Daten zu den Planungsdimensionen in Abbildung 47 exemplarisch dargestellt sind.

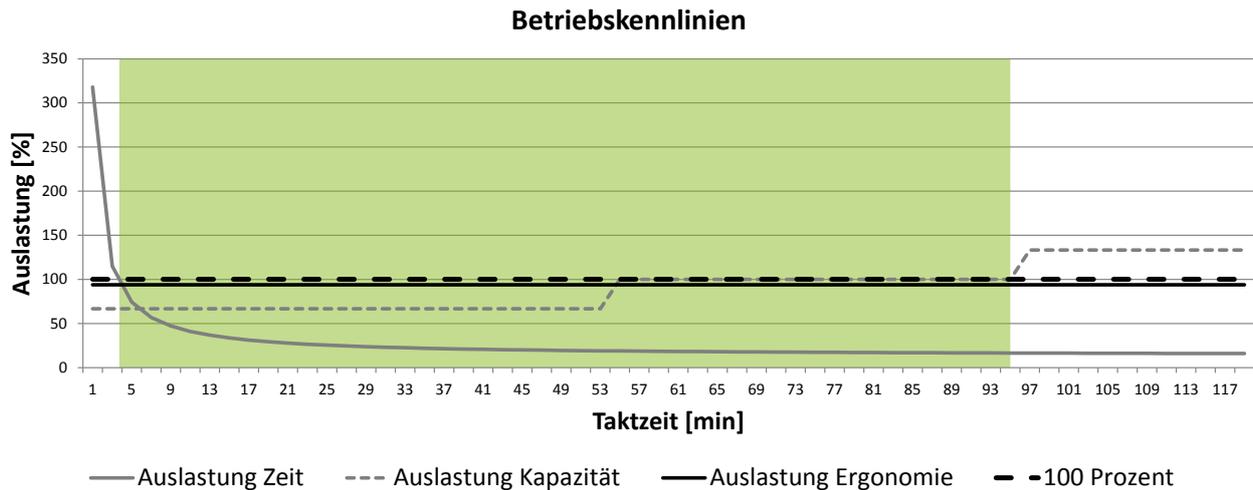


Abbildung 39: Auszug aus dem Ergebnisblatt mit Betriebsbereich für Auftragskombination 6

Für die betriebliche Praxis sind jedoch bestimmte Bereiche des Intervalls nicht realistisch durchführbar. Auf der einen Seite können rechnerisch ermittelte Taktzeiten von 3,7 min bei einer entkoppelten Kommissionierung im Fallbeispiel zu Problemen hinsichtlich der Auslagerleistung des AKL führen. Auf der anderen Seite sinkt mit zunehmenden Taktzeiten die Auslastung des Mitarbeiters. Für die Auftragskombination 6 reduziert sich diese kontinuierlich bis auf 16,5 % bei einer Zykluszeit von 15,7 min und einer Taktzeit von 95,0 min. Geringe Auslastungen des Milkrun können genutzt werden, um den Mitarbeiter zwischen den Zyklen im Logistikbereich einzusetzen. Hierbei ist jedoch auf die körperliche Belastung zu achten, welche für nicht im Milkrun-Zyklus anfallende Tätigkeiten separat zu bewerten sind.

Für den konkreten Fall ist eine Taktzeit bis 53 min zu empfehlen, da hierbei der Milkrun für alle Auftragskombinationen mit nur zwei Anhängern betrieben werden kann und somit ggf. ein sporadischer Fertigwarenabtransport mittels eines dritten Anhängers ermöglicht wird. Zudem sind ausreichend Freiräume zwischen den Zyklen vorhanden, um den Mitarbeiter sinnvoll anderweitig einzusetzen. Zu beachten ist jedoch, dass längere Unterbrechungen der Bereitstellungstätigkeit zwischen den Zyklen Auswirkungen auf die Routinebildung der Mitarbeiter haben könnten.

Durch die höherfrequente Anlieferung können letztendlich LT-Abmaße und -Gewichte reduziert werden (vgl. Abbildung 40). So ergibt sich eine theoretische Reduktion des Flächenbedarfs von 24,5 m² auf 8,3 m². Dieser Wert folgt aus der rechnerischen Summe der Modulmaße aller unterschiedlichen LT. Zusätzlicher Bedarf durch Mehr-Behälter-Nutzung ist hierbei aufgrund der Vergleichbarkeit zur Ausgangssituation nicht berücksichtigt. Hinsichtlich des mittleren Lastgewichts kann eine Reduzierung von 8,4 kg auf 2,0 kg bei der Lastenhandhabung erzielt werden.

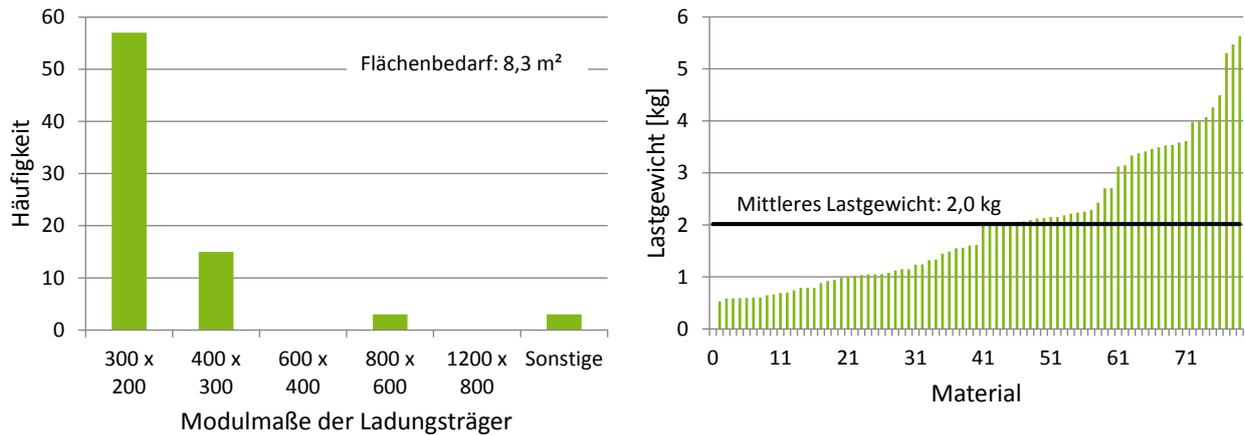


Abbildung 40: Ladungsträgerstruktur mit reduzierten Modulmaßen und Lastgewichten

Die Untersuchung zeigt, dass mittels des entwickelten Planungshilfsmittels unter Berücksichtigung unternehmensspezifischer Parameter schnell und aufwandsarm erste Abschätzungen in Bezug auf mögliche Taktzeiten, Transportkapazitäten und ergonomische Belange durchgeführt werden können. Aufgrund des eingeschränkten Betrachtungsraums dreier Arbeitssysteme kann in diesem Fallbeispiel jedoch nur ein Auszug aus dem gesamten Materialbestand des Supermarkts dargelegt werden. Hier sind weitere Betrachtungen hinsichtlich der LT-Struktur und des Materialbereitstellungsprozesses zu unternehmen, welche jedoch aufgrund der gegebenen Datenlage und dem Umfang der Auswertung den Rahmen der Validierung überschreiten würden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Eine effiziente und montagegerechte Materialbereitstellung stellt einen wichtigen Faktor zur Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen dar. Als Unterstützung des Wertschöpfungsprozesses trägt die Materialbereitstellung dazu bei, durch eine adäquate Bemessung der LT-Anzahlen und -Größen zeitliche, flächenmäßige und ergonomische Vorteile in der Montage zu realisieren. Durch die Reduzierung des Materialbestands sind jedoch höherfrequente Belieferungskonzepte zu etablieren, um die Versorgungssicherheit der Montage zu gewährleisten.

Als ein Konzept, welches in der industriellen Praxis eine zunehmende Verbreitung erfährt, stellt der innerbetriebliche Milkrun eine effiziente Form der Materialbereitstellung in der Montage dar. Aufgrund der hohen Komplexität der Planung einer getakteten Materialversorgung und hierzu fehlenden Ansätzen in der wissenschaftlichen Literatur wurde in diesem Forschungsvorhaben ein Planungskonzept zur parameterbasierten Modellierung von Milkrun-Systemen erarbeitet und in Form des Planungshilfsmittels praxistauglich implementiert.

Hierzu wurden im zweiten und dritten Kapitel zunächst die theoretischen Grundlagen für die weitergehenden Betrachtungen gelegt. Der Fokus lag hierbei auf den Organisationsprinzipien und Strategien der Materialbereitstellung, da ein Milkrun-System als organisatorisches Konzept in der Praxis häufig stark unternehmensspezifisch geprägt ist und daher eine Vielzahl an Ausprägungen existieren. Auf Basis umfangreicher Literaturrecherchen konnten sechs Gestaltungsfelder identifiziert und in Form einer Morphologie mit Merkmalen und Merkmalsausprägungen versehen werden. Diese dient zur Einordnung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme und stellt einen wichtigen Schritt zur Systematisierung des bisher wenig beachteten Forschungsgebiets dar.

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen behandelte das Kapitel 4 die Konzeption eines mathematischen Planungsmodells für Milkrun-Systeme, welches aufgrund der stark variierenden Formen mittels unternehmensspezifischen Parametern auszuprägen ist. Hierzu wurde zuerst die Eignung bestehender Planungskonzepte untersucht, um hieraus den Bedarf einer neuen Herangehensweise abzuleiten und Anforderungen an das neue Konzept zu definieren. Mit der Beschreibung der Zielgröße, durch die Berücksichtigung der drei Planungsdimensionen Zeit, Kapazität und Ergonomie und der Auswahl von geeigneten formalen Verfahren zur mathematischen Beschreibung der Planungsdimensionen konnte ein breites Spektrum der Planung von Milkrun-Systemen abgedeckt werden.

Im Rahmen des fünften Kapitels erfolgte die mathematische Modellierung der Planungsdimensionen auf Basis material- und bereitstellungsspezifischer Parameter. Die in den Planungsdimensionen ermittelten Werte konnten abschließend in ein iteratives Gesamtmodell zusammengeführt werden, welches unter Einhaltung der zeitlichen, kapazitiven und ergonomischen Restriktionen eine rechnerisch optimale Taktzeit und einen für die Praxis relevanten Betriebsbereich für innerbetriebliche Milkrun-Systeme ausweist. Abschließend wurde das Planungsmodell in ein software-basiertes Planungshilfsmittel überführt, um die industrielle Praxistauglichkeit zu gewährleisten.

In Kapitel 6 erfolgte die industrielle Validierung des aus der Modellierung hervorgegangenen Planungshilfsmittels in der Industrie. Hierbei zeigte sich die breite Anwendbarkeit und hohe Praxistauglichkeit des Planungshilfsmittels.

Es bleibt festzuhalten, dass durch das erarbeitete Planungskonzept für innerbetriebliche Milkrungs-Systeme der Stand der Technik durch die Ergebnisse des Forschungsvorhabens erweitert werden konnte. So schafft die aufwandsarme, unternehmensspezifische Auswertung von Daten aus der Materialbereitstellung sowie die Aggregation zu relevanten Zeit-, Kapazitäts- und Ergonomie-Kennzahlen Transparenz in der Planung logistischer Systeme und stellt insbesondere für KMU eine hilfreiche Unterstützung dar.

Literaturverzeichnis

- Abele, E., Brungs, F.: Optimierung der innerbetrieblichen Materialversorgung mittels Milkrun. In: *Industrie Management*. 25 (2009) 5, S. 61-64.
- Aggteleky, B.: *Fabrikplanung. Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung. Band 2. Betriebsanalyse und Feasibility-Studie*. 2. Aufl., Hanser, München, Wien 1990.
- Álvarez, R., Calvo, R., Peña, M. M., Domingo, R.: Redesigning an assembly line through lean manufacturing tools. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 43 (2009) 9-10, S. 949-958.
- ArbSchG: Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 15 Absatz 89 des Gesetzes vom 5. Februar 2009 (BGBl. I S. 160) geändert worden ist. Abrufbar im Internet. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/arbschg/index.html>, zuletzt besucht am 13.12.2012.
- Arndt, H.: *Supply Chain Management. Optimierung logistischer Prozesse*. 5. Aufl., Gabler, Wiesbaden 2010.
- Barnes, R. M.: *Motion and Time Study. Design and Measurement of Work*. 7. Aufl., John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto 1980.
- BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) (Hrsg.): *Leitmerkalmethode zur Beurteilung von Heben, Halten, Tragen*. Dortmund 2001. Abrufbar im Internet. URL: <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Physische-Belastung/pdf/LMM-Heben-Halten-Tragen.pdf>, zuletzt besucht am 13.12.2012.
- BAuA (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin) (Hrsg.): *Volkswirtschaftliche Kosten durch Arbeitsunfähigkeit 2009*. Dortmund 2011. Abrufbar im Internet. URL: <http://www.baua.de/de/Informationen-fuer-die-Praxis/Statistiken/Arbeitsunfaehigkeit/Kosten.html>, zuletzt besucht am 13.12.2012.
- Baudin, M.: *Lean Logistics. The Nuts and Bolts of Delivering Materials and Goods*. Productivity Press, New York 2004.
- Becks, C.: Das neue Datensystem MTM-UAS. In: *REFA-Nachrichten*. 32 (1979) 1, S. 3-8.
- Benz, J., Höflinger, M.: *Logistikprozesse mit SAP. Eine anwendungsbezogene Einführung*. 2. Aufl., Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2008.
- BetrVG: Betriebsverfassungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 25. September 2001 (BGBl. I S. 2518), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2424) geändert worden ist. Abrufbar im Internet. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/betrvg/index.html>, zuletzt besucht am 13.12.2012.

- Bicheno, J., Holweg, M.: *The Lean Toolbox. The Essential Guide to Lean Transformation*. 4. Aufl., PICSIE Books, Buckingham 2009.
- Bichler, K., Schröter, N.: *Praxisorientierte Logistik*. 3. Aufl., Kohlhammer, Stuttgart 2004.
- Bierwirth, T.: *Virtuelle Logistikplanung für die Automobilindustrie. Methoden und Modelle im Rahmen der Digitalen Fabrik*. Shaker, Aachen 2004.
- Bischoff, J., Barthel, H., Eisele, M.: *Automobilbau mit Zukunft. Konzepte und Bausteine für Produktion und Logistik*. LOG_X, Stuttgart 2007.
- BMAS (Bundesministerium für Arbeit und Soziales) (Hrsg.): *Berufskrankheiten-Verordnung. Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 2108*. Berlin 2006. Abrufbar im Internet. URL: <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Berufskrankheiten/pdf/Merkblatt-2108.pdf>, zuletzt besucht am 13.12.2012.
- Bokranz, R., Landau, K.: *Handbuch Industrial Engineering. Produktivitätsmanagement mit MTM. Band 1: Konzept*. 2. Aufl., Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2012a.
- Bokranz, R., Landau, K.: *Handbuch Industrial Engineering. Produktivitätsmanagement mit MTM. Band 2: Anwendung*. 2. Aufl., Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2012b.
- Boppert, J., Schedlbauer, M. J., Günthner, W. A.: *Zukunftsorientierte Logistik durch adaptive Planung*. In: Günthner, W. A. (Hrsg.): *Neue Wege in der Automobillogistik. Die Vision der Supra-Adaptivität*. Springer, Berlin, Heidelberg 2007, S. 345-357.
- Bozer, Y. A., McGinnis, L. F.: *Kitting versus Line Stocking. A Conceptual Framework and a Descriptive Model*. In: *International Journal of Production Economics*. 28 (1992) 1, S. 1-19.
- Bruder, R., Rademacher, H., Schaub, K., Geiss, C.: *Modular Concepts for Integrating Ergonomics into Production Processes*. In: Schlick, C. M. (Hrsg.): *Industrial Engineering and Ergonomics. Visions, Concepts, Methods and Tools. Festschrift in Honor of Professor Holger Luczak*. Springer, Berlin, Heidelberg 2009, S. 383-394.
- Brunner, F. J.: *Japanische Erfolgskonzepte. KAIZEN, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance, Shopfloor Management, Toyota Production Management, GD³ - Lean Development*. 2. Aufl., Hanser, München, Wien 2011.
- Brynzer, H., Johansson, M. I.: *Design and performance of kitting and order picking systems*. In: *International Journal of Production Economics*. 41 (1995) 1-3, S. 115-125.
- Bukchin, Y., Meller, R. D.: *A space allocation algorithm for assembly line parts*. In: *IIE Transactions*. 37 (2005) 1, S. 51-61.
- Bullinger, H.-J.: *Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis*. Hanser, München, Wien 1986.
- Bullinger, H.-J., Lung, M. M.: *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*. Teubner, Stuttgart 1994.

- Burghardt, M.: Projektmanagement. Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten. 9. Aufl., Publicis, Erlangen 2012.
- Cardaun, U.: Bei Bosch hat es gefunkt. In: Automobil Produktion. 21 (2007) 7, S. 88-90.
- Chase, R. B., Jacobs, F. R., Aquilano, N. J.: Operations Management for Competitive Advantage. 11. Aufl., Irwin/McGraw-Hill, Boston et al. 2006.
- Ciernoczolowski, D. D.: Performance Evaluation And Planning For Cyclic, Route-based Material Distribution Systems in Lean Manufacturing. Dissertation, University of Michigan. Ann Arbor 2007.
- Cintra, G. F., Miyazawa, F. K., Wakabayashi, Y., Xavier, E. C.: A note on the approximability of cutting stock problems. In: European Journal of Operational Research. 183 (2007) S. 1328-1332.
- Costa, B., Dias, L. S., Oliveira, J. A., Pereira, G.: Simulation as a Tool for Planning a Material Delivery System to Manufacturing Lines. In: Fernandes, A. C., Figueiredo, J. D. (Hrsg.): Proceedings of International Engineering Management Conference Europe 2008. IEEE International, Piscataway 2008, S. 439-443.
- Deleersnyder, J.-L., Hodgson, T. J., King, R. E., O'Grady, P. J., Savva, A.: Integrating Kanban Type Pull Systems and MRP Type Push Systems. Insights from a Markovian Model. In: IIE Transactions. 24 (1992) 3, S. 43-56.
- Deuse, J., Busch, F.: Zeitwirtschaft in der Montage. In: Lotter, B., Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2012, S. 79-107.
- Deuse, J., Hartung, J.: Altersneutrale und wirtschaftliche Gestaltung von Montagearbeitsplätzen. In: Müller, E. (Hrsg.): Demographischer Wandel. Herausforderungen für die Arbeits- und Betriebsorganisation der Zukunft. GITO, Berlin 2012, S. 219-234.
- Deuse, J., Keßler, S., Wischniewski, S.: Ganzheitliche Produktionssysteme für Logistikdienstleister. Eine Aufgabe für die nahe Zukunft. In: Wolf-Kluthausen, H. (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2006. Free Press, Korschbroich 2006, S. 46-51.
- Deuse, J., Richter, R.: Industrial Engineering im modernen Produktionsbetrieb. Voraussetzung für einen erfolgreichen Verbesserungsprozess. In: Betriebspraxis & Arbeitsforschung. Zeitschrift für angewandte Arbeitswissenschaft. 1 (2011) 3, S. 6-13.
- Deuse, J., Stausberg, J. R., Wischniewski, S.: Leitsätze zur Gestaltung einer verschwendungsarmen Produktion. In: ZWF. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 102 (2007) 5, S. 291-294.
- DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) (Hrsg.): BGI 7011. Gesunder Rücken - gesunde Gelenke. Noch Fragen? DGUV, Berlin 2007.

- DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) (Hrsg.): BGI 504-46. Handlungsanleitung für die arbeitsmedizinische Vorsorge nach dem Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz G 46 „Belastungen des Muskel- und Skelettsystems einschließlich Vibrationen“. DGUV, Berlin 2009.
- Dickmann, E.: Elektronische Kanban-Systeme (eKanban). In: Dickmann, P. (Hrsg.): Schlanker Materialfluss. Mit Lean Production, Kanban und Innovationen. 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2009, S. 403-410.
- Dickmann, P., Dickmann, E.: Kanban funktioniert auch bei komplexen Aufgabenstellungen. In: Logistik für Unternehmen. 21 (2007) 10, S. 46-49.
- DIN 199-1: Technische Produktdokumentation. CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten. Teil 1: Begriffe. Beuth, Berlin 2002.
- DIN 30781-1: Transportkette. Grundbegriffe. Beuth, Berlin 1989.
- DIN 33402-2: Ergonomie. Körpermaße des Menschen. Teil 2: Werte. Beuth, Berlin 2005.
- DIN EN 15620: Ortsfeste Regalsysteme aus Stahl. Verstellbare Palettenregale. Grenzabweichungen, Verformungen und Freiräume. Beuth, Berlin 2010.
- DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Beuth, Berlin 2004.
- DIN ISO 5053: Kraftbetriebene Flurförderzeuge. Begriffe. Beuth, Berlin 1994.
- Dombrowski, U., Hennersdorf, S., Palluck, M.: Fabrikplanung unter den Rahmenbedingungen Ganzheitlicher Produktionssysteme. In: wt Werkstattstechnik online. 96 (2006) 4, S. 156-161.
- Dombrowski, U., Schmidt, S.: Planung und Steuerung der Implementierung Ganzheitlicher Produktionssysteme. In: wt Werkstattstechnik online. 98 (2008) 4, S. 236-241.
- Dombrowski, U., Vollrath, H.: Einsatz der Methoden Ganzheitlicher Produktionssysteme in der Logistik. In: ZWF. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 102 (2008) 7/8, S. 511-515.
- Domingo, R., Álvarez, R., Peña, M. M., Calvo, R.: Materials flow improvement in a lean assembly line. A case study. In: Assembly Automation. 27 (2007) 2, S. 141-147.
- Domschke, W., Drexl, A.: Einführung in Operations Research. 8. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2011.
- Dreher, S., Nürnberger, A., Kulus, D.: Routenoptimierung in der Produktionslogistik. In: ZWF. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 104 (2009) 3, S. 131-135.
- Droste, M., Deuse, J.: A Planning Approach for In-plant Milk Run Processes to Optimize Material Provision in Assembly Systems. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV2011), Montreal, Canada, 3-5 October 2011. Springer, Berlin, Heidelberg 2011, S. 605-610.

- Droste, M., Hasselmann, V.-R., Deuse, J.: Optimierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme. Entwicklung eines parameterbasierten Modells zur Optimierung der Materialbereitstellung. In: Productivity Management. 17 (2012) 1, S. 25-28.
- Dyckhoff, H.: A typology of cutting and packing problems. In: European Journal of Operational Research. 44 (1990) S. 145-159.
- Eich, B.: Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung. Herbert Utz Verlag, München 2001.
- Eilon, S., Christofides, N.: The Loading Problem. In: Management Science. 17 (1971) 5, S. 259-268.
- Ellegast, R.: Verfahren zur Bewertung von manuellen Lastenhandhabungen. In: HVBG (Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften) (Hrsg.): BGIA-Report 4/2005. Fachgespräch Ergonomie 2004. Zusammenfassung der Vorträge, gehalten während des Fachgespräches "Ergonomie" am 15./16. November 2004 in Dresden. HVBG, Sankt Augustin 2005, S. 21-38.
- ElMaraghy, H. A., Wiendahl, H.-P.: Changeability. An Introduction. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. Springer, London 2009, S. 3-24.
- Eriksson, K. M., Hanson, R.: Performance Impact Of Options For Routing And Delivery Initiation In Tugger Train Delivery Systems. In: Academy, T. S. P. (Hrsg.): Proceedings of Swedish Production Symposium 2008 (SPS 08). 18.-20. November 2008, Stockholm, Schweden. 2008, S. 345-351.
- Erlach, K.: Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2010.
- Faupel, T.: Einsatz von RFID zur Optimierung dezentraler Materialfluss-Steuerung. Ein Informationssystem zur Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung in Kanban. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg 2009.
- Faust, P., Sainer, S.: Versorgungslogistik. Agilität als Erfolgsfaktor in turbulenten Zeiten. In: ZWF. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 105 (2010) 6, S. 569-576.
- Feige, D.: Entscheidungsunterstützung (EUS) zwischen Theorie und Praxis. In: Müller, S., Roth, A., Schmidt, N. (Hrsg.): Märkte, Anwendungsfelder und Technologien in der Logistik. Ergebnisse und Reflexion von 20 Jahren Logistikforschung. Festschrift für Professor Peter Klaus, DBA/Boston Univ. Gabler, Wiesbaden 2009, S. 339-360.
- Feige, D., Klaus, P.: Modellbasierte Entscheidungsunterstützung in der Logistik. Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg 2008.

- Finke, Y.: Kostenoptimale Produktions- und Bevorratungsstrategie nach End of Production (EOP). Dortmund 2010. Abrufbar im Internet. URL: <http://hdl.handle.net/2003/27251>, zuletzt besucht am 13.12.2012.
- Fortmann, K.-M., Kallweit, A.: Logistik. 2. Aufl., Kohlhammer, Stuttgart 2007.
- Gerds, M., Lempio, F.: Mathematische Optimierungsverfahren des Operations Research. De Gruyter, Berlin, New York 2011.
- Gohout, W.: Operations Research. Einige ausgewählte Gebiete der linearen und nichtlinearen Optimierung. 4. Aufl., Oldenbourg, München 2009.
- Goldscheid, C.: Ermittlung der Wirbelsäulenbelastung in manuellen Kommissioniersystemen (Industrial Engineering, Bd. 1). Shaker, Aachen 2008.
- Gorecki, P., Pautsch, P.: Anwendung des Small Trains innerhalb des Pull-Systems. In: Productivity Management. 16 (2011) 4, S. 16-19.
- Grob, R., Haffner, H.: Planungsleitlinien Arbeitsstrukturierung. Systematik zur Gestaltung von Arbeitssystemen. Siemens-Aktiengesellschaft, Berlin, München 1982.
- Groover, M. P.: Work Systems and the Methods, Measurement, and Management of Work. Pearson, Upper Saddle River 2007.
- Große-Heitmeyer, V.: Logistik. In: Wiendahl, H.-P., Gerst, D., Keunecke, L. (Hrsg.): Variantenbeherrschung in der Montage. Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Springer, Berlin, Heidelberg 2004, S. 67-76.
- Grünz, L.: Ein Modell zur Bewertung und Optimierung der Materialbereitstellung. Shaker, Aachen 2004.
- Gudehus, T.: Grundlagen der Kommissioniertechnik. Verlag W. Girardet, Essen 1973.
- Gudehus, T.: Dynamische Disposition. Strategien zur optimalen Auftrags- und Bestandsdisposition. Springer, Berlin, Heidelberg 2006.
- Gudehus, T.: Logistik. Grundlagen, Strategien, Anwendungen. 4. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2010.
- Günthner, W. A. (Hrsg.): Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport. Ergebnisse einer Studie. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, München 2012.
- Günthner, W. A., Kammergruber, F.: Nachhaltige Ergonomie planen. In: Hebezeuge Fördermittel. Fachzeitschrift für Technische Logistik. 51 (2011) 10, S. 508-511.
- Haberfellner, R., de Weck, O., Fricke, E., Vössner, S.: Systems Engineering. Grundlagen und Anwendung. 12. Aufl., Orell Füssli, Zürich 2012.
- Hall, R. W.: Driving the Productivity Machine. Production Planning and Control in Japan. American Production and Inventory Control Society, Falls Church 1981.

- Hanson, R., Medbo, L.: Kitting and time efficiency in manual assembly. In: International Journal of Production Research. 50 (2012) 4, S. 1115-1125.
- Harren, R.: Mehrdimensionale Packungsprobleme. Approximation geometrischer Verallgemeinerungen klassischer Packungsprobleme. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken 2007.
- Heider-Peschel, M.: Wegstrecken reduzieren. In: MM Logistik. (2006) 1, S. 20-21.
- Heider-Peschel, M.: Versorgung just in time. Stehschlepper für die zyklische Materialversorgung nach dem Milkrun-Prinzip. In: Der Betriebsleiter. 49 (2008) 12, S. 38-39.
- Heider-Peschel, M.: Wege und Kosten sparen. In: Logistik für Unternehmen. 23 (2009) 3, S. 27-28.
- Heinz, K., Grünz, L., Mayer, M.: Auswahl zeit- und kostenoptimaler Materialbereitstellungsstrategien für die Montage. Praxiswissen, Dortmund 2003.
- Heinz, K., Mayer, M., Grünz, L.: Planung der Materialbereitstellung bei optimalen Kosten und Zeiten. In: wt Werkstattstechnik online. 92 (2002) 10, S. 531-535.
- Heinz, K., Mesenhöller, E.: Zeitdaten zur Gestaltung der Montage. In: Landau, K., Luczak, H. (Hrsg.): Ergonomie und Organisation in der Montage. Hanser, München, Wien 2001, S. 572-580.
- Heiserich, O.-E., Helbig, K., Ullmann, W.: Logistik. Eine praxisorientierte Einführung. 4. Aufl., Gabler, Wiesbaden 2011.
- Helfrich, C.: Praktisches Prozess-Management. Vom PPS-System zum Supply-Chain-Management. 2. Aufl., Hanser, München, Wien 2002.
- Helms, W.: Neuentwicklungen und Aktivitäten der Deutschen MTM-Vereinigung. Bachem, Köln 1980.
- Hempfen, S., Finke, Y., Deuse, J.: Ergonomie in logistischen Prozessen. In: Landau, K. (Hrsg.): Produktivität im Betrieb. Tagungsband der GfA Herbstkonferenz 2009. Millstatt, 23.-25.09.2009. Ergonomia, Stuttgart 2009, S. 259-263.
- Hoffbauer, D., Hoffbauer, R.: Gestaltung von Kommissioniersystemen. In: Pulverich, M., Schietinger, J. (Hrsg.): Handbuch Kommissionierung. Effizient picken und packen. Verlag Heinrich Vogel, München 2009, S. 66-107.
- Hopp, W. J., Spearman, M. L.: Factory Physics. 3. Aufl., McGraw-Hill, New York 2008.
- IAD (Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt): Multiple-Lasten-Tool. Bewertung multipler (manueller) Lastenhandhabungen. Einstufungshilfe zu Tool-Version 1.4. Darmstadt 2010a. Abrufbar im Internet. URL: http://www.kobra-projekt.de/system/files/download/files/MultipLa_V1.4_Einstufungshilfe.pdf, zuletzt besucht am 13.12.2012.

- IAD (Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt): Multiple-Lasten-Tool. Bewertung multipler (manueller) Lastenhandhabungen. Hintergrundinformationen zu Tool-Version 1.4. Darmstadt 2010b. Abrufbar im Internet. URL: http://www.kobra-projekt.de/system/files/download/files/MultipLa_V1.4_Hintergrundinformation.pdf, zuletzt besucht am 13.12.2012.
- Ihde, G. B.: Distributions-Logistik. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York 1978.
- Ihme, J.: Logistik im Automobilbau. Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau. Hanser, München, Wien 2006.
- Industrie Paletten GmbH: Gitterboxen. 2012. Abrufbar im Internet. URL: <http://www.industriepaletten.de/produkte/gitterboxen/index.html>, zuletzt besucht am 13.12.2012.
- Isermann, H.: Grundlagen eines systemorientierten Logistikmanagements. In: Isermann, H. (Hrsg.): Logistik. Gestaltung von Logistiksystemen. 2. Aufl., Moderne Industrie, Landsberg/Lech 1998, S. 21-60.
- Jäger, M., Göllner, R., Jordan, C., Theilmeier, A., Luttmann, A.: Belastung der Lendenwirbelsäule beim Heben und Umsetzen von Lasten. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. 56 (2002) 1-2, S. 93-105.
- Jobi, B., Neuhäuser, D., Sommer, T.: Ganzheitliche Planung logistischer Systeme. Hilfestellung durch EDV-gestützte Assistenzsysteme. In: Scheid, W.-M. (Hrsg.): 5. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL). Technische Universität Ilmenau 1. - 2. Oktober 2009. Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2009, S. 171-181.
- Jünemann, R.: Materialfluß und Logistik. Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer, Berlin u.a. 1989.
- Jünemann, R., Schmidt, T.: Materialflußsysteme. Systemtechnische Grundlagen. 2. Aufl., Springer, Berlin u.a. 2000.
- Jürgens, W.-W., Mohr, D., Pangert, R., Pernack, E.-F., Schultz, K., Steinberg, U.: Handlungsanleitung zur Beurteilung der Arbeitsbedingungen beim Heben und Tragen von Lasten (LASI-Veröffentlichungen Bd. 9). 4. Aufl., LASI (Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik), Potsdam 2001.
- Kestel, R.: Variantenvielfalt und Logistiksysteme. Ursachen, Auswirkungen, Lösungen. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden 1995.
- Kettner, H.: Neue Wege der Bestandsanalyse im Fertigungsbereich. Deutsche Gesellschaft für Betriebswirtschaft, Berlin 1976.
- Kettner, H., Schmidt, J., Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. Hanser, München, Wien 1984.
- Kiewitt, A.: 60 Prozent weniger Kosten. In: Logistik Heute. 33 (2011a) 10, S. 34.

- Kiewitt, A.: Weniger Stapler. In: Logistik Heute. 33 (2011b) 9, S. 38-39.
- Kilic, H. S., Durmusoglu, M. B., Baskak, M.: Classification and modeling for in-plant milk-run distribution systems. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 58 (2012). DOI: 10.1007/s00170-011-3875-4.
- Klepzig, H.-J.: Working-Capital und Cash Flow. Finanzströme durch Prozessmanagement optimieren 2. Aufl., Gabler, Wiesbaden 2010.
- Klevers, T.: Wertstrom-Mapping und Wertstrom-Design. Verschwendung erkennen - Wertschöpfung steigern. mi-Fachverlag, München 2007.
- Klug, F.: Gestaltungsprinzipien einer schlanken Logistik. In: ZfAW. Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft. 11 (2008) S. 56-61.
- Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Springer, Berlin, Heidelberg 2010.
- Klug, F.: Aktuelle Trends in der Automobillogistik. In: ZfAW. Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft. 14 (2011) 3, S. 60-68.
- Koether, R.: Technische Logistik. 3. Aufl., Hanser, München 2007.
- KonoId, P., Reger, H.: Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2. Aufl., Vieweg, Wiesbaden 2009.
- Korte, B., Vygen, J.: Kombinatorische Optimierung. Theorie und Algorithmen. 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2012.
- Kugler, M., Bierwirth, M., Schaub, K., Sinn-Behrendt, A., Feith, A., Ghezel-Ahmadi, K., Bruder, R.: Ergonomie in der Industrie – aber wie? Handlungshilfe für den schrittweisen Aufbau eines einfachen Ergonomiemanagements. Darmstadt 2010. Abrufbar im Internet. URL: http://www.kobra-projekt.de/system/files/page/KoBRA_Handlungshilfe_2010_druck.pdf, zuletzt besucht am 13.12.2012.
- Kuhn, E., Lange, V., Zimmermann, P.: Paletten-Management. Leitfaden für die Praxis. Verlag Heinrich Vogel, München 2005.
- Landau, K., Wimmer, R., Luczak, H., Mainzer, J., Peters, H., Winter, G.: Die Arbeit im Montagebetrieb. In: Landau, K., Luczak, H. (Hrsg.): Ergonomie und Organisation in der Montage. Hanser, München, Wien 2001, S. 1-82.
- LasthandhabV: Lastenhandhabungsverordnung vom 4. Dezember 1996 (BGBl. I S. 1842), die zuletzt durch Artikel 436 der Verordnung vom 31. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2407) geändert worden ist. Abrufbar im Internet. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/lasthandhabv/index.html>, zuletzt besucht am 13.12.2012.
- Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2008.

- Lodi, A., Martello, S., Monaci, M.: Two-dimensional packing problems. A survey. In: European Journal of Operational Research. 141 (2002) S. 241-252.
- Lotter, B.: Die Primär-Sekundär-Analyse. In: Lotter, B., Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2012a, S. 49-78.
- Lotter, B.: Einführung. In: Lotter, B., Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2012b, S. 1-8.
- Ludewig, J., Lichter, H.: Software-Engineering. Grundlagen, Menschen, Prozesse, Techniken. 2. Aufl., dpunkt.verlag, Heidelberg 2010.
- Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik. Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. 7. Aufl., Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2009.
- Martins, G. H. A., Dell, R. F.: Solving the pallet loading problem. In: European Journal of Operational Research. 184 (2008) S. 429-440.
- Meinhardt, I., Schmidt, T., Daferner, M.: Einsatzplanung von Routenzügen ohne Simulation planen. Grundlagen für eine analytische Berechnung. In: Hebezeuge Fördermittel. Fachzeitschrift für Technische Logistik. 50 (2011) 10, S. 512-515.
- Meißner, S., Günthner, W. A.: Lean Logistics. Ansatzpunkte der Gestaltung schlanker Logistiksysteme. In: ZWF. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 104 (2009) 4, S. 280-283.
- Mesenhöller, E.: Zeitdatenermittlung in indirekten Bereichen bei Einsatz von Workflow-Management-Systemen. Shaker, Aachen 2004.
- Monden, Y.: Toyota Production System. Practical Approach to Production Management. Industrial Engineering and Management Press, Norcross 1983.
- Monden, Y.: Toyota Production System. An Integrated Approach to Just-In-Time. 4. Aufl., Taylor & Francis, Boca Raton 2012.
- MTM (Deutsche MTM-Vereinigung e.V.): MTM-Logistik. Lehrgangsunterlage -A/AJ-. Teil II. Handbuch Standardvorgänge Logistik. Deutsche MTM-Vereinigung e.V., Hamburg 2010.
- Muckelberg, E.: "Kitting"-Verfahren ergänzt Kanban-Prinzip. Toyota Gabelstapler optimiert die Produktionslogistik. In: Logistik für Unternehmen. 20 (2006) 10, S. 51-53.
- Naito, H.: Handbuch für das Kanban-System. Techni-Transfra-Consult, Frankfurt/Main 1982.
- Narusawa, T., Shook, J.: Kaizen Express. Fundamentals for Your Lean Journey. Lean Enterprise Institute, Cambridge 2009.
- Neumann, K., Morlock, M.: Operations Research. 2. Aufl., Hanser, München, Wien 2002.
- Nickel, R.: Logistische Modelle für die Montage. PZH Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen 2008.

- Niebel, B. W., Freivalds, A.: *Methods, Standards, and Work Design*. 11. Aufl., McGraw-Hill, New York 2003.
- Nomura, J., Takakuwa, S.: *Optimization of a Number of Containers for Assembly Lines. The Fixed-Course Pick-Up System*. In: *International Journal of Simulation Modelling*. 5 (2006) 4, S. 155-166.
- Nyhuis, P., Wiendahl, H.-P.: *Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. 3. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2012.
- Nyhuis, P., Wiendahl, H.-P., Wagner, C.: *Materialbereitstellung in der Montage*. In: Lotter, B., Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*. 2. Aufl., Springer, Berlin 2012, S. 285-313.
- Nyhuis, P., Zoleko, F.: *Variantenbeherrschung in einer mobilen Montage*. In: *wt Werkstattstechnik online*. 97 (2007) 4, S. 244-248.
- Ohm, P.: *Integratives Zeitdatenmanagement. Konzept und EDV-Werkzeuge*. Praxiswissen, Dortmund 1998.
- Ohno, T.: *Das Toyota Produktionssystem*. 2. Aufl., Campus, Frankfurt/Main, New York 2009.
- Olbrich, R.: *Aufbau einer Zeitwirtschaft. Beschreibung der Vorgehensweise*. Bachem, Köln 1993.
- Pawellek, G.: *Produktionslogistik. Planung, Steuerung, Controlling*. Hanser, München 2007.
- Pawellek, G.: *Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung*. Springer, Berlin, Heidelberg 2008.
- Peter, K., Wieser, J., Jung, M.: *Einführung eines Low-Cost-FTS in der Cockpit-Vormontage*. In: *Logistik für Unternehmen*. 20 (2006) 10, S. 54-55.
- Petzelt, D. J.: *Konzept zur rechnerunterstützten Bestimmung von Sollzeiten in der Montageplanung (Industrial Engineering, Bd. 5)*. Shaker, Aachen 2010.
- Pfohl, H.-C.: *Logistikmanagement. Konzeption und Funktionen*. 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, New York 2004.
- Pfohl, H.-C.: *Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 8. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2010.
- Picker, C.: *Prospektive Zeitbestimmung für nicht wertschöpfende Montagetätigkeiten*. Dissertation, Technische Universität Dortmund. Dortmund 2006.
- Pieper, R.: *ArbSchR Arbeitsschutzrecht. Arbeitsschutzgesetz, Arbeitssicherheitsgesetz und andere Arbeitsschutzvorschriften*. 5. Aufl., Bund-Verlag, Frankfurt/Main 2012.
- Piontek, J.: *Bausteine des Logistikmanagements*. 2. Aufl., Verlag Neue Wirtschafts-Briefe, Herne 2007.
- Poll, D.: *Qualität und Produktivität dramatisch verbessert*. In: *Produktion*, Nr. 51/52 vom 20.12.2007, S. 24.

- REFA (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Steuerung, Teil 1. Hanser, München 1991a.
- REFA (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Steuerung, Teil 2. Hanser, München 1991b.
- REFA (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Datenermittlung. Hanser, München 1997.
- REFA (Hrsg.): Ausgewählte Methoden zur prozessorientierten Arbeitsorganisation. REFA-Sonderdruck Methodenteil. REFA Bundesverband e. V., Darmstadt 2002.
- Regber, H., Zimmermann, K.: Change-Management in der Produktion. Prozesse effizient verbessern im Team. 2. Aufl., mi-Fachverlag, Landsberg/Lech 2007.
- Reuter, C.: Logistikrelevante Lösungen auf der Basis von Lean-Management bei kleinen Losgrößen und hoher Variantenvielfalt. Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2009.
- Rohmert, W.: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft. 38 (1984) 4, S. 193-200.
- Röhrig, M.: Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionsendstufen. VDI-Verlag, Düsseldorf 2002.
- Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Dissertation, Universität Stuttgart. Stuttgart 2008.
- Rother, M.: Die Kata des Weltmarktführers. Toyotas Erfolgsmethoden. Campus, Frankfurt/Main, New York 2009.
- Rother, M., Harris, R.: Kontinuierliche Fließfertigung organisieren. Praxisleitfaden zur Einzelstück-Fließfertigung für Manager, Ingenieure und Meister in der Produktion. Lean Management Institut, Aachen 2004.
- Rücker, T., Schneider, H. M.: Das Production Authorization Card (PAC)-Konzept im simulationsbasierten Vergleich unterschiedlicher Konzepte zur Materialflusssteuerung. In: Corsten, H., Missbauer, H. (Hrsg.): Produktions- und Logistikmanagement. Festschrift für Günther Zäpfel zum 65. Geburtstag. Vahlen, München 2007, S. 209-236.
- Rupper, P.: Logistik. Eine neue Unternehmensdimension. In: Rupper, P. (Hrsg.): Unternehmenslogistik. Ein Handbuch für Einführung und Ausbau der Logistik in Unternehmen. 3. Aufl., Verlag Industrielle Organisation, Zürich 1991, S. 1-23.
- Sackermann, R.: Eine wissensbasierte Methode zur Zeitermittlung in der Einzel- und Kleinserienfertigung (Industrial Engineering, Bd. 2). Shaker, Aachen 2009.
- Saile, P., Mazura, A.: Transport von Großladungsträgern mit neuem Schleppersystem. In: Logistik für Unternehmen. 22 (2008) 1/2, S. 63-65.
- Saile, P., Wunderlich, R.: Flexibel einsetzbar. In: Logistik Heute. 30 (2008) 4, S. 50-51.

- Satoglu, S. I., Sahin, I. E.: Design of a just-in-time periodic material supply system for the assembly lines and an application in electronics industry. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 60 (2012). DOI: 10.1007/s00170-012-4171-7.
- Savelsbergh, M. W. P., Goetschalckx, M.: A Comparison of the Efficiency of Fixed versus Variable Vehicle Routes. In: *Journal of Business Logistics*. 16 (1995) 1, S. 163-187.
- Schaub, K., Haaß, P., Bierwirth, M., Kugler, M., Steinberg, U., Kaltbeitzel, J., Toledo Muñoz, B., Bruder, R.: Das Multiple-Lasten-Tool. Integrierte Bewertung unterschiedlicher Arten manueller Lastenhandhabung. In: *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA) (Hrsg.): Mensch- und prozessorientierte Arbeitsgestaltung im Fahrzeugbau. GfA Herbstkonferenz in Wolfsburg am 23.-24.09.2010. GfA Press, Dortmund 2010, S. 123-132.*
- Schaub, K., Steinberg, U., Bierwirth, M., Kugler, M., Bruder, R.: MultiPLa. A tool for the combined overall estimation of various types of manual handling tasks. In: *Work*. 41 (2012) S. 4433-4435.
- Schedlbauer, M. J.: Adaptive Logistikplanung auf Basis eines standardisierten, prozessorientierten Bausteinkonzepts. Dissertation, Technische Universität München. München 2008.
- Schedlbauer, M. J., Tenerowicz, P.: Fabrik von morgen. In: *Logistik Heute*. 29 (2007) 9, S. 50-51.
- Scheithauer, G.: Zuschnitt- und Packungsoptimierung. Problemstellungen, Modellierungstechniken, Lösungsmethoden. Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2008.
- Schenk, M., Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik. Springer, Berlin, Heidelberg 2004.
- Schlick, C. M., Bruder, R., Luczak, H.: *Arbeitswissenschaft*. 3. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2010.
- Schmidt, T., Meinhardt, I.: Berechnen statt simulieren. In: *Logistik Heute*. 34 (2012) 1-2, S. 30-31.
- Schneider, M.: Logistikplanung in der Automobilindustrie. Konzeption eines Instruments zur Unterstützung der taktischen Logistikplanung vor „Start-of-Production“ im Rahmen der Digitalen Fabrik. Gabler, Wiesbaden 2008.
- Schonberger, R. J.: Applications of Single-Card and Dual-Card Kanban. In: *Interfaces*. 13 (1983) 4, S. 56-67.
- Schönsleben, P.: *Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend*. 6. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2011.
- Schuh, G.: *Change Management. Prozesse strategiekonform gestalten*. Springer, Berlin u.a. 2006.
- Schuh, G., Lassen, S.: Funktionen. In: Schuh, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 3. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2006, S. 195-292.

- Schweizer, M.: Magnum-Behälter machen schlank. Automobilzulieferer BorgWarner setzt auf faltbare Großladungsträger. In: *Industrieanzeiger*. 133 (2011) 8, S. 54-55.
- Seeck, S.: Erfolgsfaktor Logistik. Klassische Fehler erkennen und vermeiden. Gabler, Wiesbaden 2010.
- Simons, B.: Das Multimoment-Zeitmeßverfahren. Grundlagen und Anwendung. TÜV Rheinland Köln 1987.
- Smalley, A.: Produktionssysteme glätten. Anleitung zur Lean Production nach dem Pu li-Prinzip - angepasst an die Kundennachfrage. Lean Management Institut, Aachen 2005.
- Sommer, T., Marrenbach, D., Wehking, K.-H.: Planung intralogistischer Systeme. Vorgehensmodelle und Formalisierung des Planungswissens. In: *Industrie Management*. 25 (2009) 5, S. 57-60.
- Spathelf, C.: Künftige Aufgaben der Intralogistik im Lieferverbund eines Fahrzeugherstellers. In: Arnold, D. (Hrsg.): *Intralogistik. Potentiale, Perspektiven, Prognosen*. Springer, Berlin, Heidelberg 2006, S. 81-90.
- Spear, S.: *The Toyota Production System. An Example of Managing Complex Social/Technical Systems*. Dissertation, Harvard University. Cambridge 1999.
- Specht, D., Höltz, N.: Schlanke Logistik. Adaption der Lean Production-Methodik auf die Logistik. In: *ZWF. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*. 106 (2011) 1-2, S. 69-74.
- Steinberg, U.: Lastenhandhabungsverordnung. In: Landau, K. (Hrsg.): *Lexikon Arbeitsgestaltung. Best Practice im Arbeitsprozess*. Gentner, Stuttgart 2007, S. 774-775.
- Steinberg, U., Windberg, H.-J.: Leitfaden Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten. Empfehlungen für den Praktiker (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Bd. S 43). 2. Aufl., Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1998.
- Stolz, N. W.: *Materialbereitstellung in der Montage*. Dissertation, RWTH Aachen. Aachen 1988.
- Suhl, L., Mellouli, T.: *Optimierungssysteme. Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen*. 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2009.
- Suzaki, K.: *Modernes Management im Produktionsbetrieb. Strategien, Techniken, Fallbeispiele*. Hanser, München, Wien 1989.
- Syska, A.: *Produktionsmanagement. Das A - Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. Gabler, Wiesbaden 2006.
- Takakuwa, S., Nomura, J.: Optimization and Analysis of Mizusumashi Systems as Just-in-time Manufacturing. In: Katalinic, B. (Hrsg.): *Annals of DAAAM for 2003 & Proceedings of the 14th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation. Focus on*

- Reconstruction and Development". 22-25th October 2003, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina
DAAAM International, Wien 2003, S. 461-462.
- Takeda, H.: Das System der Mixed Production. Personal-Order-Prinzip für kundenorientierte
Produktion. 2. Aufl., FinanzBuch Verlag, München 2008.
- Takeda, H.: Das synchrone Produktionssystem. Just-in-time für das ganze Unternehmen. 6. Aufl.,
mi-Wirtschaftsbuch, München 2009.
- ten Hompel, M., Sadowsky, V., Beck, M.: Kommissionierung. Materialflusssysteme 2 – Planung
und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik. Springer, Berlin, Heidelberg 2011.
- ten Hompel, M., Schmidt, T., Nagel, L.: Materialflusssysteme. Förder- und Lagertechnik. 3. Aufl.,
Springer, Berlin, Heidelberg 2007.
- Tschich, H.: Entwicklung eines durchgängigen Modells für Zeitdaten mit anwendungsorientierter
Genauigkeit. Praxiswissen, Dortmund 2000.
- Vaidyanathan, B. S., Matson, J. O., Miller, D. M., Matson, J. E.: A capacitated vehicle routing
problem for just-in-time delivery. In: IIE Transactions. 31 (1999) 11, S. 1083-1092.
- VDA 4500: Kleinladungsträger (KLT)-System. o.V., Frankfurt/Main 2006.
- VDA 5007: Leitfaden zum Behältermanagement. o.V., Frankfurt/Main 2006.
- Vojdani, N., Lootz, F., Kirwitzke, D.: Lean Logistics. Innovative Bewertungsmethodik zur
Auswahl schlanker Materialbereitstellungsstrategien. In: Logistics Journal. Proceedings. 6
(2010) o.H., S. 1-10.
- Wannenwetsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft und Logistik. Beschaffung, Logistik,
Materialwirtschaft und Produktion. 4. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg 2010.
- Wänström, C., Medbo, L.: The impact of materials feeding design on assembly process
performance. In: Journal of Manufacturing Technology Management. 20 (2009) 1, S. 30-51.
- Wäscher, G., Haußner, H., Schumann, M.: An improved typology of cutting and packing problems.
In: European Journal of Operational Research. 183 (2007) S. 1109-1130.
- Werner, H.: Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. 3.
Aufl., Gabler, Wiesbaden 2008.
- Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Springer, Berlin, Heidelberg 2006.
- Wiendahl, H.-P., Thies, J. M., Krüger, T.: Endstufenbildung zur Optimierung der
Materialbereitstellung. In: ZWF. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. 92 (1997) 12,
S. 628-630.
- Wildemann, H.: Logistik Prozeßmanagement. 4. Aufl., TCW Transfer-Centrum, München 2009.
- Wildemann, H., Faust, P.: Partnerschaft nach Konzept. In: Logistik Heute. 26 (2004) 10, S. 36-37.
- Yagy, S.: Das synchrone Managementsystem. Wegweiser zur Neugestaltung der Produktion auf
Grundlage des synchronen Produktionssystems. mi-Fachverlag, Landsberg/Lech 2007.

Anhang

Merkmal		Ausprägung			
Bereitstellungselement					
Bereitstellungsstufe	Zwischen Lager und Arbeitsplatz	Zwischen Lager und Supermarkt	Zwischen Supermarkt und Arbeitsplatz	Zwischen Arbeitsplatz und Fertigwarenlager	
Bereitstellungsgut	Baugruppen / Bauteile		Werkzeuge und Vorrichtungen	Fertigwaren	
Ladungsträger					
Art der Ladungsträger	Kleinladungsträger		Großladungsträger	Keine Ladungsträger	
Steuerung					
Auslösungsart	Fester Zeitpunkt (bei variabler Menge)		Feste Menge (bei variablem Zeitpunkt)	Feste Menge, fester Zeitpunkt (bei variablen Rückläufen)	
Signalart	Verbrauchsorientiert		Bedarfsorientiert	Hybrid	
Kommissionierung					
Art der Kommissionierung	Gekoppelt			Entkoppelt	
Art der Entnahme	Manuell aus Regal (Fachboden / Durchlauf)		Manuell von Großgebände (Bodenlagerung)	Mit Transportmittel (Anhänger / Bodenroller)	
Zusatz Tätigkeiten	Materialbuchung (Werkstattbestand)	Entfernung von Ladungssicherung	Entfernung von Verpackungsmaterial	Keine Zusatz Tätigkeiten	
Transport					
Art des Transports	Stapler	Schleppzug	Niederhubwagen	Handgeführter Transportwagen	FTS
Quelle/Senke-Beziehung	1 : 1		1 : n		m : n
Routenführung	Statisch			Dynamisch	
Abgabe					
Art der Feinverteilung	Gekoppelt			Entkoppelt	
Art der Materialanstellung	Manuell in Regal / Zuführung (Fachboden / Durchlauf)			Mit Transportmittel (Anhänger / Bodenroller)	
Art der Leergutrückführung	Zu Leergutsammelstelle			Zur Wiederbefüllung mit Material	

Ausprägung Berücksichtigung im Modell
 Ausprägung Keine Berücksichtigung im Modell
 —●— Ausprägung des Fallbeispiels

Abbildung 41: Ausgeprägte Morphologie zur Eingrenzung des Betrachtungsgegenstands

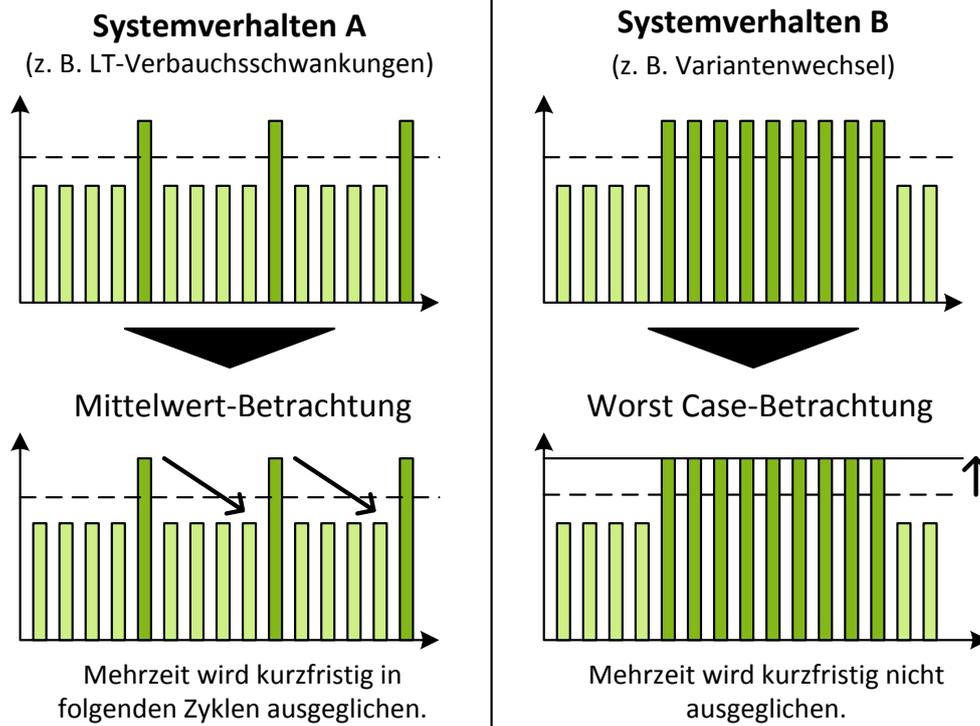


Abbildung 42: Mittelwert- und Worst Case-Betrachtung im Vergleich

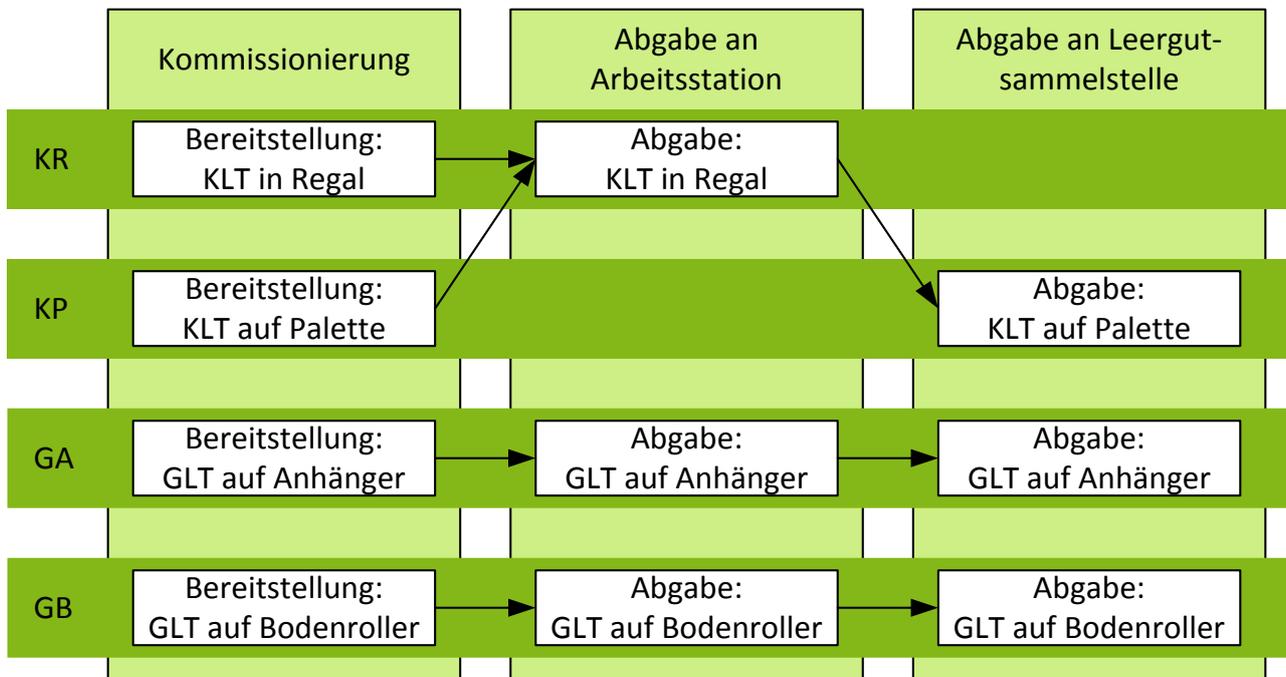


Abbildung 43: Determinierte Prozessfolge durch Art der Entnahme

Bewegungslänge in cm	≤ 20	> 20 bis ≤ 50	> 50 bis ≤ 80
Entfernungsbereich	1	2	3

Bewegungslänge in cm	≤ 20	> 20 bis ≤ 50	> 50 bis ≤ 80
Entfernungsbereich	1	2	3

Aufnehmen und Platzieren		Kode	1	2	3	
			TMU			
≤ 1 kg	leicht	ungefähr	AA	20	35	50
		lose	AB	30	45	60
		eng	AC	40	55	70
	schwierig	ungefähr	AD	20	45	60
		lose	AE	30	55	70
		eng	AF	40	65	80
	Hand voll	ungefähr	AG	40	65	80
	> 1 kg bis	ungefähr	AH	25	45	55
		lose	AJ	40	65	75
≤ 8 kg	eng	AK	50	75	85	
> 8 kg bis	ungefähr	AL	80	105	115	
	lose	AM	95	120	130	
≤ 22 kg	eng	AN	120	145	160	

Platzieren		Kode	1	2	3
			TMU		
	ungefähr	PA	10	20	25
	lose	PB	20	30	35
	eng	PC	30	40	45

Hilfsmittel handhaben		Kode	1	2	3
			TMU		
	ungefähr	HA	25	45	65
	lose	HB	40	60	75
	eng	HC	50	70	85

Betätigen		Kode	1	2	3
	einfach	BA	10	25	40
	zusammengesetzt	BB	30	45	60

Bewegungszyklen		Kode	1	2	3
	eine Bewegung	ZA	5	15	20
	Bewegungsfolge	ZB	10	30	40
	Umsetzen und eine Bewegung	ZC	30	45	55
Festmachen oder Lösen		ZD	20		

Körperbewegungen		Kode	TMU
	Gehen / m	KA	25
	Beugen, Bücken, Knien (incl. Aufrichten)	KB	60
	Setzen und Aufstehen	KC	110

Visuelle Kontrolle		Kode	TMU
		VA	15

Abbildung 44: Datenkarte der MTM UAS-Grundvorgänge
(vgl. Bokranz, Landau 2012a, S. 483)

		MTM-Institut Eichenallee 11, D-15738 Zeuthen Telefon: +49 33 762 / 20 66 31 Telefax: +49 33 762 / 20 66 40 E-mail: institut@dmtn.com		SVL Standardvorgänge Logistik	
		Der Gebrauch dieser Tabellenwerte führt ohne gründliche Ausbildung in UAS und Standardvorgängen Logistik zu falschen Ergebnissen			
Elektroschlepper			4LT	TMU	
	Fahren	Intern	Mit Hänger pro m	EFIM	13
			Ohne Hänger pro m	EFIO	10
		Außenbereich	Mit Hänger pro m	EFAM	13
			Ohne Hänger pro m	EFAO	7
		Kurve 90°	Mit Hänger	EFKM	92
			Ohne Hänger	EFKO	38
	Verzögerung (Start und Stopp)	Mit Hänger	EFVM	56	
		Ohne Hänger	EFVO	30	
	Ankuppeln	Mit Hänger ausrichten		EANM	368
		Ohne Hänger ausrichten		EANO	258
Abkuppeln	Mit Hänger ausrichten		EABM	285	
	Ohne Hänger ausrichten		EABO	182	
Zuschlag	Weg, zusätzlicher Hänger		EAZZ	200	
Handgabelhubwagen			4LT	TMU	
	Fahren	Fahren pro Meter	≤ 500 kg	HFFA	30
			> 500 kg	HFFB	35
		Kurve 90°	≤ 500 kg	HFKA	15
			> 500 kg	HFKB	19
		Verzögerung (Start und Stopp)	≤ 500 kg	HFVA	80
			> 500 kg	HFVB	150
	Transportgut aufnehmen	mit Ausrichten	≤ 500 kg	HAMA	520
			> 500 kg	HAMB	615
		ohne Ausrichten	≤ 500 kg	HAOA	350
			> 500 kg	HAOB	415
	Transportgut platzieren	mit Ausrichten	≤ 500 kg	HPMA	295
			> 500 kg	HPMB	310
		ohne Ausrichten	≤ 500 kg	HPOA	125
			> 500 kg	HPOB	130
zusätzliches Ausrichten		≤ 500 kg	HRZA	125	
		> 500 kg	HRZB	190	
Transportwagen			4LT	TMU	
	Fahren pro Meter	≤ 50 kg	WFA	25	
		≤ 100 kg	WFB	28	
		≤ 200 kg	WFC	30	
		> 200 kg	WFD	35	
	Kurve 90°	≤ 50 kg	WKA	15	
		≤ 100 kg	WKB	11	
		≤ 200 kg	WKC	8	
		> 200 kg	WKD	8	
	Verzögerung (Start und Stopp)	≤ 50 kg	WVA	35	
		≤ 100 kg	WVB	45	
		≤ 200 kg	WVC	80	
		> 200 kg	WVD	105	
	zusätzliches Ausrichten	≤ 50 kg	WRA	80	
		≤ 100 kg	WRB	105	
≤ 200 kg		WRC	160		
> 200 kg		WRD	215		
A/AJ © MTM-Institut Urheberrechtlich geschützt! - Nachdruck verboten!					

Abbildung 45: Datenkarte der MTM Standardvorgänge Logistik (MTM 2010)

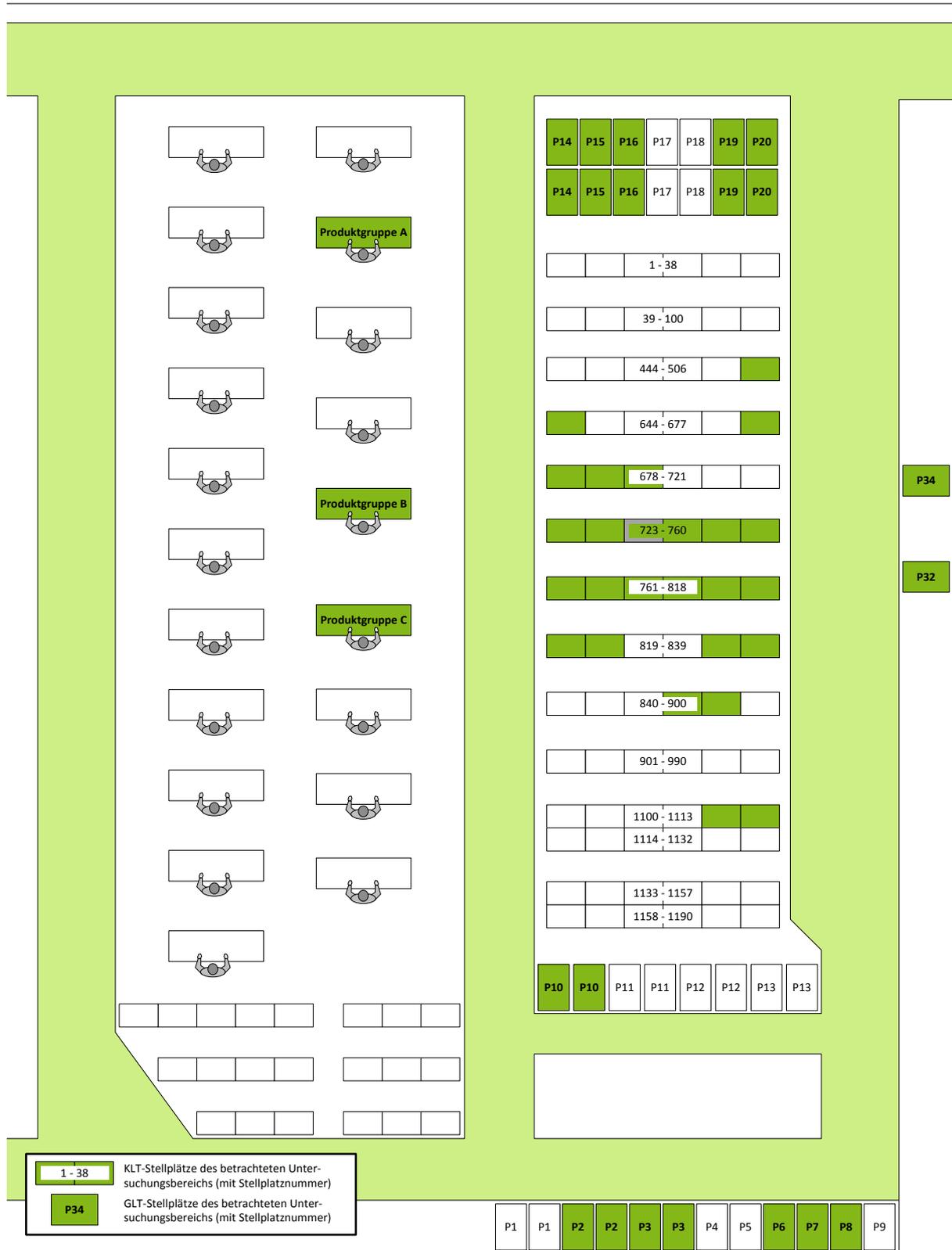


Abbildung 46: Groblayout des betrachteten Untersuchungsbereichs

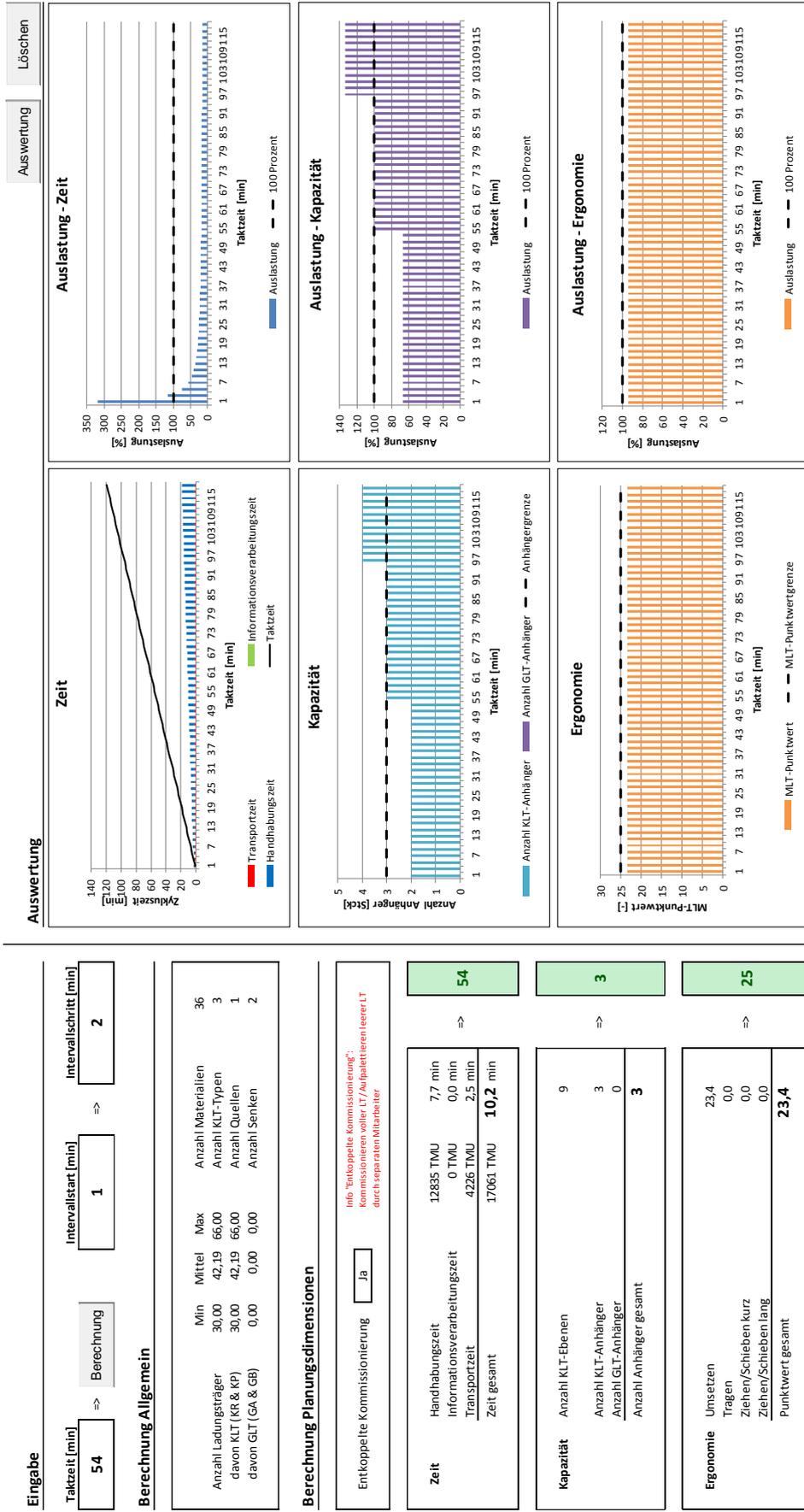


Abbildung 47: Tabellenblatt Ergebnis der Auftragskombination 6