

IGF-Forschungsvorhaben 19185 N/1

Forschungsthema

Entwicklung einer Planungssystematik für die standardisierte Materialbereitstellung in der komplexen, variantenreichen Großgerätemontage mit geringen Stückzahlen (SySMaG)

Durchführende Forschungsstelle

Technische Universität Dortmund

Institut für Produktionssysteme

Leonhard-Euler-Straße 5

44227 Dortmund

Leiter der Forschungsstelle

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

Projektleiter

Thomas Henke, M. Sc.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19185 N/1 der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V. - GVB, Wiesenweg 2, 93352 Rohr wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Buchbeiträge/Dissertationen/Internet

Henke, T.; Deuse, J.: Arbeitsfortschrittssynchrone Materialbereitstellung in der Großgerätemontage. Konzept zur Optimierung der Logistikleistung in der Einzel- und Kleinserienfertigung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114 (2019) 5, S. 243-246.

Henke, T.; Weisner, K.; Schulte, L.; Deuse, J.: Einzel- und Kleinserienfertigung von Großgeräten. Optimierung der Materialbereitstellung durch (un)überwachtes Lernen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) 12, S. 873-876.

Vorträge

Henke, T.:

SySMag – Verbesserung der Liefertermintreue durch die Optimierung der Materialbereitstellung Sondermaschinenbau. Vortrag auf dem dritten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) zum IGF-Forschungsvorhaben an der Technischen Universität Dortmund am 28.06.2019.

Henke, T.:

SySMag – Effiziente Materialbereitstellung in der Großgerätemontage. Vortrag auf dem zweiten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) zum IGF-Forschungsvorhaben an der Technischen Universität Dortmund am 22.11.2018.

Henke, T.:

SySMag – Standardisierte Materialbereitstellung in der variantenreichen Großgerätemontage. Vortrag auf dem ersten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) zum IGF-Forschungsvorhaben an der Technischen Universität Dortmund am 13.07.2017.

Posterausstellungen

Posterausstellung auf der Industrial Data Science Conference 2019 in der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAUA) am 13.03.2019.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Vorhabenbeschreibung und Arbeitspakete.....	3
2 Grundlagen der Großgerätemontage und Materialbereitstellung.....	6
2.1 Die Großgerätemontage	6
2.2 Eignung bestehender Materialbereitstellungsmethoden für die Baustellenmontage der Großgerätemontage	9
3 Anforderungsdefinition	12
4 Planungssystematik zur standardisierten Materialbereitstellung.....	16
4.1 Adaption bestehender Materialbereitstellungsmethoden	16
4.2 Erzeugung der Datenbasis	18
4.3 Anwendungsrahmen der standardisierten Materialbereitstellung	23
4.4 Verfahrensauswahl zur Anordnung des Materials im Rahmen der Layoutplanung	27
Der SP-MBS Algorithmus.....	33
4.5 Operatives Steuerungskonzept für die Materialbereitstellung	34
4.5.1 Strategie 1 - Einzelkommissionierung des Gesamtauftrags.....	34
4.5.2 Strategie 2 - Materialbereitstellung bei restriktivem Flächenangebot	35
4.5.3 Strategie 3 - Reichweitenbasierte Materialbereitstellung	35
4.5.4 Strategie 4 - Baugruppenweise Bereitstellung	36
4.6 Ableitung standardisierter Tätigkeitsbeschreibungen für die Materialbereitstellung	38
5 Validierung der Planungssystematik	41
5.1 Überführung der Planungssystematik in IT-Demonstrator	41
5.2 Dokumentation des Ist Zustands	42
5.3 Anwendung der entwickelten Planungssystematik	46
5.3.1 Erzeugung der Planungsdatenbasis.....	46
5.3.2 Anwendung des SP-MBS Algorithmus	47

5.3.3 Standardisierte Tätigkeitsbeschreibungen.....	47
5.4 Bewertung der Planungssystematik.....	48
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	52
7 Literatur.....	54

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 3.1: Hauptziele in der Großgerätemontage</i>	12
<i>Abbildung 3.2: Herausforderungen in der Großgerätemontage</i>	12
<i>Abbildung 4.1: Aufbau der Planungssystematik zur standardisierten Materialbereitstellung</i>	16
<i>Abbildung 4.2: Berechnung der Gesamtähnlichkeit mit Hilfe von Ähnlichkeitsmatrizen</i>	23
<i>Abbildung 4.3: Planungssystematik zur standardisierten Materialbereitstellung</i>	24
<i>Abbildung 4.4: Beispiellayouts</i>	24
<i>Abbildung 4.5: In der Planungssystematik berücksichtigte Materialbereitstellungsstrategien</i>	25
<i>Abbildung 4.6: Schaubild zur Beschreibung der Fläche und der Elemente</i>	27
<i>Abbildung 4.7: Ablaufdiagramm der Next Fit Heuristik (i. A. a. Coffman und Shor 1990, S. 810)</i> ..	28
<i>Abbildung 4.8: Ablaufdiagramm der First Fit Heuristik (i. A. a. Coffman und Shor 1990, S. 810)</i> .	29
<i>Abbildung 4.9: Ablaufdiagramm der Best Fit Heuristik (i. A. a. Coffman und Shor 1990, S. 810)</i> ..	30
<i>Abbildung 4.10: Beispielergebnisse bei Anwendung der verschiedenen Levelverfahren</i>	30
<i>Abbildung 4.11: Ablaufdiagramm des SC Algorithmus (Ortmann et al. 2010, S. 309)</i>	31
<i>Abbildung 4.12: Ablaufdiagramm des SL₅-Algorithmus (i. A. a. Ortmann 2010, S. 65)</i>	32
<i>Abbildung 4.13: Beispielhafte Blockbildung im Rahmen des SL₅-Algorithmus</i>	32
<i>Abbildung 4.14: Ablaufdiagramm des SP-MBS Algorithmus</i>	33
<i>Abbildung 4.15: Strategie 1 - Einzelkommissionierung des Gesamtauftrags</i>	34
<i>Abbildung 4.16: Strategie 2 - Materialbereitstellung bei restriktivem Flächenangebot</i>	35
<i>Abbildung 4.17: Strategie 3 - Reichweitenbasierte Materialbereitstellung</i>	35
<i>Abbildung 4.18: Strategie 4 - Just in Time Materialbereitstellung</i>	36
<i>Abbildung 4.19: Konzept des Flächenkanbans</i>	37
<i>Abbildung 4.20: Referenzmaterialbereitstellungsprozess für die Großgerätemontage</i>	38
<i>Abbildung 4.21: Standardarbeitsblatt für die Materialbereitstellung</i>	40
<i>Abbildung 5.1: Programmierumgebungen der IT-Demonstratoren</i>	41
<i>Abbildung 5.2: Im Validierungsbeispiel angewendete Materialbereitstellungsstrategie</i>	42

<i>Abbildung 5.3: Montagevorranggraph des Validierungsobjekts</i>	44
<i>Abbildung 5.4: Wertschöpfungsanteil im Ist Zustand</i>	45
<i>Abbildung 5.5: Zusammensetzung der Durchlaufzeit in der Montage</i>	45
<i>Abbildung 5.6: Ist Zustand der Materialanordnung</i>	46
<i>Abbildung 5.7: Materialanordnung nach Anwendung des SP-MBS Algorithmus</i>	47
<i>Abbildung 5.10: Ausschnitt des erzeugten Tätigkeitsplans für den Logistikmitarbeiter</i>	48
<i>Abbildung 5.8: Zusammensetzung der Durchlaufzeit in der Montage</i>	49
<i>Abbildung 5.9: Wertschöpfungsanteil nach Anwendung der entwickelten Planungssystematik</i>	49
<i>Abbildung 5.11: Vergleich des Ist Zustands mit dem optimierten Zustand</i>	50

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1.1: Arbeitspakete des Forschungsvorhabens SySMaG</i>	<i>3</i>
<i>Tabelle 2.1: Bewertung etablierter MBS-Methoden</i>	<i>9</i>
<i>Tabelle 3.1: Ergebnis der Analysephasen zur Anforderungs- und Zielgrößendefinition</i>	<i>15</i>
<i>Tabelle 4.1 Einordnung der Skalenniveaus und Merkmale</i>	<i>19</i>
<i>Tabelle 4.2: Kontingenztabelle (Backhaus et al. 2016, S. 460)</i>	<i>20</i>
<i>Tabelle 4.3: Spezifizierte Tätigkeiten des Referenzmaterialbereitstellungsprozesses</i>	<i>39</i>
<i>Tabelle 5.1: Montageinformationen des Validierungsprodukts</i>	<i>43</i>
<i>Tabelle 5.2: Zeitbedarf in der Montage (Ist Aufnahme)</i>	<i>45</i>
<i>Tabelle 5.3: Zeitbedarf in der Montage nach Anwendung des SP-MBS Algorithmus</i>	<i>48</i>
<i>Tabelle 5.4: Durch Anwendung der Planungssystematik erreichte Optimierung</i>	<i>50</i>

1 Einleitung

Eine zunehmende Herausforderung für Unternehmen im globalen Wettbewerb ist die Verlagerung von Unternehmenseinheiten in das oftmals kostengünstigere Ausland (Huwart und Verdier 2009, S. 100). Der Ursprung dieses zunehmenden Standortwettbewerbs, der vor allem durch das Steuer-, Arbeitskosten- und Bildungsniveau vorangetrieben wird, ist der stetig fortschreitende Globalisierungsprozess. Auf der einen Seite können Produkte weltweit hergestellt und gehandelt werden, auf der anderen Seite wird die Konkurrenzsituation und die Komplexität der Märkte durch das zunehmende Absatzpotenzial deutlich verschärft (Haasis 2008, S. 11). Auch der deutsche Maschinen- und Anlagenbau, der als einer der wichtigsten Industriezweige in Deutschland mit ca. 7800 Unternehmen und 1,35 Millionen Erwerbstätigen der größte industrielle Arbeitgeber ist, wird mit dieser Entwicklung konfrontiert (VDMA 2018, S. 24).

Zwar ist Deutschland im Maschinenexport mit einem Anteil von 15,4% aktuell Weltmarktführer, angesichts der Wachstumsimpulse aus China und den USA, deren Exportanteile im Jahr 2017 bereits 13,3% und 11,4% betragen, ist diese Position langfristig jedoch gefährdet. Um die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber der globalen Konkurrenz im Hochlohnland Deutschland auch langfristig sicherzustellen, sind die Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus gezwungen, die Effizienz in der gesamten Wertschöpfungskette zu erhöhen und ihre Ressourcen effizient zu nutzen. Da die zunehmende Marktmacht des Kunden in einer erhöhten Nachfrage nach individuellen Produkten resultiert, müssen die Unternehmen zur Sicherung ihrer Marktposition die Anzahl und Heterogenität angebotener Produktvarianten in immer kürzer werdenden Zyklen erhöhen. Eine „Explosion an Varianten- und Modellvielfalt“ ist die Folge. (Industrie Anzeiger 2018, S. 14; VDMA 2018, S. 24)

Eine besondere Herausforderung stellen diese Entwicklungen für die Produktion von Großgeräten dar, die durch große Abmessungen, eine komplexe Produktstruktur und ein hohes Produktgewicht charakterisiert sind. Zudem weisen Großgeräte i. d. R. einen Unikatcharakter auf, sodass die Aufträge durch eine geringe Wiederholhäufigkeit gekennzeichnet sind. Da diese Eigenschaften eine Automatisierung der Prozesse verhindern, ist die Großgerätemontage durch einen hohen Anteil manueller Prozesse geprägt, sodass die Arbeitsproduktivität in direktem Zusammenhang mit der Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit steht. Ein hohes Optimierungspotenzial weist die Materialbereitstellung auf, die die Produktivität der Montage maßgeblich beeinflusst. Weiterhin stellt die Materialbereitstellung als Bestandteil der Produktionslogistik nach Ohno (2009, S. 51ff.) Verschwendung dar, sodass eine Optimierung der Materialbereitstellungsprozesse weitere Potenziale zur Erhöhung der Arbeitsproduktivität birgt. (Henke und Deuse 2019, S. 243ff.)

Letztgenanntes fällt bei großvolumigen Bauteilen wie einem Rahmen für Sonderfahrzeuge, die z. T. nur durch entsprechende Kräne, spezialisierter Lastaufnahmemittel und den Einsatz von mehreren Mitarbeitern bewegt werden können, besonders stark ins Gewicht. Zudem ist der MBS-Prozess i. d. R. geprägt von geringer Standardisierung, Auftragsvergabe auf Zuruf, erfahrungsbasierter Arbeitsausführung sowie dezentraler, individueller Aufgabenpriorisierung. Dies äußert sich in einem hohen Steuerungs- und Abstimmungsaufwand. Weiterhin verursachen kurzfristige Umplanungen, die in der E&K-Fertigung z. T. aus unterschiedlichen Gründen erforderlich sind, insb. in der Großgerätemontage einen hohen zeitlichen und personellen Aufwand. (Henke und Deuse 2019, S. 243f.; Henke et al. 2017, S. 873f.)

Eine detaillierte Planung und Standardisierung der MBS reduziert ihren Ausführungsaufwand, da bspw. Verschwendungen durch die Wahl angepasster MBS-Arten eliminiert werden. So verringert eine sukzessive Bereitstellung der Komponenten auf Basis einer dynamischen Belegungsplanung sowohl die Durchlaufzeit der Montage als auch den Flächenbedarf und somit Laufwege. Weiterhin unterstützt eine übersichtliche und montagegerechte MBS einen schnellen Komponentenzugriff durch den Montagemitarbeiter. (Henke und Deuse 2019, S. 873f.)

Das „Dilemma der Montageplanung und -steuerung“ lässt sich auf den Bereich der MBS-Planung übertragen. Eine geringe Wiederholhäufigkeit bei gleichzeitig hoher Komplexität der Planungsaufgabe bedingt einen hohen zeitlichen und personellen Aufwand, der zudem durch eine oftmals geringe Planungsdatenbasis steigt und insgesamt zu keinem positiven Aufwand-Nutzen-Verhältnis führt. Insbesondere in KMU fehlt es meist an spezialisierten (Stab-)Stellen für die Ausführung der Planungstätigkeiten. Eine Unterstützung durch entsprechende IT-basierte Planungswerkzeuge verursacht i. d. R. hohe Investitionskosten und ist auf belastbare Eingangsdaten angewiesen, sodass diese Werkzeuge im betrachteten Forschungsumfeld nicht weit verbreitet sind. Der Trend zur Entwicklung immer größerer, komplexerer Produkte ist durch einschlägige Veröffentlichungen belegt, obschon es bislang an einer einheitlichen Abgrenzung mangelt. Grundsätzlich sind zur Kategorisierung eines Produkts als Großgerät die Abmessungen, ausgewählte Produktionsparameter wie bspw. der Bedarf, der Verlauf der Produktionskosten und das Montageprinzip heranzuziehen. Für den Betrachtungsgegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens besteht ein komplexes Großgerät aus einer hohen Anzahl heterogener Komponenten mit einem Gesamtgewicht > 1.000 kg. Zudem ist der Betrachtungsgegenstand geprägt durch eine komplexe Materialflussstruktur, Prozesse mit starken Abhängigkeiten und Wechselwirkungen sowie einer hohen Dynamik. (Behrens et al. 2014, S. 153f.; Reuter et al. 2014, S. 718ff.)

Um in der Einzel- und Kleinserienfertigung (E&K-Fertigung) von komplexen Großgeräten die Vorteile einer schlanken Montage vermehrt nutzen zu können, ist eine Systematik zur ressourcenschonenden Planung und Ausführung der MBS im o. g. Kontext erforderlich. Da die Umsetzung der MBS-

Planung i. d. R. mit Änderungen und Ablaufstörungen verbunden ist, ist die Synchronisierung von MBS und Montage ein wesentliches Erfolgskriterium und soll bei der Auswahl der MBS-Arten, der Erzeugung von MBS-Layouts und der Umsetzung Standardisierter Arbeit in der MBS nicht unberücksichtigt bleiben. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer Systematik zur Planung und Ausführung einer Standardisierten MBS, die mit einer geringen Datenbasis im Hinblick auf die gegebene Variabilität hinreichend genaue und gleichzeitig robuste Ergebnisse generiert. Je nach Granularität der Eingangsdaten kann der Detaillierungsgrad der Planung angepasst werden. Zur kontinuierlichen Reduzierung des Planungsaufwands soll die Systematik wiederkehrende Strukturen nach dem Ähnlichkeitsprinzip in der Gestaltung von MBS-Art, -Layout oder -Prozessen erkennen und strukturiert ablegen. Auf dieser Basis werden dem Planer bei einer Neuplanung adaptierbare Lösungen vorgeschlagen, wodurch die erforderliche Planungsdauer und der manuelle Aufwand reduziert werden. Trotz Vorliegen einer hohen Komplexität soll die Identifizierung sich wiederholender Muster unter Anwendung des Ähnlichkeitsprinzips ermöglicht werden, um Standards im Betrachtungsbereich der Großgerätemontage auch bei E&K-Fertigung zu schaffen.

Der entscheidende Wettbewerbsfaktor ist dabei die Liefertermintreue, die wesentlich von der Montage abhängt, deren Anteil an der Gesamtauftragszeit je nach Branche bis zu 70% beträgt. Auch der Logistik kommt eine Schlüsselrolle zu, da sie eine Querschnittsfunktion besitzt und Einfluss auf den gesamten Wertschöpfungsprozess hat. Dabei weist sie „ein großes Potenzial zur Kostensenkung und Effizienzsteigerung“ auf und stellt einen „entscheidenden Erfolgsfaktor für moderne produzierende Unternehmen“ dar. Effiziente Montage- und Logistikprozesse sind demnach eine Grundvoraussetzung zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit im Sondermaschinenbau. (Henke und Deuse 2019, S. 243f.)

1.1 Vorhabenbeschreibung und Arbeitspakete

Das Ziel des Forschungsvorhabens SySMaG war die Entwicklung einer Planungssystematik für die standardisierte Materialbereitstellung in der komplexen, variantenreichen Großgerätemontage mit geringen Stückzahlen. Dazu gliederte sich das Forschungsvorhaben in sechs aufeinander aufbauende Arbeitspakete (s. Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Arbeitspakete des Forschungsvorhabens SySMaG

Arbeitspaket	Menschmonate
--------------	--------------

1	Anforderungsanalyse an Materialbereitstellungskonzepte und Definition von Zielgrößen	2
2	Abgleich etablierter MBS-Methoden mit den Anforderungen der Großgerätemontage	2
3	Entwicklung einer Planungssystematik für die MBS in der Großgerätemontage	
3.1	Adaption und Entwicklung geeigneter MBS-Methoden	3
3.2	Entwicklung einer Vorgehensweise zur Layouterzeugung	3
3.3	Methodik zur Ableitung einer standardisierten Tätigkeitsbeschreibung für die MBS	3
3.4	Entwicklung eines operativen Steuerungskonzepts zur Synchronisation von Montage und MBS	3
4	Überführung der Planungssystematik in einen IT-Demonstrator und Validierung in der Praxis	5
5	Einbindung der standardisierten MBS in den Planungs- und Steuerungsprozess	3
6	Dokumentation und Ergebnistransfer	-

Das Ziel des ersten Arbeitspakets war die Definition von Anforderungen an Materialbereitstellungskonzepte sowie die Definition relevanter Zielgrößen. Die Anforderungsdefinition erfolgte dabei auf Basis strukturierter Experteninterviews. Die Ergebnisse des ersten Arbeitspakets werden in Kapitel 3 vorgestellt.

Im Rahmen des zweiten Arbeitspakets wurden etablierte Materialbereitstellungsmethoden mit den Anforderungen der Großgerätemontage verglichen und ihre Eignung zur Anwendung in der Großgerätemontage bewertet. Basis dieses Arbeitspakets stellt eine Literaturrecherche hinsichtlich der Charakteristika der Großgerätemontage sowie der theoretischen Grundlagen der Materialbereitstellung dar. Die Ergebnisse des zweiten Arbeitspakets werden aufgrund der engen Verknüpfung mit den Inhalten des zweiten Kapitels in Kapitel 2.2 präsentiert.

Im dritten Arbeitspaket wurde die Planungssystematik für die Materialbereitstellung in der Großgerätemontage entwickelt. Dazu wurden im ersten Schritt geeignete Materialbereitstellungsmethoden adaptiert. Anschließend wurde in Arbeitspaket 3.2 eine Vorgehensweise zur Layouterzeugung und in Arbeitspaket 3.3 eine Methodik zur Ableitung einer standardisierten Tätigkeitsbeschreibung für die Materialbereitstellung in der Großgerätemontage entwickelt. Abgeschlossen wurde das dritte Arbeitspaket mit der Entwicklung eines operativen Steuerungskonzepts zur Synchronisation von der Montage und der Materialbereitstellung. Die Ergebnisse des dritten Arbeitspakets sowie der Einbindung

der standardisierten Materialbereitstellung in den Planungs- und Steuerungsprozess (Arbeitspaket 5) sind Inhalt von Kapitel 4.

Die abschließende Validierung der entwickelten Planungssystematik (Arbeitspaket 4) wird in Kapitel 5 vorgestellt.

Der Ergebnistransfer in die Wirtschaft und der Einzelfinanzierungsplan werden in den Kapiteln 6 und 7 bewertet, bevor im achten Kapitel das Forschungsvorhaben zusammengefasst und ein Ausblick gegeben wird.

2 Grundlagen der Großgerätemontage und Materialbereitstellung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zur Großgerätemontage und Materialbereitstellung beschrieben. Dazu werden ausgehend von einer Definition von Großgeräten die repräsentativen Fertigungsformen und -organisationen in der Großgerätemontage beschrieben. Daran angeschlossen werden die Ziele und Aufgaben der Materialbereitstellung detailliert erläutert. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit der Darstellung aktueller Trends und Anforderungen an die Materialbereitstellung in der Großgerätemontage.

2.1 Die Großgerätemontage

Je nach Produktportfolio ist die Fertigung produzierender Unternehmen in verschiedene Fertigungsarten unterteilbar. Diese sind abhängig vom Kundenentkopplungspunkt, der die Stelle in der Produktion bzw. Montage beschreibt, ab dem ein Auftrag nicht mehr kundenanonym, sondern direkt auf einen bestimmten Kundenauftrag hin produziert wird. Je nach Produktionsvolumen und Wiederholhäufigkeit der Kundenaufträge wird zwischen der Einzel- und Mehrfachfertigung unterschieden (Wiendahl 2014, S. 41). Während bei der Einzelfertigung Produkte in der Stückzahl eins hergestellt werden, zielt die Mehrfachfertigung auf die Produktion mehrerer Erzeugnisse eines Produkts ab und wird in die Serien-, die Sorten- und die Massenproduktion unterteilt. (Wiendahl 2014, S. 41; Wiendahl et al. 2014, S. 48; Syska 2006, S. 83; Lödding 2016, S. 97)

Charakteristisch für die Einmalfertigung (Engineering to Order) sind Aufträge mit einer sehr geringen Auflagenhöhe und ohne Auftragswiederholung. Dabei erfolgt die Produktion direkt auf einen speziellen Kundenauftrag hin, der oftmals aus Neukonstruktionen besteht. Um den Fertigungsaufwand bei Projekten mit Neukonstruktion zu reduzieren, sind Unternehmen mit Einmalfertigung in der Regel auf einen bestimmten Produktbereich spezialisiert, sodass bei neuen Aufträgen auf bereits vorhandene Erfahrungen mit Referenzprodukten zurückgegriffen werden kann. (Lödding 2016, S. 97; van Genuchten 1992, S. 79)

Die zweite ebenfalls auf individuelle Kundenanforderungen ausgerichtete Produktionsart ist die Einzelproduktion (Make to Order), bei der der Kunde das gewünschte Produkt aus einem vorgegebenen Produktsortiment auswählt. Die Produkte sind dabei weitestgehend standardisiert und lediglich hinsichtlich einzelner Parameter individuell anpassbar. (Plümer 2003, S. 188; Steven 2012, S. 277)

Die Grundform der Mehrfachfertigung stellt die Serienfertigung dar. Sie ist durch verschiedene parallel oder nacheinander in großen, aber begrenzten Stückzahlen hergestellte Produkte charakterisiert und je nach Kundenorientierung in die variantenarme und -reiche Serienfertigung zu differenzieren.

Während die variantenreiche Serienfertigung nur auf direkten Kundenauftrag hin fertigt, ist die variantenarme Serienproduktion auf standardisierte Hauptprodukte mit wenigen Varianten ausgelegt, sodass ihre Produktion kundenanonym verläuft. Eine Sonderform der Serienfertigung ist die Sortenfertigung, deren Erzeugnisse technologisch und in ihrer Erstellungsart so ähnlich sind, dass diese diskontinuierlich in unbegrenzter Auflagezahl hergestellt werden. (Hansmann 2006, S. 130; Kiener et al. 2018, S. 71; Peters et al. 2000, S. 132)

Erfolgt eine Sortenfertigung kontinuierlich ohne Stückzahlaufgabe und für einen anonymen Markt, handelt es sich um eine Massenproduktion (Make to Stock). Da bei der reinen Massenfertigung nur ein Produkt hergestellt wird, entfallen Umrüstvorgänge komplett, sodass die Produktion mit Hilfe von Spezialmaschinen automatisiert werden kann. Zwar führt der Einsatz dieser Maschinen zu niedrigen Stückkosten, gleichzeitig wird die Flexibilität in Bezug auf Kundenwünsche jedoch deutlich eingeschränkt. (Hansmann 2006, S. 130; Peters et al. 2000, S. 132)

Ein Hauptproblem, das nahezu alle Unternehmen unabhängig von ihrer Fertigungsart bei der Erfüllung der Kundenaufträge gemein haben, ist nach Westkämper (2006, S. 66) die nach Art, Menge und Qualität nicht vorhersehbare Kundennachfrage. Hintergrund dieser Problematik ist die Volatilität des realen Marktes, die sich deutlich vom idealen Markt unterscheidet. So ist der reale Markt im Vergleich zum idealen Markt, der durch eine unendliche und konstante Kundennachfrage ohne Konkurrenz charakterisiert ist, deutlich instabiler und aufgrund der begrenzten Nachfrage durch einen unberechenbaren Wettbewerb gekennzeichnet. Unternehmen müssen ihre Produktion folglich so ausrichten, dass diese schnell und flexibel auf kurzfristige Nachfrageänderungen und Markttrends reagieren kann, gleichzeitig jedoch auch die Herstellung von kostengünstigen, aber hochqualitativen Erzeugnissen ermöglicht. (Westkämper 2006, S. 66; Pillkahn 2007, S. 47)

Eine besondere Herausforderung stellt diese Anforderung für die Großgerätemontage dar. Ein Großgerät ist als Produkt definiert, das sich aus einer hohen Anzahl heterogener Komponenten zusammensetzt, deren Gesamtgewicht größer 1.000kg ist. Aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Fertigungstiefe und Produktkomplexität weisen Großgeräte nur geringe Absatzmengen pro Erzeugnistyp auf, sodass sie überwiegend in Einzel- und Kleinserien produziert werden, deren dominierender Fertigungstyp die Baustellenmontage ist. (Reuter et al. 2014, S. 718; Hasselmann et al. 2013, S. 32ff.) Infolge der für die Großgerätemontage typischen Charakteristika stoßen die bestehenden Methoden und Werkzeuge zur Montage- und Logistikplanung an ihre technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Grenzen. Damit einhergehend ist im Vergleich zu konventionellen Produkten, bei denen der Herstellungsaufwand proportional zu den produktspezifischen Merkmalen steigt, in der Großgerätemontage ein überproportionaler Anstieg des Herstellungsaufwands zu beobachten. (Mach 2015, S. 32)

Wesentliche Merkmale der Großgerätemontage stellen die komplexe Materialflussstruktur und die während der Montage stationären Montageobjekte dar, denen eine beliebige Anzahl an Montagemitarbeitern zugeordnet ist. Vor dem Hintergrund, dass die Einzel- und Kleinserie gleichzeitig einen vergleichsweise hohen Anteil an fremdbezogenen Komponenten aufweist, ist diese stark vom Beschaffungsmarkt abhängig, sodass das Material oftmals bereits zu Montagebeginn vollständig bereitgestellt wird. In der Folge führt die Bereitstellung der Einzelteile und (vormontierten) Baugruppen zu einem hohen Platzbedarf (Reuter et al. 2014, S. 719f.; Sietz und Weber 2013, S. 841ff.). Um eine dauerhaft freie Zugänglichkeit des Montageobjekts von allen Seiten sicherzustellen, erfolgen die Montagetätigkeit und die Materialbereitstellung i. d. R. räumlich getrennt (Lotter und Wiendahl 2012, S. 147ff.). Daraus resultiert ein hoher Sekundäraufwand für den Montagemitarbeiter, sodass der Arbeitsablauf durch einen hohen Transportaufwand und lange Such- und Handhabungszeiten für Teile und Werkzeuge geprägt ist (Lotter und Wiendahl 2012, S. 147ff.; Lotter et al. 2016, S. 33ff.).

Ein weiteres Problem bei der Materialbereitstellung in der Großgerätemontage sind die aufgrund der geringen Auflagezahlen nicht vorhandenen Einbaureihenfolgen aufgrund von z. B. nicht vorhandenen Montagevorranggraphen. Durch dieses Informationsdefizit erfolgt die Materialbereitstellung nicht verbrauchsorientiert, sondern bedarfsorientiert und auf Zuruf (Reuter et al. 2014, S. 719). Sind Einzelteile oder Baugruppen nicht rechtzeitig verfügbar, führt dies zu hohen Wartezeiten und Produktionsstillständen, die in einer Verzögerung des geplanten Liefertermins resultieren.

Zur Erreichung effizienter Produktionsprozesse gilt es, sowohl die wertschöpfenden Prozesse (wie die Fertigung und die Montage) als auch die nicht wertschöpfenden bzw. unterstützenden Prozesse zu optimieren (Adolph und Metternich 2016, S. 15ff.). Ein besonders hohes Optimierungspotenzial in der Großgerätemontage weist die zur Produktionslogistik gehörende Materialbereitstellung auf. Diese geht mit einem hohen Planungs- und Steuerungsaufwand einher, der wiederum von der Qualität der zur Verfügung stehenden Planungsdatenbasis abhängt. Aufgrund einer i. d. R. schlechten Datenverfügbarkeit ist eine solche Datenbasis oftmals jedoch nur unzureichend bis gar nicht vorhanden. In der Folge reicht die Qualität der daraus resultierenden Arbeitspläne nicht aus, um die monetären und logistischen Folgen von Produkt- bzw. Prozessänderungen adäquat zu beurteilen (Reuter et al. 2014, S. 720) oder kurzfristig auf Störungen bzw. Verzögerungen vereinbarter Liefertermine zu reagieren. Zwar existieren verschiedene Planungswerkzeuge und Prinzipien der schlanken Produktion, durch die der Planungs- und Steuerungsaufwand für die Materialbereitstellung in der Großgerätemontage reduziert werden kann, diese gehen i. d. R. jedoch mit hohen Investitionskosten einher. Da sie zudem bis auf wenige Ausnahmen auf die Großserien- und Massenfertigung zugeschnitten sind, finden sie in der Einzel- und Kleinserienfertigung von Großgeräten nur selten Anwendung. Aufgrund des hohen

Optimierungspotenzials der Materialbereitstellung im Rahmen der Großgerätemontage werden die Aufgaben und Ziele der Materialbereitstellung im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

2.2 Eignung bestehender Materialbereitstellungsmethoden für die Baustellenmontage der Großgerätemontage

Ausgehend von den dargestellten Grundlagen zu den Themengebieten der Materialbereitstellung und Baustellenmontage erfolgt in diesem Kapitel eine Bewertung etablierter Materialbereitstellungsmethoden hinsichtlich ihrer Eignung für die Großgerätemontage.

Insgesamt wurden drei verbrauchs- und sechs bedarfsgesteuerte MBS-Methoden analysiert und bewertet:

1. Verbrauchsgesteuerte Methoden

- Kanban,
- Mehr-Behälter-Prinzip
- Handlager

2. Bedarfsgesteuerte Methoden

- Just-in-Sequence
- Einzelbeschaffung
- periodische Bereitstellung
- Gesamtauftragskommissionierung
- Teilauftragskommissionierung
- Einzelkommissionierung

Die Untersuchung der Eignung der MBS-Methoden für die variantenreiche Großgerätemontage erfolgte auf der Basis von Fachliteratur und Expertenbefragungen. Identifizierte Bewertungskriterien waren z. B. die Verwendungskontinuität und -häufigkeit von Bauteilen und -gruppen, der Standardisierungsgrad von Bauteilen und -gruppen, die verwendeten Auftrags- und Losgrößen, der monetäre Wert eines Bauteils/ einer Baugruppe und die Verfügbarkeit und Individualität der Bauteile. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Bewertung etablierter MBS-Methoden

Eignung verbrauchsgesteuerter Methoden für die Großgerätemontage	
Kanban	<ul style="list-style-type: none"> • Auftragsunabhängige Bereitstellung nach Verbrauch mit definierter Losgröße • Gefahr der Lagerbestandserhöhung bei hoher Teilevielfalt

	<ul style="list-style-type: none"> → Eignung für Großgerätemontage nur für Teile mit hoher Verwendungskontinuität und -häufigkeit oder mit geringem Wert
Mehr-Behälter-Prinzip	<ul style="list-style-type: none"> • Auftragsunabhängige Bereitstellung nach dem Verbrauch mit definierter Standardmenge • Hoher Platzbedarf bei steigender Bauteilgröße → Eignung nur für kleine Teile (in Behältern) mit hoher Verwendungskontinuität und -häufigkeit
Handlager	<ul style="list-style-type: none"> • Verbrauchs- oder zeitlich gesteuerte Bereitstellung von Standardmengen → Eignung nur für Kleinteile
Eignung bedarfsgesteuerte Methoden für die Großgerätemontage	
Just-in-Sequence	<ul style="list-style-type: none"> • Zeit- und mengerspezifische Bereitstellung mit fester Bereitstellungssequenz • Geringe Kapitalbindung durch kurze Zeitdauer vom Anlieferungs- bis zum Verbaupunkt • Gefahr von Montagestillständen bei Lieferverzögerung → Eignung nur für zeitlich unkritische Bauteile
Einzelbeschaffung	<ul style="list-style-type: none"> • Auftragsabhängige Bestellung und Bereitstellung → Eignung nur für wertvolle/ kundenindividuelle Bauteile
Gesamtauftragskommissionierung	<ul style="list-style-type: none"> • Auftragsabhängige Bereitstellung bei Bedarf als Gesamtauftrag • Gefahr eines hohen Sekundäraufwands für den Monteur → Eignung ist abhängig vom Platzangebot und der Kapitalbindungsstrategie
Teilauftragskommissionierung	<ul style="list-style-type: none"> • Auftragsabhängige Bereitstellung bei Bedarf als Teilauftrag • Gefahr eines hohen Sekundäraufwands für den Monteur → Eignung ist abhängig vom Platzangebot und der Kapitalbindungsstrategie
Einzelkommissionierung	<ul style="list-style-type: none"> • Auftragsabhängige Bereitstellung bei Bedarf in der Losgröße eines • Eignung bei großvolumigen/ individuellen/ wertvollen/ empfindlichen Teilen

	<ul style="list-style-type: none">• Besondere Eignung bei Teilen mit niedriger Verwendungskontinuität und -häufigkeit <p>➔ Eignung aufgrund des hohen Dispositionsaufwand nur für große/wertvolle/ kritische Teile</p>
Periodische Bereitstellung	<ul style="list-style-type: none">• Auftragsabhängige Bereitstellung in zeitlich regelmäßigen Perioden <p>➔ Eignung nur bei Teilen mit mittlerer bzw. hoher Verwendungskontinuität und -häufigkeit</p>

3 Anforderungsdefinition

Ziel der Anforderungsdefinition ist die Erarbeitung praxisrelevanter Anforderungen an eine standardisierte Materialbereitstellung (MBS) in der komplexen, variantenreichen Großgerätemontage mit geringen Stückzahlen. Zur Identifikation der Anforderungen wurde eine zweistufige Untersuchung durchgeführt, die aus einer Analyse- und einer Validierungsphase besteht. Im Rahmen der Analysephase wurden auf Basis strukturierter Experteninterviews sowie einer detaillierten Literaturrecherche allgemeine Probleme und Herausforderungen in der Großgerätemontage identifiziert. In der anschließenden Validierungsphase wurden die Ergebnisse der Experteninterviews und Literaturrecherche in weiteren Expertengesprächen bzw. Workshops bei interessierten Unternehmen validiert und hinsichtlich ihrer Relevanz priorisiert.

Durchgeführt wurden die strukturierten Experteninterviews bei 15 Unternehmen des Sondermaschinenbaus. Als wesentliche Hauptziele in der Großgerätemontage wurden dabei die in Abbildung 3.1 dargestellten Ziele ermittelt.

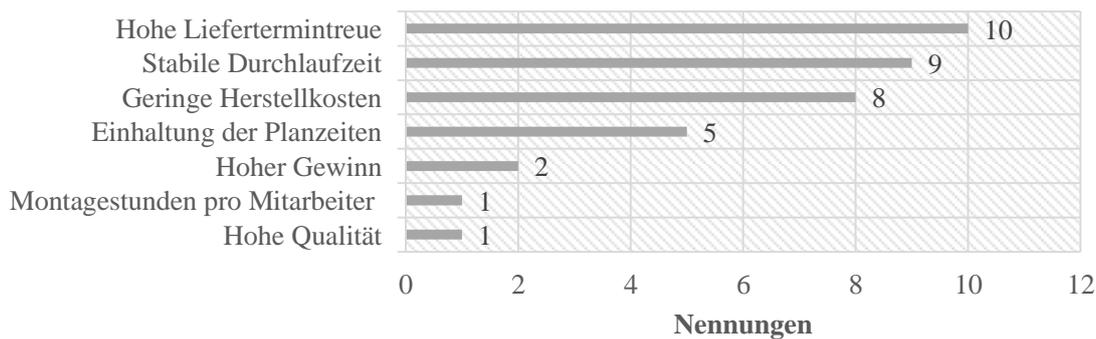


Abbildung 3.1: Hauptziele in der Großgerätemontage

Als Hauptziele wurden dabei eine hohe Liefertermintreue (10 Nennungen) und eine stabile Durchlaufzeit (9 Nennungen) genannt. Weitere Ziele sind die Erreichung geringer Herstellkosten (8 Nennungen) und die Einhaltung von Planzeiten (5 Nennungen). Die wesentlichen Herausforderungen bei der Erreichung der Hauptziele sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

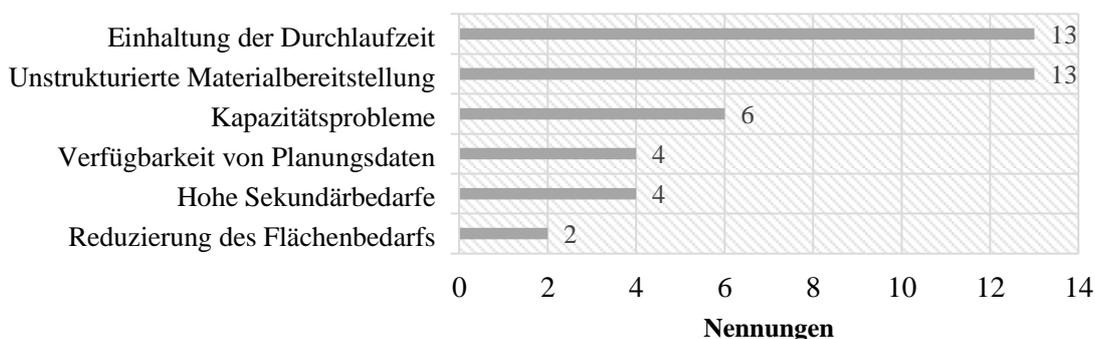


Abbildung 3.2: Herausforderungen in der Großgerätemontage

Die größte Herausforderung sind demnach die Einhaltung der Durchlaufzeit und die unstrukturierte Materialbereitstellung mit jeweils 13 Nennungen. Weitere Herausforderungen sind Kapazitätsprobleme (4 Nennungen), die Verfügbarkeit von Planungsdaten und hohe Sekundäraufwände (4 Nennungen) sowie die Reduzierung des Flächenbedarfs mit 2 Nennungen.

Einhergehend mit der Literaturrecherche und in Zusammenarbeit mit den befragten Experten wurden aufbauend auf den Zielen und Herausforderungen in der Großgerätemontage die folgenden sechs Anforderungen definiert, die bei der Entwicklung einer Planungssystematik für die standardisierte Materialbereitstellung zu berücksichtigen sind:

1. Methodentransfer

Die Anwendung eines einheitlichen Planungs- und Steuerungsverfahrens stellt die Grundvoraussetzung für die Entwicklung von unternehmensübergreifenden Best Practice Methoden für die MBS in der Großgerätemontage dar. Statt weiterhin unternehmensindividuelle Lösungen zu entwickeln, soll ein Transfer zielführender Ansätze und Methoden zwischen verschiedenen Unternehmen ermöglicht und das bestehende Defizit bei der Übertragung etablierter MBS-Methoden aus der Serien- und Massenfertigung auf die Großgerätemontage behoben werden.

2. Datenbasisbasierte Planung

Die effiziente MBS-Planung erfordert die Minimierung des manuellen Planungsaufwands, der aufgrund der geringen Wiederholhäufigkeiten der Aufträge in der Großgerätemontage sehr hoch ist. Aus diesem Grund soll eine Datenbasis entwickelt werden, in der Planungsergebnisse abgeschlossener Aufträge dokumentiert und für nachfolgende Aufträge nutzbar gemacht werden.

3. Flächennutzung

Einen wesentlichen Einfluss auf die Anzahl annehmbarer Aufträge in der Großgerätemontage hat die Anzahl parallel durchführbarer Aufträge, die vom Flächenbedarf pro Auftrag abhängig ist. In Hinblick auf die Gewinnmaximierung und Wettbewerbsfähigkeit soll die Planungssystematik folglich eine flächenminimale MBS gewährleisten. Voraussetzung hierfür ist die eindeutige Beschreibung und Standardisierung aller Bauteile und Bereitstellungsmittel (z.B. Kisten, Paletten), durch die der Flächenbedarf berechenbar wird.

4. Standardisierung

Aus Planungssicht besteht ein großes Optimierungspotenzial in der Standardisierung der MBS. Aus der derzeit nicht standardisierten Bereitstellung des Materials resultiert für den Monteur ein hoher Sekundäraufwand (z.B. Laufwege, Suchvorgänge für Teile), durch den die Durchlaufzeit und der

Anteil der nicht wertschöpfender Prozesse steigen. Die Standardisierung der MBS stellt folglich eine wichtige Anforderung an die zu entwickelnde Planungssystematik dar.

5. Ganzheitlichkeit

Ein wesentliches Problem in der Großgerätemontage ist die Abstimmung zwischen Montage und Logistik, die aufgrund unterschiedlicher Zielsetzungen und existierender Kommunikationsdefizite oftmals unzureichend erfolgt. Eine effiziente Kommunikation ist jedoch eine Grundvoraussetzung für eine hohe Prozesseffizienz in der Montage und Logistik. Durch eine ganzheitliche Betrachtung der Montage und Logistik sowie deren Schnittstelle soll das Abweichungsmanagement bei Problemen verbessert werden. So sollen Abweichungen z.B. hinsichtlich des Produktionsfortschritts oder Verzögerungen durch die Materialverfügbarkeit schneller sichtbar und Montagestillstände, die sowohl die Einhaltung des Liefertermins des laufenden, als auch den der nachfolgenden Aufträge gefährden können, verhindert werden.

6. Multikriterien-Bewertung

An eine Planungssystematik zur MBS wird eine Vielzahl verschiedener und teilweise konkurrierender Ziele und Anforderungen gestellt (z.B. zeit- und mengengenaue Anlieferung, kurze Reaktionszeit, dauerhafte Materialverfügbarkeit, geringe Bestände). Daher muss eine anwenderspezifische Bewertung alternativer Szenarien unter Berücksichtigung gewichteter Zielkriterien erfolgen können.

Die den Experten in der Validierungsphase zur Bewertung vorgelegten Zielgrößen umfassten entsprechend der Fachliteratur:

- Flächenbedarf & -nutzung
- Kapitalbindung/ Bestände
- Bauteilverfügbarkeit
- Anzahl Mitarbeiter
- Mitarbeiterauslastung
- Durchlaufzeit
- Prozessqualität
- Datenbasierte Planungsunterstützung

Die Zielgrößen „Liefertermintreue“ und „Produktqualität“ wurden nicht als bewertbare Zielgrößen angeführt, da diese als zu erfüllende Muss-Restriktionen vorausgesetzt wurden. Auch die Zielgröße ‚Kosten‘ wurde nicht einzeln ausgewiesen, da diese vielmehr durch das Zusammenspiel der gegebenen Anforderungen und Ziele beeinflusst wird. Die weiteren Zielgrößen wurden von den Experten mit Hilfe einer Bewertungsskala von 1-5 jeweils hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Montage und Logistik bewertet. Bei der Auswertung wurden die einzelnen Expertenbewertungen gemittelt und gerundet, woraus die nachfolgenden Prioritäten resultieren.

Demnach haben die Zielgrößen Flächenbedarf & -nutzung, Bauteilverfügbarkeit, Mitarbeiterauslastung und Prozessqualität (alle Bewertung 5) die höchste Priorität, die datenbasierten Unterstützung

(4,5) und die Durchlaufzeit (4) eine mittlere Priorität und die Mitarbeiteranzahl und die Kapitalbindung/ Bestände (beide 3) eine vergleichsweise niedrige Priorität.

Zusammengefasst ergeben sich auf Basis der Ergebnisse der ersten und zweiten Analysephase folgende priorisierte Anforderungen und Zielgrößen der MBS:

Tabelle 3.1: Ergebnis der Analysephasen zur Anforderungs- und Zielgrößendefinition

Muss-Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Liefertermintreue • Produktqualität
Höchste Priorität	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenbedarf & -nutzung • Bauteilverfügbarkeit • Mitarbeiterauslastung • Prozessqualität • Standardisierung • Datenbasierte Planung
Mittlere Priorität	<ul style="list-style-type: none"> • Mitarbeiteranzahl • Kapitalbindung/ Bestände • Durchlaufzeit
Übergeordnete Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Multikriterien-Bewertung • Methodentransfer • Ganzheitlichkeit

4 Planungssystematik zur standardisierten Materialbereitstellung

Im Rahmen dieses Kapitels wird die entwickelte Planungssystematik zur standardisierten Materialbereitstellung beschrieben. Der Aufbau der Planungssystematik orientiert sich an den in Kapitel 1.1 vorgestellten Arbeitspaketen aus dem Forschungsvorhaben SySMaG. Während in den Kapiteln 4.1 und 4.2 wichtige Vorarbeiten für die Planungssystematik hergeleitet werden, erfolgt ihre eigentliche Entwicklung in den Kapitel 4.4 bis 4.6.

Die Vorarbeiten bestehen dabei zum einen aus der Adaption bestehender Materialbereitstellungsmethoden (Kapitel 4.1) und zum anderen aus der Erzeugung einer Datenbasis (Kapitel 4.1), auf deren Basis die Layoutplanung (Kapitel 4.4) erfolgt. Neben der Layoutplanung besteht die Planungssystematik zudem aus dem operativen Steuerungskonzept (Kapitel 4.5) und einer Methode zur Ableitung standardisierter Tätigkeitsbeschreibungen für die Materialbereitstellung (Kapitel 4.6). In Abbildung 4.1 ist der Aufbau dieses Kapitels sowie die jeweils adressierten Arbeitspakete übersichtlich dargestellt.



Abbildung 4.1: Aufbau der Planungssystematik zur standardisierten Materialbereitstellung

4.1 Adaption bestehender Materialbereitstellungsmethoden

Als Grundlage zur Entwicklung der Planungssystematik werden die durchgeführten Anpassungen der in Kapitel 2.2 vorgestellten Materialbereitstellungsmethoden präsentiert, die auf die komplexe, variantenreiche Großgerätemontage übertragen wurden (Arbeitspaket 3.1). Die Gliederung der durchgeführten Modifikationen erfolgt anhand der Einteilung in verbrauchs- und bedarfsgesteuerte Verfahren:

Kanban

Die Modifikation der Kanban-Methode setzt eine enge Kommunikation zwischen dem Einkauf und der Logistik voraus, um Liefertermine entsprechend zu kommunizieren und eventuelle Abweichungen vom geplanten Montageplan aufgrund von Fehlteilen frühzeitig kompensieren zu können.

Dazu wird das eingehende Material bei der Anlieferung auf seine Vollständigkeit hin geprüft, in eine Kommissionierzone eingelagert und eine zugehörige Kanbankarte in die Montage eingesteuert. Die Kanbankarten sind in Einmal- und Mehrfachkanban unterteilt. Während Einmalkanban vor allem bei wertvollen Teilen mit geringer Verwendungshäufigkeit und nur einmalig einsetzbar sind, löst die Rückführung eines Mehrfachkanbans die Nachproduktion bzw. -bestellung des entsprechenden Bauteils aus. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass nur verfügbare Bauteile von der Montage angefordert werden können und gleichzeitig die Lagerkapazitäten moderat gehalten werden.

Mehr-Behälter-Prinzip

Das Mehr-Behälter-Prinzip wird im Rahmen der Großgerätemontage lediglich als Hilfsmethode angewendet, mit deren Hilfe Schüttgut wie Schrauben oder Kleinteile mit hoher Verwendungshäufigkeit bereitgestellt werden. Auf diese Weise kann die Logik des Mehr-Behälter-Prinzips beibehalten werden und weiterhin mit definierten Standardbehältermengen realisiert werden.

Handlager

Analog zum Mehr-Behälter-Prinzip erfolgt das Handlager verbrauchsgesteuert und mit Hilfe von Standardmengen. In der Folge ist es nur für Kleinteile geeignet, die eine hohe Verbrauchsstetigkeit aufweisen.

Just-in-Time/ Just-in-Sequence

Eine Just-in-Time bzw. Just-in-Sequence Bereitstellung ist im Rahmen der Großgerätemontage nur bedingt umsetzbar. Hintergrund ist die in der Großgerätemontage häufige Abweichung der Ist-Zeiten von den Planzeiten, in Folge derer eine Just-in-Time bzw. Just-in-Sequence Bereitstellung bei negativer Planzeitabweichung zu Fehlteilen und Montagestillständen führen würde. Die Anwendung der Just-in-Time Bereitstellung ist daher nur in Verbindung mit einem zeitlichen Puffer möglich. Dieser wird über einen gesonderten Stellplatz realisiert, auf dem das per Just-in-Time Prinzip bereitzustellende Material zu einem zeitlich früheren Zeitpunkt als dem eigentlichen Verbrauchszeitpunkt bereitgestellt wird. Ausgelöst wird die Bereitstellung mit Hilfe eines Flächenkanban, das im weiteren Verlauf dieses Kapitel erläutert wird.

Einzelbeschaffung

Einzelbeschaffung ohne Adaption anwendbar.

Gesamtauftragskommissionierung

Gesamtauftragskommissionierung ohne Adaption anwendbar.

Teilauftragskommissionierung

Teilauftragskommissionierung ohne Adaption anwendbar.

Einzelkommissionierung

Einzelkommissionierung ohne Adaption anwendbar.

Periode Bereitstellung

Periodische Bereitstellung ohne Adaption anwendbar. Allerdings eignet sich diese Bereitstellung nur bedingt für die Großgerätemontage, da sie eine hohe Verwendungskontinuität voraussetzt.

4.2 Erzeugung der Datenbasis

Eine wichtige Voraussetzung zur Planung der Materialbereitstellung ist die Verfügbarkeit einer validen Planungsdatenbasis. Aufgrund der geringen Wiederholhäufigkeit der Aufträge in der Großgerätemontage besteht hinsichtlich vorhandener Planungsdaten jedoch oftmals ein Defizit, da die Aufnahme und Pflege der Daten mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden ist. Zwar handelt es sich bei den Aufträgen oftmals um Unikate, diese weisen jedoch stets zahlreiche Parallelen zu abgeschlossenen Aufträgen auf. Sowohl bei der Neu- als auch bei der Anpassungsplanung können daher verschiedene Baugruppen bzw. Planungscharakteristika von abgeschlossenen Aufträgen auf den neuen Auftrag übertragen werden. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Entwicklung und Pflege einer validen Planungsdatenbasis, deren häufiges Fehlen bisher ein Planungsdefizit darstellt.

Zur Reduzierung dieses Defizits wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht auftragsunabhängige Ähnlichkeiten zwischen neuen Auftragsdaten und vorhandenen Planungsergebnissen aufwandsarm und schnell zu identifizieren. Auf diese Weise werden die Erkenntnisse und Planungscharakteristika abgeschlossener Aufträge genutzt, um den Planungsaufwand für neue Aufträge signifikant zu senken und sich wiederholende Fehler bei der Montage zu vermeiden. Dazu basiert die Methode auf Proximitätsmaßen, die die Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit von Objekten beschreiben. Die Ähnlichkeit ist „eine Funktion, die einem Paar an Objekten eine Zahl aus dem reellen Intervall $[0,1]$ zuordnet.

Dabei korrespondiert der Wert 1 zur maximalen Ähnlichkeit und der Wert 0 zur maximalen Unähnlichkeit“ (Schmitt 2009, S. 215). Entsprechend dieser Definition können Ähnlichkeits- und Distanzmaße ineinander transformiert werden, um diese entsprechend vergleichbar zu machen. Die Wahl der Transformationsformel hängt zum einen von dem der Berechnung zu Grunde liegenden Proximitätsmaß und zum anderen von der Richtung der Transformation ab. (Fahrmeier 1996, S. 442)

Fahrmeier (1996, S. 442) empfiehlt zur Überführung einer Ähnlichkeit in eine Distanz die Formel 4.1 und zur Transformation einer Distanz in eine Ähnlichkeit die Formel 4.2. Während s_{ij} die Ähnlichkeit beschreibt, gibt d_{ij} die Distanz zweier Objekte an. Die Maximaldistanz zwischen zwei Objekten wird durch D_{\max} beschrieben.

$$d_{ij} = 1 - s_{ij} \quad 4.1$$

$$s_{ij} = 1 - \frac{d_{ij}}{d_{\max}} \quad 4.2$$

Den Ausgangspunkt der Ähnlichkeitsanalyse bildet eine Ähnlichkeitsmatrix, in der M Objekte miteinander verglichen werden. Dazu sind diese Objekte sowohl in den Zeilen als auch den Spalten gelistet sodass jeweils zwei Objekten ein Ähnlichkeitswert zwischen 0 und 1 zugewiesen werden kann. Die Wahl des anzuwendenden Proximitätsmaßes hängt vom Skalenniveau und dem Anwendungsfall ab. (Backhaus et al. 2016, S. 457ff.; Guhleemann 2016, S. 32ff.)

Hinsichtlich des Skalenniveaus sind die vier Skalentypen der Nominal-, der Ordinal-, der Intervall- und der Ratioskala zu unterscheiden, deren Eigenschaften in *Tabelle 4.1* beschrieben sind.

Tabelle 4.1 Einordnung der Skalenniveaus und Merkmale

SKALENNIVEAU	SKALENTYP	MERKMALE	BEISPIEL
NICHT-METRISCHE SKALEN	Nominalskala	Klassifizierung qualitativer Eigenschaftsausprägung	Farben
	Ordinalskala	Rangwert mit Ordinalzahlen	Kundenzufriedenheit
METRISCHE SKALEN	Intervallskala	Skala mit gleichgroßen Abschnitten ohne natürlichen Nullpunkt	Temperatur
	Ratioskala	Skala mit gleichgroßen Abschnitten und natürlichen Nullpunkten	Geschwindigkeit

Zur Berechnung des Ähnlichkeitswerts zweier Objekte wird eine Kontingenztafel verwendet, in der die Objekte gegenübergestellt werden (s. Tabelle 4.2). Die Kontingenztafel bildet die Grundlage für die nachfolgenden Formeln zur Berechnung der Proximität zweier Objekte. (Backhaus et al. 2016, S. 460)

Tabelle 4.2: Kontingenztafel (Backhaus et al. 2016, S. 460)

		Objekt j		Zeilensumme
		1	0	
Objekt i	1	a	c	a + c
	0	b	d	b + d
Spaltensumme		a + b	c + d	m

Das Ziel der Ähnlichkeitsanalyse im Kontext von SySMaG war die Identifizierung und Nutzung auftragsübergreifender Planungscharakteristika zur Senkung des Planungsaufwands bei der Materialbereitstellung. Dazu wurde eine Planungsdatenbasis konzipiert, in der alle Baugruppen abgeschlossener Aufträge mit Hilfe festgelegter Charakteristika eindeutig beschrieben sind. Durch einen Vergleich der Baugruppen eines neuen Auftrags mit den in der Planungsdatenbasis enthaltenen Baugruppen wird es möglich auf vorhandene Planungsergebnisse zurückzugreifen und den Planungsaufwand durch Nutzung bestehender Informationen signifikant zu reduzieren.

Dazu wurden im ersten Schritt die zu vergleichenden Merkmale identifiziert und das anzuwendende Ähnlichkeitsmaß ausgewählt. Als mögliche Merkmale wurden auf Basis einer Literaturrecherche verschiedene Charakteristika, wie das Gewicht, das Volumen oder die Bauteilgeometrie, ausgewählt. Ihre Eignung zur Ähnlichkeitsanalyse wurde mit Hilfe von Expertengesprächen validiert. Eine wichtige Restriktion bei der Merkmalsauswahl war die Vermeidung von redundanten Merkmalsvergleichen, da z. B. das Volumen stark abhängig von der Bauteilgeometrie ist, sodass die Einbeziehung beider Merkmale zu einer doppelten Berücksichtigung bei der Ähnlichkeitsberechnung führen würde. So würden zwei identische Bauteile bei Vertauschung der Längen- und Breitenangaben (z. B. 1m x 2m x 2m und 2m x 1m x 2m) zwar das gleiche Bauteilvolumen aufweisen, hinsichtlich der geometrischen Ähnlichkeit jedoch als verschiedene Objekte identifiziert werden. Ein weiteres Auswahlkriterium war die Relevanz der Merkmale in Bezug auf die Materialbereitstellung. So kann es sich beispielsweise bei zwei Bauteilen montagetechnisch um die gleichen Bauteile handeln, die aufgrund der unterschiedlichen Materialmassen z. B. bei Stahl und Aluminium bei der Materialbereitstellung jedoch separat zu betrachten sind. Auf Basis dieser Kriterien wurden folgende Merkmale zur Berechnung der Ähnlichkeit ausgewählt:

- Die Anzahl Bauteile einer Baugruppe,
- Die Sachnummer einer Baugruppe,
- Das Volumen einer Baugruppe,
- Die Geometrie eines Bauteils (Hüllkörper),
- Die Masse eines Bauteils und
- Das Material eines Bauteils.

Zur Analyse der Merkmalsähnlichkeit wurden folgende Proximitätsmaße analysiert (Backhaus et al. 2016, S. 460ff.):

Der Simple-Matching-Koeffizient

Der Simple-Matching-Ähnlichkeitskoeffizient bzw. M-Koeffizient gibt die Ähnlichkeit zweier Objekte i und j anhand (nicht) übereinstimmender Merkmale unter Berücksichtigung der Gesamtzahl der Merkmale m an. Der Simple-Matching-Ähnlichkeitskoeffizient S_M berechnet sich anhand der Formel 4.3.

$$S_M = \frac{a + d}{m} \quad 4.3$$

Der Tanimoto-Koeffizient

Der Tanimoto-Koeffizient, synonym auch als Jaccard-Koeffizient bezeichnet, misst den relativen Anteil übereinstimmender Merkmale bezogen auf die Merkmale, die mindestens in einem der beiden Objekte vorliegen. Die Berechnung des Tanimoto-Koeffizienten erfolgt dazu durch Division der Anzahl der gemeinsamen Merkmale (Schnittmenge) durch die Gesamtanzahl der Merkmale (Vereinigungsmenge) (s. Formel 4.4).

$$S_{Jaccard} = \frac{a}{a + b + c} \quad 4.4$$

Der Russel & Rao-Koeffizient

Ähnlich zum Simple-Matching-Koeffizient werden auch beim Russel & Rao-Koeffizient (RR-Koeffizient) alle Fälle des Vorhandenseins in das Verhältnis miteinbezogen, sodass auch die Fälle berücksichtigt werden, in denen das gesuchte Merkmal bei beiden Objekten nicht vorliegt (d). Die Berechnung erfolgt dazu mit Hilfe von Formel 4.5.

$$S_{RR} = \frac{a}{a + b + c + d} \quad 4.5$$

Der Dice-Koeffizient

Beim Dice Koeffizient werden die Merkmale, die bei beiden Objekten vorliegen doppelt gewichtet, sodass Übereinstimmungen stärker gewichtet werden als nicht übereinstimmende Merkmale. Formel 4.6 gibt die Berechnungsvorschrift des Dice-Koeffizienten an.

$$S_{RR} = \frac{2a}{2a + b + c} \quad 4.6$$

Aufgrund seiner einfachen Berechnungsformel und seiner geringen Komplexität bei der Anwendung wurde zur Berechnung der Ähnlichkeiten im Rahmen von SySMaG der Tanimoto-Koeffizient ausgewählt. Um eine breite Anwendbarkeit des Planungsansatzes sicherzustellen, sind die Planungscharakteristika zur Ähnlichkeitsberechnung zudem individuell gewichtbar.

Die Berechnung der Ähnlichkeit erfolgt über eine Ähnlichkeitsmatrix, in der die Baugruppen des neuen Auftrags mit den Baugruppen der Planungsdatenbasis hinsichtlich der definierten Planungscharakteristika verglichen werden. Sind die Baugruppen mit Sachnummern kodiert, kann die Ähnlichkeitsbewertung rein auf Basis des Merkmals ‚Sachnummer‘ erfolgen, sodass dieses Merkmal ein KO-Kriterium darstellt. Ist keine Sachnummer-Kodierung vorhanden, ergeben sich für die Ähnlichkeitsanalyse fünf Teilähnlichkeitsmatrizen (Bauteilgeometrie, Bauteilmasse, Anzahl Bauteile, Bauteilmaterial, Baugruppenvolumen). Über jede Teilähnlichkeitsmatrix wird für alle Baugruppen des neuen Auftrags mit Hilfe des Tanimoto-Koeffizienten die jeweilige Ähnlichkeit mit den in der Planungsdatenbasis vorhandenen Baugruppen berechnet und die Teilähnlichkeiten abschließend zu einer Gesamtähnlichkeit zusammengeführt. Die Berechnung der Gesamtähnlichkeit erfolgt durch die Addition der Produkte aus der Merkmalsähnlichkeit (Ω) mit der Merkmalsgewichtung (β), wobei das Merkmal ‚Sachnummer‘ durch die Variable α berücksichtigt wird:

$$\Omega (\text{Gesamt}) = \Omega (\text{Sachnummer}) \times \alpha + ((\Omega (\text{Geometrie}) \times \beta_1 + \Omega (\text{Masse}) \times \beta_2 + \Omega (\text{Anzahl}) \times \beta_3 + \Omega (\text{Material}) \times \beta_4 + \Omega (\text{Volumen}) \times \beta_5) \times (1 - \alpha))$$

, $\alpha = 1$ wenn Sachnummern vorhanden, sonst $\alpha = 0$.

Für jede Baugruppe wird auf diese Weise eine Referenzbaugruppe aus der Planungsdatenbasis identifiziert, die mit der neuen Baugruppe die größte Ähnlichkeit aufweist. Die Referenzbaugruppe stellt die Grundlage zur Planung der neuen Baugruppe dar und ist entsprechend anzupassen. Liegen keine identischen Baugruppen vor, dient die Referenzbaugruppe als Planungsreferenz und ist manuell anzupassen. Ist die Ähnlichkeit zweier Baugruppen gleich, wird diejenige Baugruppe als Planungsreferenz gewählt, die mit einem geringeren Anpassungsaufwand verbunden ist. Die Vorgehensweise basiert auf der Annahme, dass die Reduzierung einer Baugruppe um Bauteile mit weniger Aufwand einhergeht als die Erweiterung einer Baugruppe. Der Anpassungsaufwand berechnet sich daher auf

Basis der Anzahl an Gleichteilen zwischen der neuen Baugruppe und der Referenzbaugruppe, indem die Quotienten aus der Anzahl an Gleichteilen und der Anzahl an Bauteilen der Baugruppe (μ_1) sowie der Referenzbaugruppe (μ_2) verglichen werden. Im Optimalfall entspricht die Anzahl an Gleichteilen sowohl der Anzahl an Bauteilen der neuen Baugruppe, als auch der der Referenzbaugruppe, sodass $\mu_1 = \mu_2 = 1$ gilt (Fall 1). Entspricht die Anzahl an Gleichteilen der Anzahl an Bauteilen der neuen Baugruppe, ist jedoch kleiner als die Anzahl an Bauteilen der Referenzbaugruppe, muss die Referenzbaugruppe um Bauteile reduziert werden, sodass $\mu_1 = 1$ & $\mu_2 < 1$ (Fall 2) gilt. Umgekehrt gilt $\mu_1 < 1$ & $\mu_2 = 1$ (Fall 3), wenn die Referenzbaugruppe um Bauteile erweitert werden muss. Für den Fall, dass die Referenzbaugruppe sowohl um Bauteile reduziert als auch erweitert werden muss, gilt demnach $\mu_1 < 1$ & $\mu_2 < 1$ (Fall 4). Dieses Vorgehen ist für alle Baugruppen des zu planenden Auftrags zu wiederholen. Die Baugruppen werden abschließend entsprechend der geplanten Verbaurestriktionen miteinander verknüpft (Montageplan).

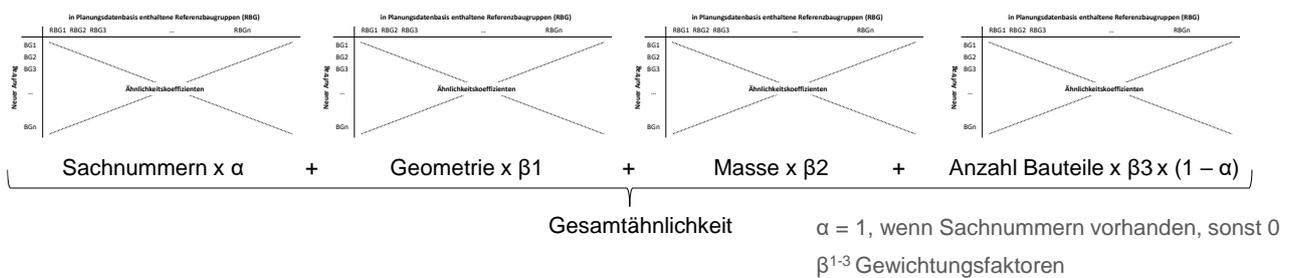


Abbildung 4.2: Berechnung der Gesamtähnlichkeit mit Hilfe von Ähnlichkeitsmatrizen

4.3 Anwendungsrahmen der standardisierten Materialbereitstellung

In diesem Kapitel wird der Anwendungsrahmen der Planungssystematik für die standardisierte Materialbereitstellung in der komplexen, variantenreichen Großgerätemontage mit geringen Stückzahlen vorgestellt. Die Basis der Planungssystematik stellen die in Kapitel 4.1 adaptierten Materialbereitstellungsmethoden und die in Kapitel 4.2 entwickelte Datenbasis dar, auf der aufbauend die einzuhaltende Montagereihenfolge bestimmt wird. Mit Hilfe dieser wird anschließend ein Materialbereitstellungsplan entwickelt, der in Abhängigkeit von den unternehmensindividuellen Flächenrestriktionen die Materialbereitstellungszyklen und die Materialanordnung determiniert.

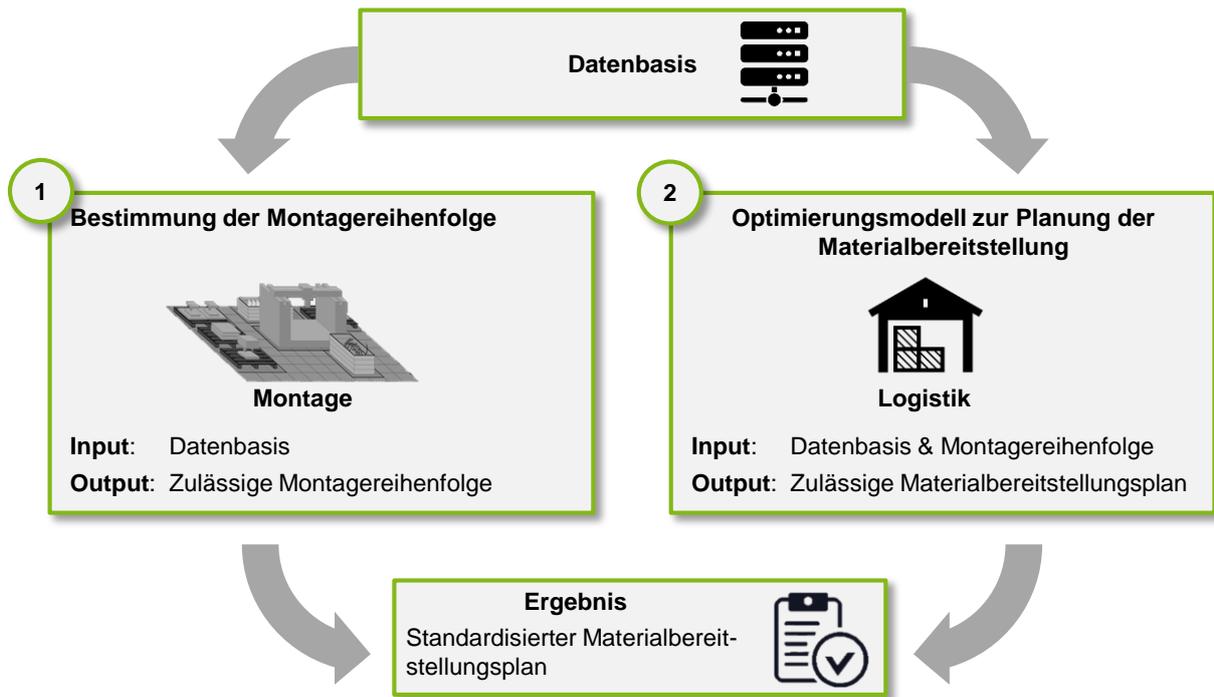


Abbildung 4.3: Planungssystematik zur standardisierten Materialbereitstellung

Da die Flächenanforderungen und -kapazitäten je nach Unternehmen und Produkt variieren, muss die Planungssystematik hinsichtlich des Layouts flexibel anpassbar sein. In Abbildung 4.4 sind beispielhafte Layouts dargestellt, die im Rahmen der Planungssystematik realisierbar sind.

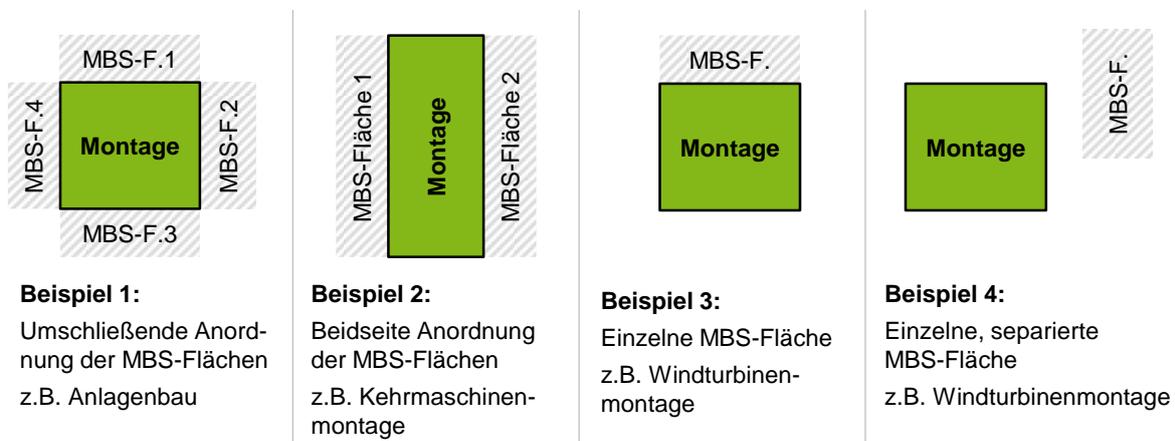


Abbildung 4.4: Beispiellayouts

Einhergehend mit den Flächenanforderungen und -kapazitäten ist zudem die unternehmensindividuelle Materialbereitstellungsstrategie zu berücksichtigen. Hierzu wurden auf Basis der Fachliteratur sowie mit Hilfe von Experteninterviews die in Abbildung 4.5 dargestellten Materialbereitstellungsstrategien identifiziert, die im Folgenden erläutert werden.

1. Einzelkommissionierung des Gesamtauftrags

Bei der Einzelkommissionierung des Gesamtauftrags wird das gesamte Material eines Auftrags zu Montagebeginn auf einer dafür vorgesehenen Fläche bereitgestellt. In der Folge geht diese Strategie mit einem hohen Flächenbedarf und einer geringen Materialbereitstellungsfrequenz (einmalige Bereitstellung) einher.

2. Materialbereitstellung bei beschränkter Fläche

Die Materialbereitstellung bei beschränkter Fläche basiert auf der Restriktion, dass die verfügbare Fläche aufgrund von anderen Aufträgen oder baulichen Gebäude restriktionen eingeschränkt ist. In der Folge muss die Materialbereitstellung in z Kommissionieraufträge Z_{MBS} mit $MBS = (1, \dots, z)$ aufgeteilt werden, sodass die verfügbare Materialbereitstellungsfläche zu keinem Zeitpunkt überschritten wird. Die resultierende Materialbereitstellungsfrequenz hängt demnach direkt von der Anzahl gebildeter Kommissionieraufträge ab.

3. Materialbereitstellung einer definierten Materialreichweite

Die dritte identifizierte Strategie besteht in der Bereitstellung definierter Materialreichweiten. Ein Kommissionierauftrag umfasst jeweils die Anzahl an Baugruppen bzw. Prozessen, deren zeitlicher Montagearbeitsinhalt der definierten Materialreichweite entspricht. Der dafür erforderliche Flächenbedarf hängt zum einen von der Anzahl an Baugruppen pro Kommissionierauftrag und zum anderen von den Abmessungen der bereitzustellenden Baugruppen ab.

4. Baugruppenweise Materialbereitstellung

Die baugruppenweise Bereitstellung des Materials weist Parallelen zum Just-in-Time-Prinzip auf und ist in der Großgerätemontage eine eher theoretische Strategie, die nur selten angewendet wird. Jede Baugruppe wird über einen eigenen Kommissionierauftrag bereitgestellt, sodass diese Strategie mit einem sehr geringen Flächenbedarf einhergeht. Gleichzeitig geht die baugruppenweise Materialbereitstellung jedoch mit einer hohen Materialbereitstellungsfrequenz einher.

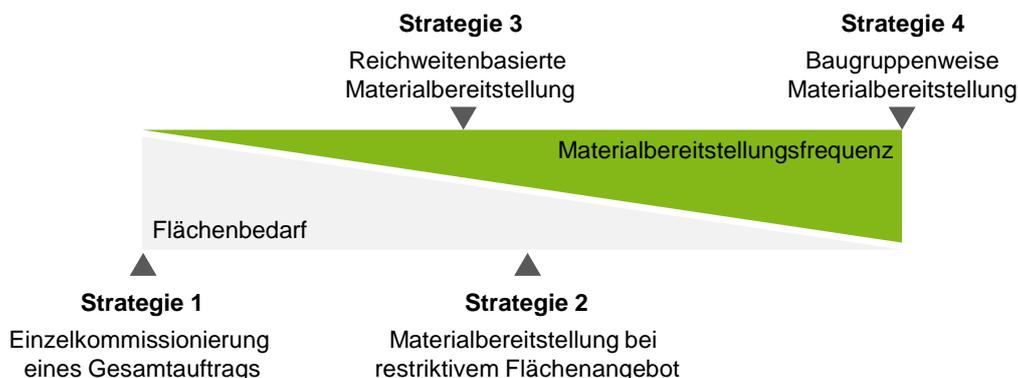


Abbildung 4.5: In der Planungssystematik berücksichtigte Materialbereitstellungsstrategien

Die Anordnung des Materials auf den Materialbereitstellungsflächen erfolgt OR-basiert mit Hilfe kombinatorischer Packungsprobleme.

Das Ziel der Operations Research (OR) ist die Übersetzung komplexer Entscheidungssituationen in mathematische Optimierungsprobleme zur Ableitung optimaler Handlungsempfehlungen und Planungsentscheidungen (Domschke et al. 2015, S. 1). Ein Optimierungsmodell besteht dazu aus

- einer Zielfunktion,
- den einzuhaltenden Nebenbedingungen und
- definierten Entscheidungsvariablen, die hinsichtlich eines Gütekriteriums zu optimieren sind.

(Gerdtts und Lempio 2011, S. 1ff.)

Je nach Lösbarkeit des Optimierungsmodells werden diese in die Hauptklassen ‚P‘ und ‚NP‘ unterschieden. Zwar konnte mathematisch bereits nachgewiesen werden, dass die Klasse P eine Teilmenge der Klasse NP darstellt, jedoch konnte nicht nachgewiesen werden, dass die Klasse NP auch eine Teilmenge der Klasse P ist. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde daher die in der Mathematik übliche Annahme $P \neq NP$ zu Grunde gelegt. Während Probleme der Klasse P in polynomialer Zeit lösbar sind, sind NP-schwere Probleme nicht in polynomialer Zeit lösbar. (Wanka 2006, S. 1ff.)

Kombinatorische Packungsprobleme stellen eine wichtige Teildisziplin der OR-Verfahren dar, die ein großes Potenzial zur Anordnung des Materials auf den Materialbereitstellungsflächen bergen. Da Packungsprobleme der Klasse NP zugeordnet sind, werden diese aufgrund ihres sehr hohen Rechenaufwands i. d. R. nicht optimal, sondern heuristisch gelöst. (Domschke et al. 2015, S. 127)

Packungsprobleme adressieren in der Praxis ein breites Anwendungsspektrum (Puchinger 2011b, S. 18). Klassische Anwendungsbeispiele sind die Minimierung von Lagerflächen in der Logistikplanung, die Maximierung des Füllgrads von Frachtcontainern, die Anordnung von Ladungsträgern beim innerbetrieblichen Milkrun (Droste 2013), die Verschnittminimierung bei der Stahlproduktion (Puchinger 2011a, S. 18) oder die Platzierung von Artikeln auf Zeitungsseiten (Lodi et al. 2002, S. 241). Je nach Anwendungsszenario sind dabei zwei- und dreidimensionale Packungsproblemen zu unterscheiden (Ortmann et al. 2010, S. 306). Das Ziel zweidimensionaler Packungsprobleme ist die Anordnung von ‚kleinen Rechtecken‘ in ‚großen Rechtecken‘ (z. B. Verschnittoptimierung), wobei die Höhe der Rechtecke keine Relevanz hat und somit nicht berücksichtigt wird (Puchinger 2011a, S. 18). Ist auch die Höhe der Rechtecke relevant, handelt es sich um ein dreidimensionales Packungsproblem (z. B. das Packen eines Frachtcontainers) (Li und Cheng 1990, S. 847). Da die Höhe bei der Anordnung von Material in einer Montagehalle aufgrund der i. d. R. angewendeten Bodenlagerung zu vernachlässigen ist, wurde in SySMaG lediglich das zweidimensionale Strip Packing betrachtet

und für die kleinen Rechtecke der Begriff ‚Rechtecke‘ und für die großen Rechtecke der Begriff ‚Fläche‘ verwendet. Die Fläche eines Packungsproblems ist dabei über die Breite B und die Höhe H definiert (s. Abbildung 4.6).

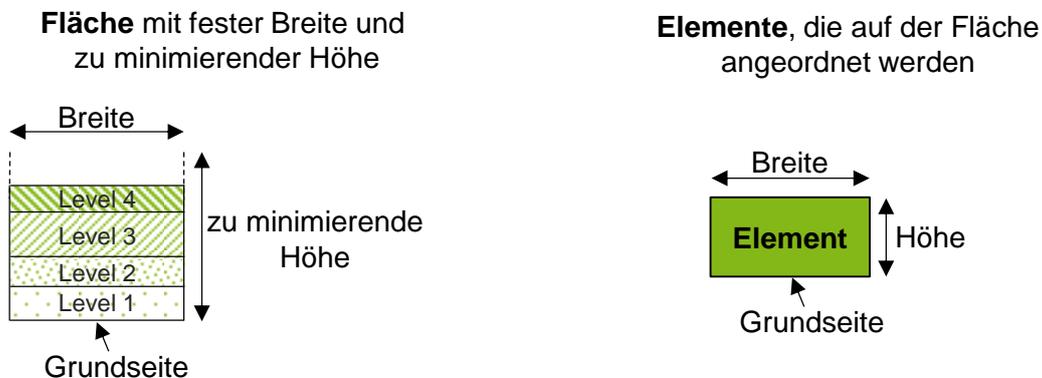


Abbildung 4.6: Schaubild zur Beschreibung der Fläche und der Elemente

Die Packungsprobleme sind grundsätzlich in folgende drei Problemarten zu unterscheiden (Puchinger 2011a, S. 18):

- **Bin Packing:** Anordnung einer Menge an Elementen auf Flächen mit fester Breite und mit dem Ziel, die Anzahl an erforderlichen Flächen zu minimieren.
- **Strip Packing:** Anordnung einer Menge an Elementen ist auf einer Fläche mit fester Breite mit dem Ziel, die erforderliche Höhe der Fläche zu minimieren.
- **RPAMP:** Eine Menge an Elementen ist so anzuordnen, dass der resultierende Flächeninhalt minimal ist.

Aufgrund der angeführten Optimierungsziele bieten vor allem die Strip Packing Verfahren ein großes Potenzial, um Materials bei der Materialbereitstellung in der Großgerätemontage flächenoptimalen anzuordnen.

4.4 Verfahrensauswahl zur Anordnung des Materials im Rahmen der Layoutplanung

Wie zuvor beschrieben besteht das Ziel des Strip Packing Verfahrens in der höhenminimalen Anordnung von Elementen auf einer Fläche mit definierter Breite. Dabei gilt eine Lösung als zulässig, wenn

- die anzuordnenden Rechtecke sich nicht überlappen,
- die Rechteckseiten parallel zu den Flächenseiten ausgerichtet sind und
- die vorgegebene Flächenbreite nicht überschritten wird. (Han et al. 2007, S. 358)

Je nach Vorgehenslogik sind die Strip Packing Verfahren in Levelverfahren, Pseudolevelverfahren und Plane Verfahren zu unterteilen.

Die Basis nahezu aller weiteren Verfahren bilden die Next Fit-, die First Fit- und die Best Fit Heuristiken, die zu den Levelverfahren gehören. Die Next Fit Heuristik ist die einfachste Anordnungsheuristik und besteht aus zwei Anordnungsschritten:

1. Erstellung einer Liste mit allen anzuordnenden Elementen und Sortierung der Liste nach absteigender Höhe der Elemente
2. Anordnung der Elemente nach ihrer Reihenfolge auf der Fläche. Reicht die auf der Fläche verfügbare Breite nicht mehr zur Anordnung des nächsten Elements aus, wird ein neues Level eröffnet und entsprechend fortgefahren.

Die Höhe der einzelnen Level wird demnach durch die Höhe des pro Level größten Elements definiert. Die Vorgehensweise der Next Fit Heuristik ist in Abbildung 4.7 als Ablaufdiagramm dargestellt. (Coffman und Shor 1990, S. 810)

Eine Weiterentwicklung der Next Fit Heuristik ist die First Fit Heuristik, bei der im Vergleich zur Next Fit Heuristik Elemente der Liste übersprungen werden dürfen, um eine bessere Packdichte zu erreichen. Die First Fit Heuristik besteht dazu aus drei Schritten:

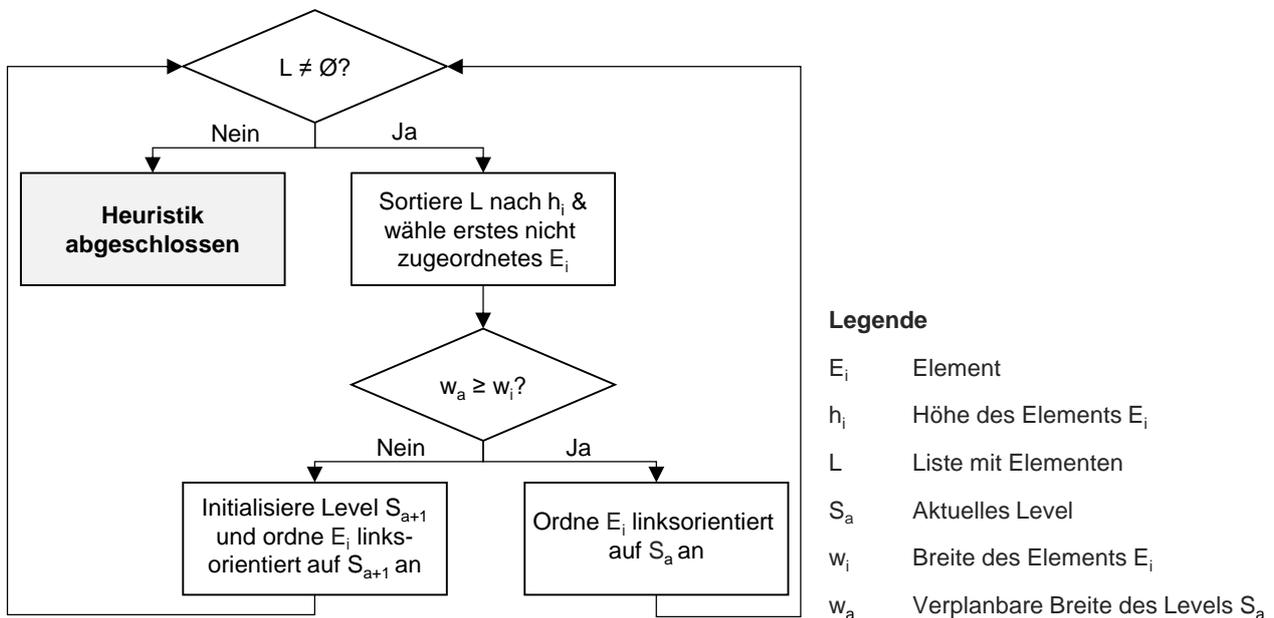


Abbildung 4.7: Ablaufdiagramm der Next Fit Heuristik (i. A. a. Coffman und Shor 1990, S. 810)

1. Erstellung einer Liste mit allen anzuordnenden Elementen und Sortierung der Liste nach absteigender Höhe der Elemente
2. Identifizierung des nächsten Elements der Liste, das auf der verfügbaren Breite des Levels angeordnet werden kann.

3. Kann kein weiteres Element auf einem Level mehr angeordnet werden, wird ein neues Level eröffnet und mit Schritt 2 fortgefahren.

Die Vorgehensweise der First Fit Heuristik ist in *Abbildung 4.8* als Ablaufdiagramm dargestellt. (Coffman und Shor 1990, S. 810)

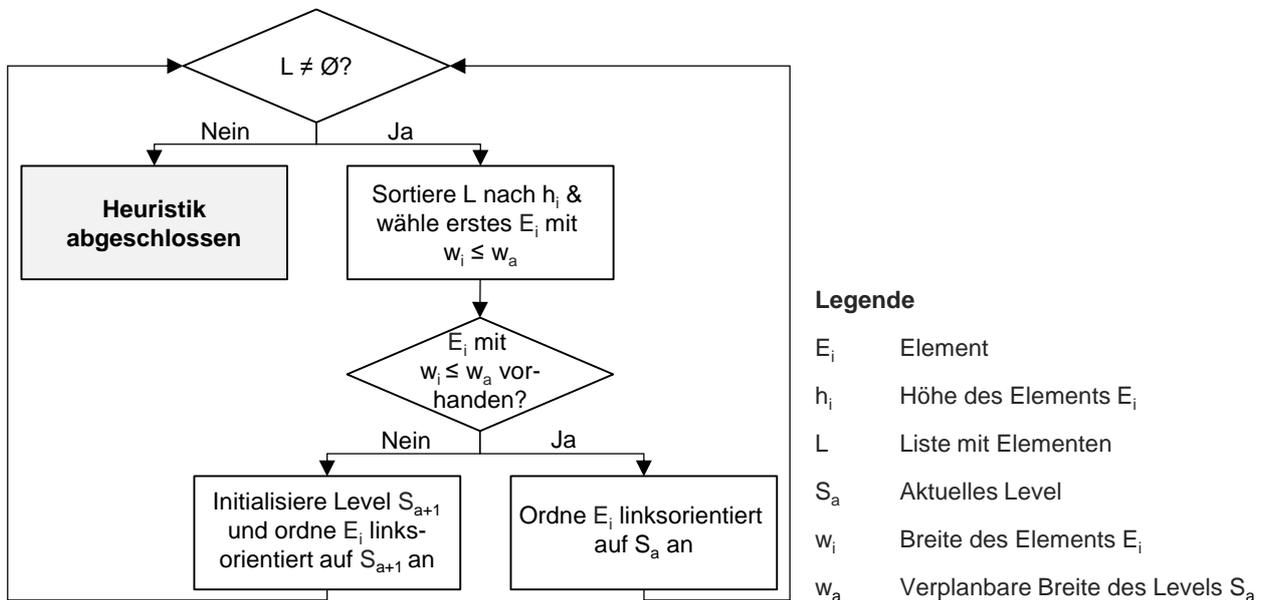


Abbildung 4.8: Ablaufdiagramm der First Fit Heuristik (i. A. a. Coffman und Shor 1990, S. 810)

Die beste Packdichte bzw. geringste Levelhöhe wird mit Hilfe der Best Fit Heuristik erreicht. Entsprechend ihrer Vorgehenslogik wird ein Element dabei jeweils auf dem Level platziert, auf dem es zu der geringsten verbleibenden Restfläche führt. Entgegen der Next Fit- und First Fit Heuristik sind dabei stets alle Level zur Anordnung eines Elements verfügbar. Die Best Fit Heuristik besteht aus folgenden zwei Schritten, die in *Abbildung 4.9* zudem als Ablaufdiagramm dargestellt sind:

1. Erstellung einer Liste mit allen anzuordnenden Elementen und Sortierung der Liste nach absteigender Höhe der Elemente
2. Anordnung des nächsten Elements auf dem Level, auf dem nach der Anordnung die geringste verbleibende Restfläche resultiert.

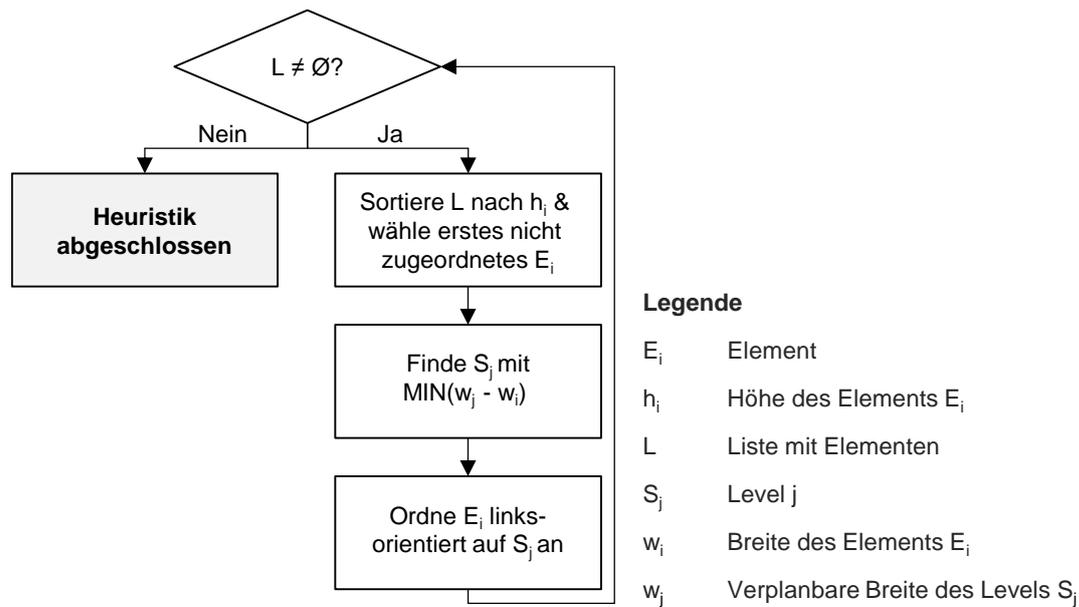


Abbildung 4.9: Ablaufdiagramm der Best Fit Heuristik (i. A. a. Coffman und Shor 1990, S. 810)

Entsprechend dem angewendeten Levelverfahren variiert die Lösungsgüte sowohl hinsichtlich der minimalen Flächenhöhe als auch hinsichtlich der Packdichte. In Abbildung 4.10 ist für einen Testdatensatz das jeweilige Ergebnis bei Anwendung der drei vorgestellten Levelverfahren dargestellt.

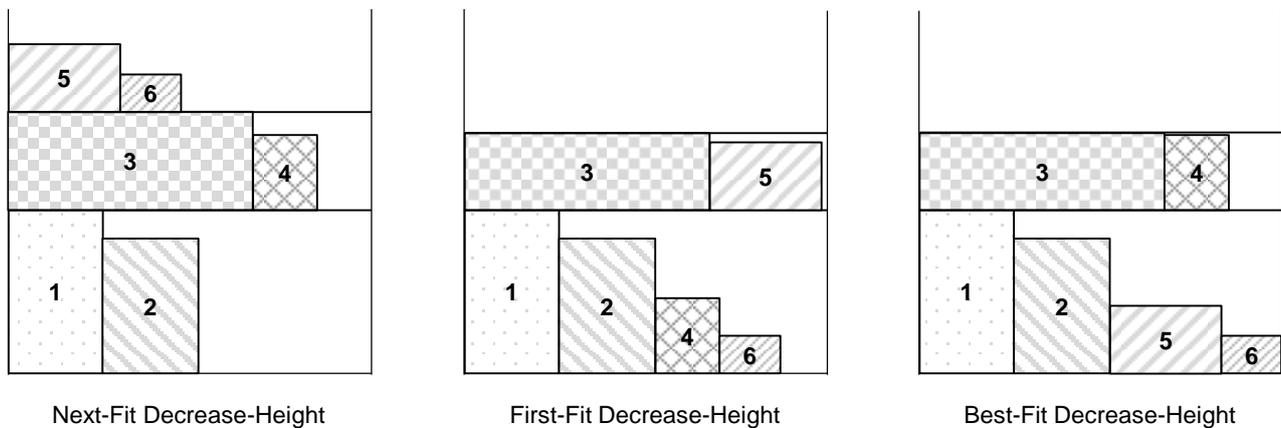


Abbildung 4.10: Beispielergebnisse bei Anwendung der verschiedenen Levelverfahren

Anhand der Beispielergebnisse wird ersichtlich, dass die Levelverfahren üblicherweise mit einer geringen Packdichte einhergehen. Verfahren, mit deren Hilfe die Packdichte maximiert wird, sind die Pseudolevel- und Plane Verfahren. Das Ziel der Pseudolevel Verfahren ist die Verbesserung der Packdichte bzw. Reduzierung der erforderlichen Flächenhöhe durch Anordnung von Elementen in verbleibenden Leerräumen. Ein Vergleich der besten Strip Packing Verfahren ist bei Ortman (2010) zu finden, der die 252 bekanntesten Strip Packing Verfahren auf 1170 Benchmark-Testinstanzen anwendet. Die Verfahren mit den besten Zielfunktionswerten sind demnach der SC- und der SL_5 -Algorithmus.

Ausgangspunkt des SC-Algorithmus ist das Sortieren der Elementliste nach der Höhe der Elemente sowie sekundär nach ihrer Breite. Die Initialisierung und Anordnung der grundgebundenen Elemente erfolgt mittels der First Fit Logik. Können keine weiteren Elemente auf der Grundseite des Levels angeordnet werden, beginnt die Anordnung von Elementen unter der oberen Levelgrenze. Dazu wird zuerst das höchste Element rechtsorientiert unter der oberen Levelgrenze platziert und anschließend geprüft, ob ein weiteres Element unterhalb von diesem Element platzierbar ist. Bei erfolgreicher Prüfung, ist weiterhin zu untersuchen, ob ein weiteres Element existiert, das entweder neben und/ oder unter dem vorherigen Element platzierbar ist. Dieser Vorgang ist solange rekursiv durchzuführen, bis kein weiteres Element auf dem aktuellen Level platziert werden kann, sodass ein neues Level eröffnet werden muss. (Ortmann 2010, S. 309)

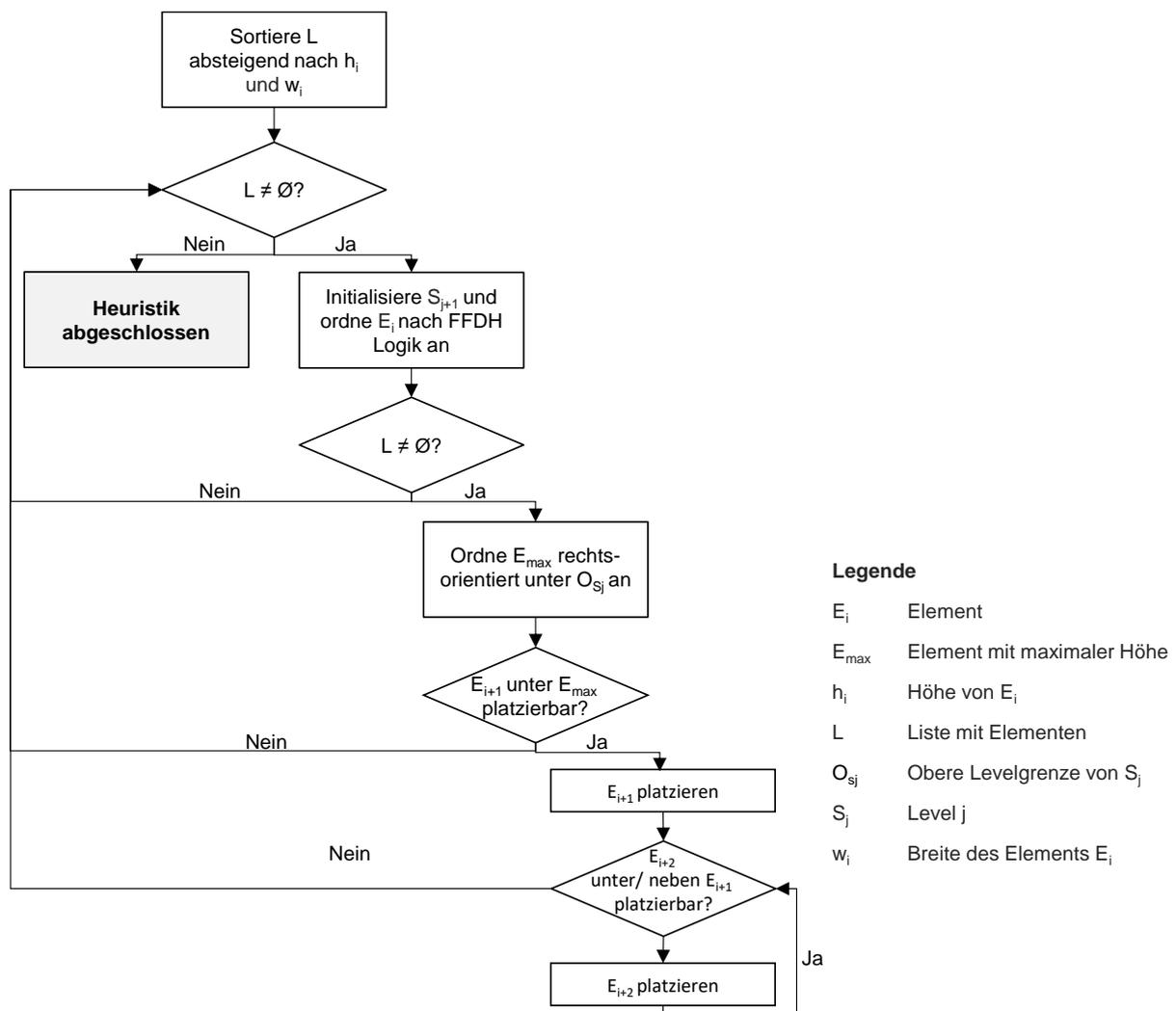


Abbildung 4.11: Ablaufdiagramm des SC Algorithmus (Ortmann et al. 2010, S. 309)

Der Ausgangspunkt des SL_5 Algorithmus ist die Sortierung der Elementliste nach absteigender Elementhöhe sowie sekundär nach der Elementbreite. Die initiale Anordnung der Elemente erfolgt anschließend grundgebunden nach der BFDH Logik in Blöcken (s. Abbildung 4.13), deren Größe durch einen Proportionalitätsfaktors δ definiert wird. Der Proportionalitätsfaktor gibt dabei die maximale

Differenz an, die die Höhe des ersten Elements eines Blocks und die Höhe des letzten Elements eines Blocks haben dürfen. Die Einhaltung dieses Proportionalitätsfaktors ist bei jeder Elementplatzierung zu prüfen und bei Überschreitung des Proportionalitätsfaktors ein Block als abgeschlossen zu definieren. Anschließend beginnt der Stapelvorgang, im Rahmen dessen das verfügbare Rechteck zwischen dem Block und der oberen Levelgrenze zu berechnen und mittels der FFDH Logik zu füllen ist. Nach Abschluss des Stapelvorgangs wird mit der Bildung eines neuen Blocks fortgefahren. In Abbildung 4.12 ist das Ablaufdiagramm des SL5-Algorithmus dargestellt. (Ortmann 2010, S. 65)

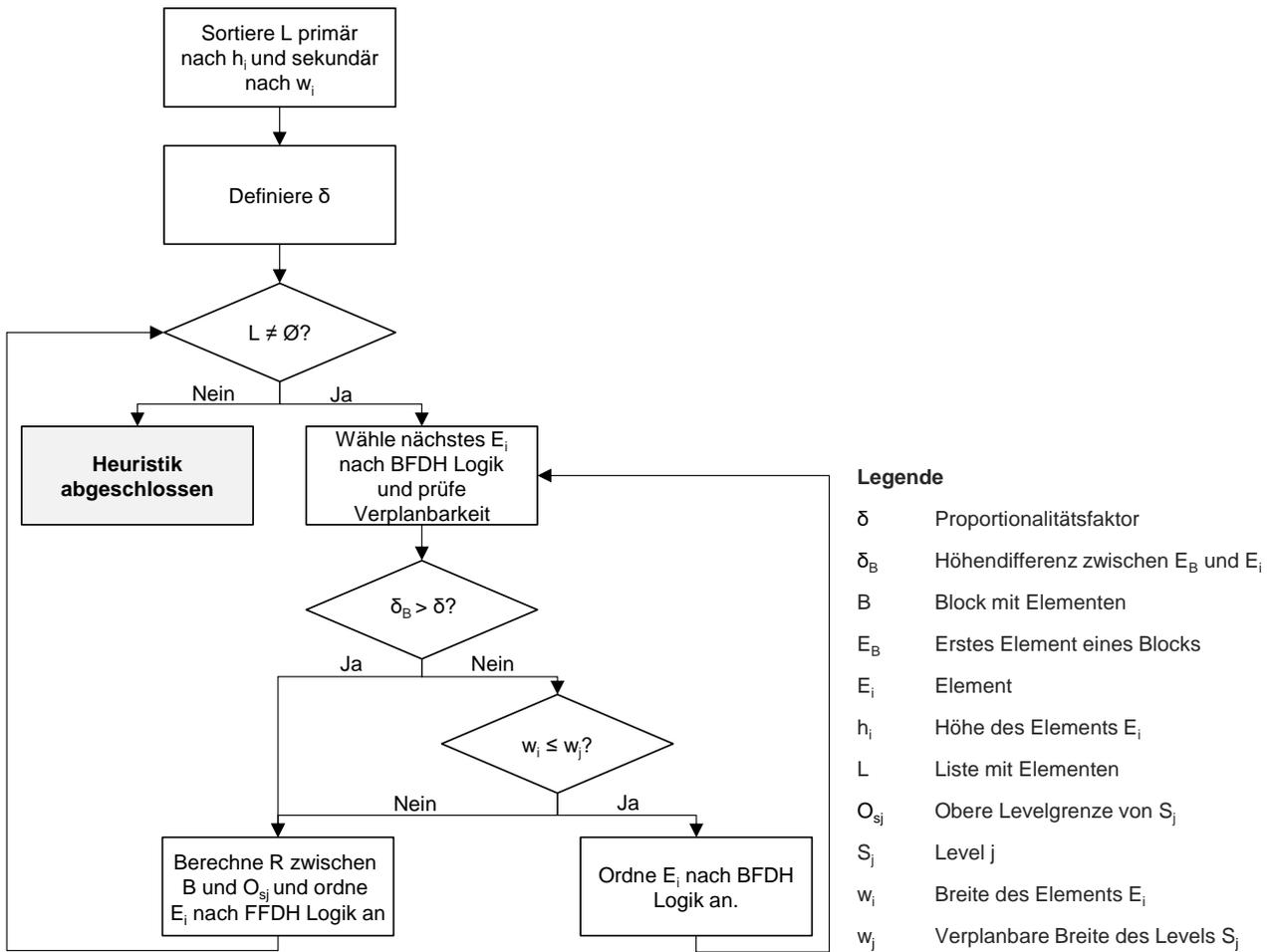


Abbildung 4.12: Ablaufdiagramm des SL5-Algorithmus (i. A .a. Ortmann 2010, S. 65)

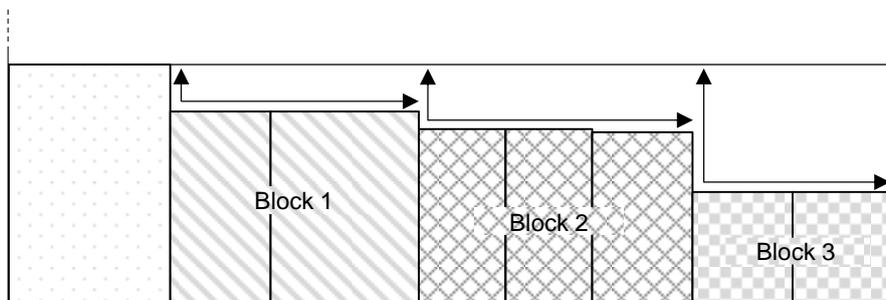


Abbildung 4.13: Beispielhafte Blockbildung im Rahmen des SL5-Algorithmus

Zwar werden mit dem SL_5 -Algorithmus und dem SC-Algorithmus im Vergleich zu den vorgestellten Levelverfahren bessere Packdichten und geringere Flächenhöhen erreicht, aufgrund der Stapelvorgänge ist das Material jedoch nicht dauerhaft zugänglich. Im Störfall wären Änderungen hinsichtlich der Montagereihenfolge aufgrund dieser Problematik nur bedingt umsetzbar, sodass im Rahmen der entwickelten Planungssystematik der SL_5 -Algorithmus und der SC-Algorithmus zu einem neuen Strip Packing Verfahren (SP-MBS) weiterentwickelt wurden, das diese Problematik umgeht.

Der SP-MBS Algorithmus

Der Ausgangspunkt des SP-MBS Algorithmus ist die Erstellung einer Liste, die das anzuordnende Material enthält und aufsteigend nach dem Verbaupunkt sortiert ist. Erster Anordnungsschritt ist die Befüllung der Grundseite eines Levels nach der First Fit Logik. Ist kein weiteres Element auf einem Level platzierbar, wird mit dem Stapelvorgang begonnen. Dieser sieht die Anwendung der First Fit Logik vor, mit deren Hilfe die Elemente rechtsorientiert unter der Levelobergrenze angeordnet werden. Um die dauerhafte Zugänglichkeit aller Elemente sicherzustellen, sind weitere Stapelvorgänge, wie sie beim SL_5 - oder SC-Algorithmus erfolgen untersagt. Stattdessen wird ein neues Level eröffnet und entsprechend der SP-MBS-Logik fortgefahren. Zwischen den resultierenden Levelgrenzen ist zur Sicherstellung der dauerhaften Zugänglichkeit der Elemente stets ein Transportweg einzuplanen, dessen Breite A_{st} sich nach VDI 2198 anhand der Formel 4.7 berechnet.

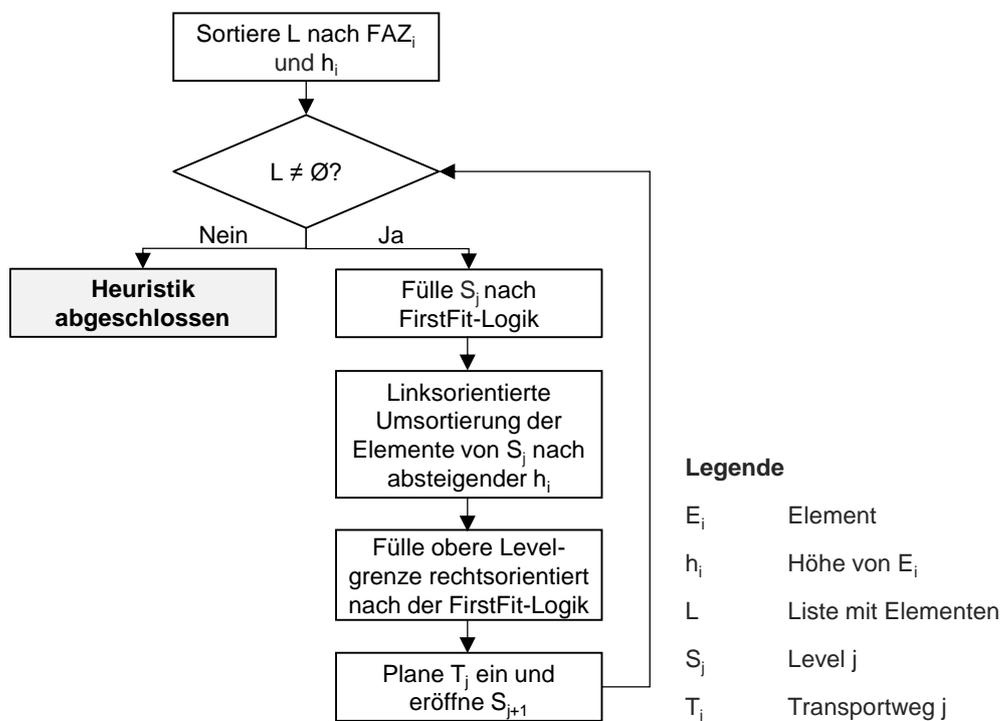


Abbildung 4.14: Ablaufdiagramm des SP-MBS Algorithmus

$$A_{st} = \text{Sicherheitsabstand} + \text{Lastlänge} + (\text{Hubwagenlänge} - \text{Gabellänge}) \quad 4.7$$

Das Ablaufdiagramm des SP-MBS Algorithmus ist in Abbildung 4.14 dargestellt.

Mit Hilfe des SP-MBS Algorithmus wird es möglich, die Strip Packing Verfahren so anzupassen, dass die Schwachstellen, aufgrund derer eine Anwendung dieser Verfahren zur Optimierung der Materialbereitstellung in der Großgerätemontage bisher nicht sinnvoll war, aufgehoben werden.

4.5 Operatives Steuerungskonzept für die Materialbereitstellung

Die Steuerung der Materialbereitstellung erfolgt aufbauend auf den in Kapitel 4.3 vorgestellten Materialbereitstellungsstrategien, über die die Planungssystematik in Abhängigkeit von den individuellen Rahmenbedingungen des jeweiligen Anwenders eingesetzt werden kann (Arbeitspaket 3.4). Den einzelnen Steuerungen liegt dabei eine regelmäßige Kommunikation des Montagefortschritts zugrunde, die z. B. in Form von zwei Regelkommunikationen pro Tag mit Teilnehmern der Produktion, der Beschaffung und der Logistik erfolgt. Ziel dieser Regelkommunikationen ist die kurzzyklische Reaktion auf positive sowie negative Abweichungen von der geplanten Durchlaufzeit oder auf eventuelle Fehlteile.

4.5.1 Strategie 1 - Einzelkommissionierung des Gesamtauftrags

Die Einzelkommissionierung des Gesamtauftrags, bei der das gesamte für einen Auftrag erforderliche Material zu Montagebeginn auf der Materialbereitstellungsfläche bereitgestellt wird, ist die in der Baustellenmontage am häufigsten angewendete Materialbereitstellungsstrategie. Einhergehend mit dieser Strategie liegt lediglich ein Materialbereitstellungszeitpunkt vor, gleichzeitig geht diese Materialbereitstellungsstrategie jedoch mit einem sehr hohen Flächenbedarf einher (s. Abbildung 4.15).



Abbildung 4.15: Strategie 1 - Einzelkommissionierung des Gesamtauftrags

Den Ausgangspunkt der Einzelkommissionierung des Gesamtauftrags stellt die Festlegung der geplanten Montagereihenfolge dar, die festlegt welcher Mitarbeiter zu welchem Zeitpunkt auf welcher Montageobjektseite Arbeitsinhalte ausführt. Ist die Bildung der Montagereihenfolge abgeschlossen, wird diese als wichtiger Input zur Anordnung des Materials auf der Fläche genutzt, die mit Hilfe des entwickelten SP-MBS Algorithmus erfolgt.

4.5.2 Strategie 2 - Materialbereitstellung bei restriktivem Flächenangebot

Die zweite Materialbereitstellungsstrategie findet Anwendung, wenn das Flächenangebot zur Materialbereitstellung beschränkt ist. Analog zur Einzelkommissionierung des Gesamtauftrags besteht der erste Schritt der Materialbereitstellung bei restriktivem Flächenangebot in der Bestimmung der Montagereihenfolge. Da aufgrund der Flächenbeschränkung jedoch keine Einzelkommissionierung möglich ist, muss die Materialbereitstellung in verschiedene Materialbereitstellungssequenzen unterteilt werden. Dies geht mit einer erhöhten Materialbereitstellungsfrequenz einher, deren Frequenz von der verfügbaren Fläche abhängig ist (s. Abbildung 4.16).



Abbildung 4.16: Strategie 2 - Materialbereitstellung bei restriktivem Flächenangebot

Zur Definition der Materialbereitstellungsfrequenz ist für jede Montageobjektseite sukzessive diejenige Anzahl an Bauteilen zu identifizieren, die in einer Sequenz bereitgestellt werden können, ohne die Flächenrestriktion zu verletzen. Dazu wird die Montagereihenfolge pro Montageobjektseite in eine Liste überführt, die aufsteigend nach dem Verbauzeitpunkt sortiert ist. Beginnend mit dem ersten Bauteil wird jeweils das nächste Bauteil sukzessive ergänzt und der SP-MBS Algorithmus angewendet, um zu prüfen, ob der resultierende Flächenbedarf erfüllbar ist. Dieses Vorgehen wird fortgesetzt, bis die Flächenrestriktion verletzt wird. Abhängig von der Anzahl an Materialbereitstellungsflächen resultieren aus dieser Vorgehensweise ein bis vier Materialbereitstellungspläne, die jeweils die Materialbereitstellungssequenzen der einzelnen Montageobjektseiten beinhalten.

4.5.3 Strategie 3 - Reichweitenbasierte Materialbereitstellung

Die dritte vorgestellte Materialbereitstellungsstrategie ist die Bereitstellung einer definierten Materialreichweite. Im Gegensatz zur Materialbereitstellung bei restriktivem Flächenangebot wird im Rahmen dieser Materialbereitstellungsstrategie die Materialbereitstellungsfrequenz vorgegeben und darüber der erforderliche Flächenbedarf berechnet, der sowohl von der definierten Reichweite als auch den Abmessungen der bereitzustellenden Baugruppen abhängig ist (s. Abbildung 4.17).



Abbildung 4.17: Strategie 3 - Reichweitenbasierte Materialbereitstellung

Der erste Schritt zur Planung der reichweitenbasierten Materialbereitstellung besteht in der Bestimmung der Montagereihenfolge, die in Materialbereitstellungssequenzen zu übersetzen ist, durch die

die angestrebte Materialreichweite eingehalten wird. Für jede Materialbereitstellungssequenz ist anschließend mit Hilfe des SP-MBS Algorithmus der erforderliche Flächenbedarf zu berechnen.

4.5.4 Strategie 4 - Baugruppenweise Bereitstellung

Die baugruppenweise Materialbereitstellung stellt die Vision hinsichtlich der Materialbereitstellung in der Großgerätemontage dar und erfordert einen hohen Einhaltungsgang der Montagereihenfolge und eine sehr hohe Bereitstellungsfrequenz. Da jedes Teil seinem Verbauzeitpunkt entsprechend bereitgestellt wird, geht sie jedoch mit einem sehr geringen Flächenbedarf einher (s. Abbildung 4.18).



Abbildung 4.18: Strategie 4 - Just in Time Materialbereitstellung

Zur Steuerung der montagefortschrittsgerechten Steuerung der baugruppenweisen Materialbereitstellung wurde das Konzept des Flächenkanbans entwickelt.

Der Ausgangspunkt des Flächenkanbans ist die Unterteilung jeder Materialbereitstellungsseite in zwei Materialbereitstellungsflächen (s. Abbildung 4.19, Nr. 3), sodass insgesamt bis zu acht Materialbereitstellungsflächen entstehen. Während eine Materialbereitstellungsfläche (z.B. 1A) aktiv ist, also das auf dieser Fläche bereitgestellte Material montiert wird, wird auf der zweiten Fläche (1B) das Material der nächsten Baugruppe bereitgestellt. Bei der Materialbereitstellung wird die Materialanordnung jeweils so gewählt, dass das als erstes erforderliche Material einer Baugruppe möglichst nah am Verbauort des Montageobjekts platziert wird. Auf diese Weise wird der Sekundäraufwand in Form von Suchzeiten und Laufwegen deutlich reduziert und eine standardisierte Material-Flächenzuordnung geschaffen.

Entsprechend der verfügbaren Logistikkapazität sind anschließend die minimal möglichen Zeitabstände für die Materialbereitstellungstakte (MBS-Takte) zu berechnen, in denen das Material während des Montageprozesses jeweils bereitgestellt werden kann. Dazu ist der pro Materialbereitstellungstakt erforderliche Zeitbedarf abzuschätzen und mit der verfügbaren Logistikkapazität zu verrechnen. Da es passieren kann, dass der berechnete MBS-Takt kleiner als die zur Montage einer Baugruppe erforderliche Montagezeit ist, ist der MBS-Takt anschließend noch einmal mit den Montagezeiten abzugleichen und gegebenenfalls so anzupassen, dass ein wirtschaftliches Verhältnis zwischen MBS-Takt und pro MBS-Takt ‚bereitgestellter Montagezeit‘ erreicht wird. Gleichzeitig wird durch die Definition des MBS-Takts festgelegt, welches Material zu welchem Zeitpunkt auf welcher Materialbereitstellungsfläche bereitgestellt werden muss (MBS-Plan).

Hilfe der Flächenkanbansteuerung wird die in der Baustellenmontage übliche Gesamtauftragskommissionierung sequenziert und das Material bedarfsgesteuert bereitgestellt.

4.6 Ableitung standardisierter Tätigkeitsbeschreibungen für die Materialbereitstellung

Eine wichtige Voraussetzung zur Sicherstellung einer effizienten Produktionslogistik ist die Berechnung der erforderlichen Logistikkapazitäten. Dazu wurde in SySMaG ein Tool zur Ableitung standardisierter Tätigkeitsbeschreibungen für die Materialbereitstellung entwickelt (Arbeitspaket 3.3). Den Ausgangspunkt dazu stellte die Definition eines Referenzprozess zur Materialbereitstellung in der Großgerätemontage dar, die mit Hilfe von vier interessierten Unternehmen durchgeführt wurde. Der hergeleitete Referenzmaterialbereitstellungsprozess ist in Abbildung 4.20 dargestellt.

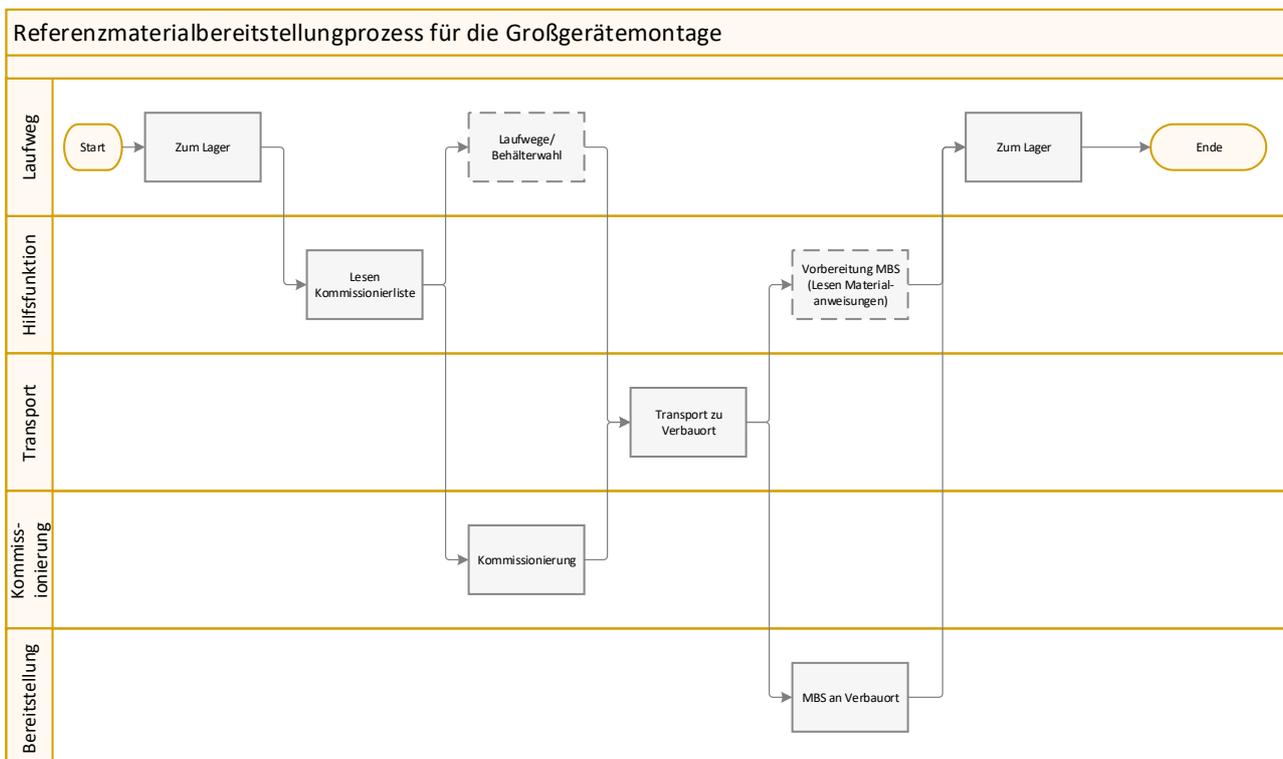


Abbildung 4.20: Referenzmaterialbereitstellungsprozess für die Großgerätemontage

Der Ausgangspunkt des Referenzmaterialbereitstellungsprozesses stellt der Laufweg des Logistikmitarbeiters zum entsprechenden Lagerbereich dar, in dem die Hilfsfunktionen des Lesens der Kommissionierliste bzw. der Vorbereitung des Kommissionierauftrags durchgeführt werden. Anschließend wird die eigentliche Kommissionierung des Materials durchgeführt, die sich aus der Kommissionierung, Laufwegen und der Auswahl der erforderlichen Behälter zusammensetzt. Nach Abschluss der Kommissionierung wird das Material an den Verbauort transportiert und dort bereitgestellt. Letzter Prozess des Referenzmaterialbereitstellungsprozesses ist ein erneuter Lauf- bzw. Fahrweg zurück zum Lager.

Aufbauend auf diesem Referenzprozess wurden die einzelnen Tätigkeiten des Referenzmaterialbereitstellungsprozesses näher spezifiziert (s. Tabelle 4.3) und in ein Tool überführt. Zur Anwendung des Tools im Unternehmen sind die einzelnen Tätigkeitsschritte durch das Unternehmen zeitlich individuell zu quantifizieren (z. B. durch MTM-UAS), sodass die Durchgängigkeit der unternehmensintern angewendeten Zeitermittlungsverfahren sichergestellt ist.

Ist die Quantifizierung abgeschlossen, kann mit Hilfe der Tätigkeitsbausteine sowie der zugehörigen Zeiten mit geringem manuellen Aufwand ein Standardarbeitsblatt für die Materialbereitstellung entworfen und der zur Bereitstellung erforderliche Logistikaufwand bemessen werden. Dazu sind in Abbildung 4.21 folgende Spalten auszufüllen:

- Tätigkeitscode und
- Meter bzw. Anzahl.

Tabelle 4.3: Spezifizierte Tätigkeiten des Referenzmaterialbereitstellungsprozesses

Tätigkeitsindex		
Allgemeine Tätigkeiten		
L1	Laufweg	Entfernung in Metern
L2	Lesen der Kommissionierliste	Entfernung in Metern
L3	Lesen der Materialbereitstellungsliste am Verbauort	Entfernung in Metern
Transport		
T1	Transport (Laufen mit Kiste klein)	Entfernung in Metern
T2	Transport (Laufen mit Kiste groß)	Entfernung in Metern
T3	Transport (Ameise)	Entfernung in Metern
T4	Transport (Schubwagen)	Entfernung in Metern
T5	Transport (Stapler)	Entfernung in Metern
T6	Transport (Rutenzug)	Entfernung in Metern
T7	Transport (Kran)	Entfernung in Metern
Kommissionierung		
K1	Leere Kiste holen	Anzahl an Kisten
K2	Kommissionierung (Material in Kiste)	Anzahl an Kisten
K3	Kommissionierung (Schüttgut in Kiste)	Anzahl an Kisten
K4	Kommissionierung Palette	Anzahl an Kisten
K5	Leere Kiste wegstellen	Anzahl an Kisten
K6	Material entpacken und Verpackungsmaterial entsorgen	Anzahl Entpackvorgänge
Materialbereitstellung		
A3	Kiste (klein) platzieren	Anzahl an Kisten
A4	Kiste (groß) platzieren	Anzahl an Kisten

5 Validierung der Planungssystematik

Die Validierung der entwickelten Planungssystematik wurde bei einem interessierten Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus durchgeführt. Das mittelständische Unternehmen umfasst über 4000 Mitarbeiter und generierte 2018 einen Umsatz größer 1 Mrd. Euro. Das Validierungsobjekt gehörte zu einem Auftrag mit drei identischen Produkten, sodass im Rahmen der Validierung zwei Prozessaufnahmen durchgeführt wurden. Im ersten Schritt wurde der Ist-Zustand bei der Montage aufgenommen (s. Kapitel 5.2). Anschließend wurde die Materialanordnung mit Hilfe des SP-MBS Algorithmus geplant und für die darauf basierende Montage ebenfalls eine Prozessaufnahme durchgeführt (s. Kapitel 5.3).

5.1 Überführung der Planungssystematik in IT-Demonstrator

Zur zielgerichteten Validierung der entwickelten Planungssystematik wurden die einzelnen Module der Planungssystematik in IT-Demonstratoren überführt (s. Abbildung 5.1).

Planungsdatenbasis



SP-MBS Algorithmus



Tätigkeitsbeschreibung



Abbildung 5.1: Programmierumgebunden der IT-Demonstratoren

Planungsdatenbasis

Die Planungsdatenbasis zur Nutzung auftragsübergreifender Ähnlichkeiten wurde mit Hilfe eines Excel-VBA-Tools umgesetzt. Auf diese Weise wird die breite Anwendbarkeit des Tools sichergestellt und eine Kompatibilität zu gängigen ERP-Systemen gewährleistet. Zur Nutzung der Planungsdatenbasis ist die Datenbasis mit abgeschlossenen Aufträgen zu befüllen, auf deren Basis die Ähnlichkeit zu einem neuen Auftrag analysiert wird. Nach der Übertragung der Planungscharakteristika des neuen Auftrags kann die Ähnlichkeitsanalyse automatisiert durchgeführt werden. Als Ergebnis erhält der Anwendung zum einen die ähnlichste Baugruppe und zum anderen den entsprechenden Anwendungsfall, der angibt, ob die identifizierte Referenzbaugruppe zu erweitern oder zu reduzieren ist.

SP-MBS Algorithmus

Der SP-MBS Algorithmus zur Anordnung des Materials auf der Materialbereitstellungsfläche wurde in Java und Excel umgesetzt. Die Dateneingabe erfolgt mit Hilfe einer Exceltabelle, in die für jede bereitzustellende Baugruppe bzw. für jedes bereitzustellende Bauteil

- die Länge und Breite des Bereitstellungsmittels des Bauteils bzw. der Baugruppe und
- der Verbauzeitpunkt anzugeben sind.

Die Berechnung der Materialanordnung erfolgt anschließend mit Hilfe eines programmierten Java-tools, das auf die Excelliste zurückgreift und die darin enthaltenen Bauteile bzw. Baugruppen entsprechend dem SP-MBS Algorithmus anordnet. Ausgegeben wird die Materialanordnung ebenfalls über eine Exceltabelle.

Standardisierte Tätigkeitsbeschreibung

Die Erzeugung der standardisierten Tätigkeitsbeschreibung erfolgt analog zur Planungsdatenbasis mit Hilfe eines Excel-VBA-Tools, in dem lediglich die durchzuführenden Tätigkeiten sowie deren Anzahl und Entfernungen einzutragen sind. Auf Basis dieser Informationen wird anschließend die Tätigkeitsbeschreibung erzeugt und die einzelnen Tätigkeiten zeitlich quantifiziert.

5.2 Dokumentation des Ist Zustands

Die Validierungsobjekte werden aufgrund ihrer Abmessungen sowie ihres Gewichts nach dem Baustellenprinzip montiert, ihre Funktionsfähigkeit geprüft und vor dem Versand an den Kunden erneut demontiert. Die betrachteten Validierungsobjekte umfassten jeweils 40 zu montierende Baugruppen bzw. Bauteile (s. Tabelle 5.1), deren Montagevorranggraph in Abbildung 5.3 dargestellt ist. Einige Baugruppen wurden in Vormontageprozessen vormontiert, sodass im Rahmen der Materialbereitstellung lediglich die Bereitstellung der vormontierten Baugruppe betrachtet wurde. Die Materialbereitstellung erfolgte als Einzelkommissionierung des Gesamtauftrags und entspricht demnach der Materialbereitstellungsstrategie 1 (s. Abbildung 5.2). Das zur Montage erforderliche Material wird dabei von der Logistik auf einer definierten Materialbereitstellungsfläche bereitgestellt und von dort im Bedarfsfall durch den Montagemitarbeiter zum Montageobjekt transportiert.



Abbildung 5.2: Im Validierungsbeispiel angewendete Materialbereitstellungsstrategie

Unter Berücksichtigung der Vorrangbeziehungen ergibt sich die in Tabelle 5.1 dargestellte Verbau-reihenfolge für die Baugruppen und Bauteile des Validierungsobjekts. Zudem sind in Tabelle 5.1 für jedes Bauteil bzw. jede Baugruppe die Bearbeitungszeit in Minuten und die Breite bzw. Länge der zum Bauteil bzw. zur Baugruppe gehörenden Bereitstellungsmittel angegeben.

Tabelle 5.1: Montageinformationen des Validierungsprodukts

Baugruppe	Vorgänger	Verbauzeit- punkt	Bearbeitungszeit [min]	Breite [m]	Länge [m]
Start		0	0	0	0
2	Start	0	12	1,8	1
16	Start	0	8	1,8	1
17	Start	0	8	1,8	1
10	Start	0	8	1,3	0,8
11	Start	0	7	1,3	0,8
19	Start	0	5	0,6	1
18	Start	0	4	0,5	1
20	Start	0	4	0,5	1
21	Start	0	7	0,5	1
12	Start	0	4	0,5	0,5
13	Start	0	3	0,5	0,5
14	Start	0	13	0,46	0,33
15	Start	0	12	0,46	0,33
8	Start	0	8	0,45	0,22
9	Start	0	7	0,45	0,22
3	Start	0	8	0,3	0,16
4	Start	0	18	0,3	0,16
5	Start	0	16	0,3	0,16
6	Start	0	14	0,3	0,16
7	Start	0	16	0,3	0,16
29	19	5	9	4,97	1,22
22	12	5	10	1,8	1,3
23	13	5	36	1,8	1,3
28	3, 19	10	16	4,85	1,28
32	16, 17	10	22	2,56	1,06
26	9, 19, 20, 21	10	16	1,99	1,78
24	8, 18	10	40	1,4	1
41	2	15	10	0,89	0,65
25	4, 19, 20, 21	20	13	1,26	1,05
33	24	30	3	1	1
40	32	30	3	0,7	0,7
31	5, 7, 15, 26	35	25	2,5	1,5
27	26	35	17	1,08	1,03
34	26	35	2	1	1
36	26	35	3	1	1
39	26	35	4	1	1
30	4, 6, 14, 25	40	35	1,5	1,2
35	25	40	5	1	1
37	25	40	3	1	1
38	27	55	2	1	1
Ende	10, 11, 22, 23, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41	0	0	0	0

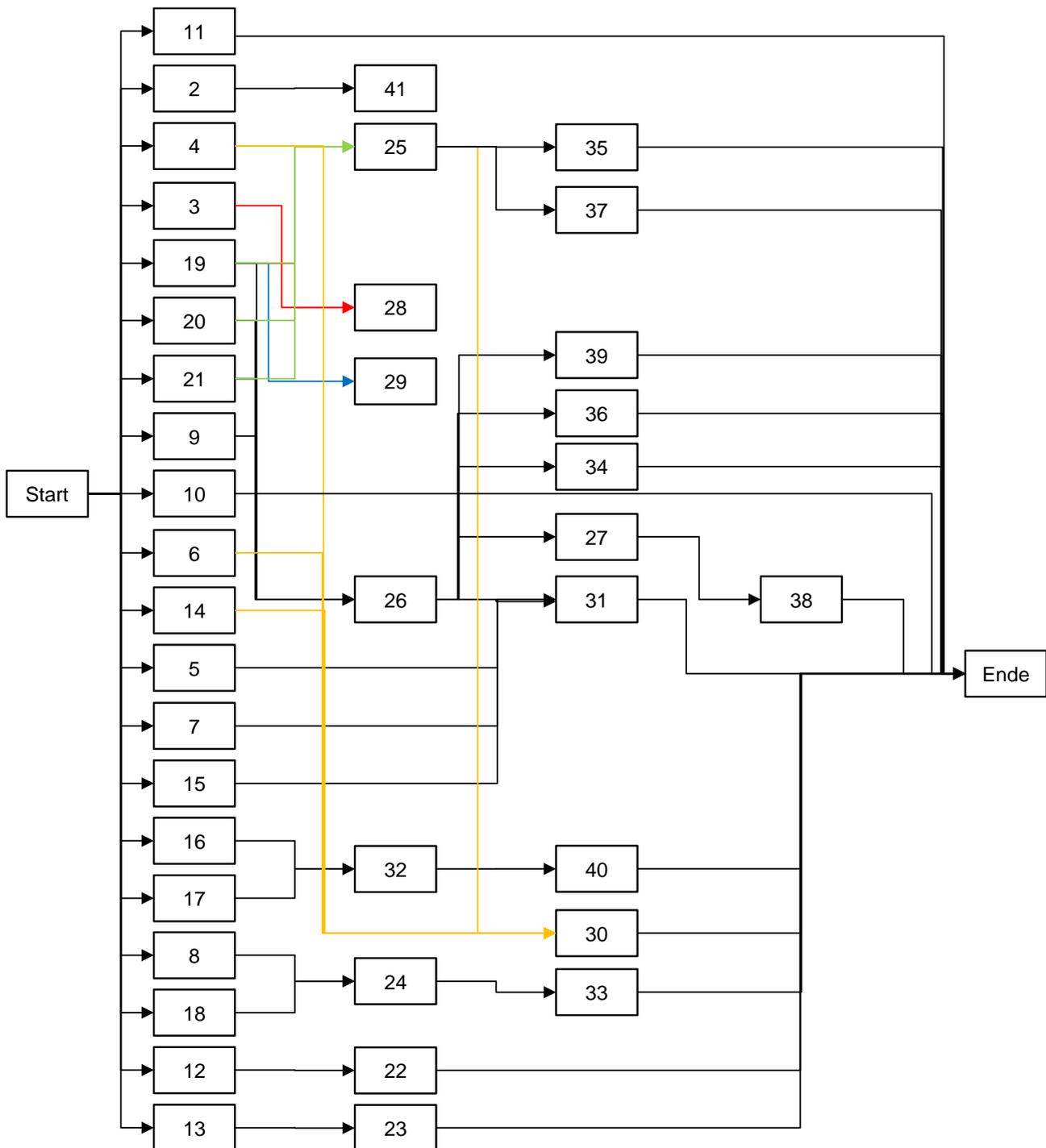


Abbildung 5.3: Montagevorranggraph des Validierungsobjekts

Insgesamt beträgt die kumulierte Bearbeitungszeit des Produkts im Ist Zustand demnach 456 Minuten. Hinsichtlich des Wertschöpfungsanteils eines Montagemitarbeiters wurden im Rahmen der Ist-Analyse die in Tabelle 5.2 sowie in Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 dargestellten Werte aufgenommen. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass die Bearbeitungszeit komplett wertschöpfend ist. Die Durchlaufzeit zur Montage eines Validierungsobjekts besteht aus einem wertschöpfenden Montagezeitanteil von 364 Minuten sowie einem nicht wertschöpfenden Montagezeitanteil von 92 Minuten. Der Anteil der nicht wertschöpfenden Montagezeit beträgt im Ist-Zustand somit 20,2% (s. Abbildung

5.6) und setzt sich aus Laufwegen (18 min/ 4%), Laufwegen zur Materialdisposition (9 min/ 1,8%) und Suchzeiten (65 min/ 14,2%) zusammen.

Tabelle 5.2: Zeitbedarf in der Montage (Ist Aufnahme)

	Zeitbedarf [min]	Anteil [%]
Durchlaufzeit	456	100%
Montagezeit	364	80%
Laufwege	18	4%
Laufwege Materialdisposition	9	1,8%
Suchzeiten	65	14,2%



Abbildung 5.4: Wertschöpfungsanteil im Ist Zustand

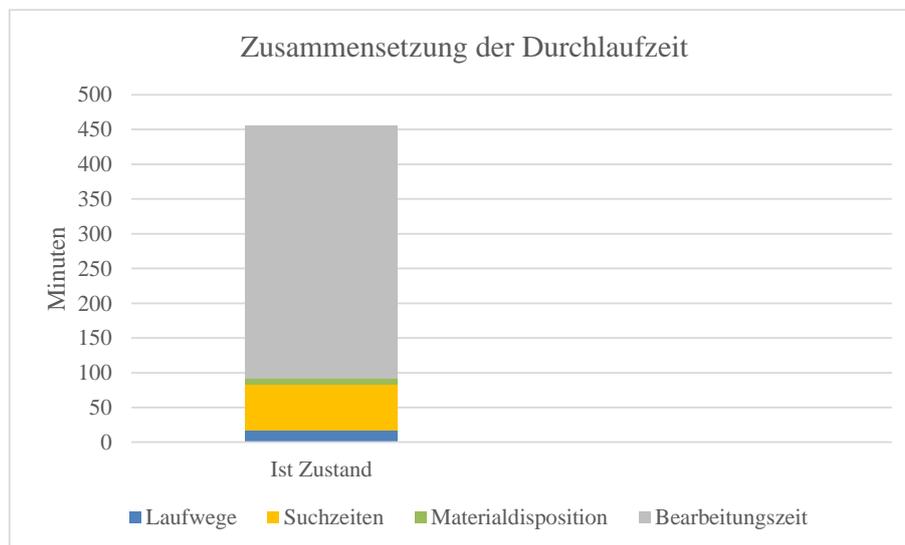


Abbildung 5.5: Zusammensetzung der Durchlaufzeit in der Montage

Einhergehend mit der Aufnahme der Produkt- und Prozessdaten sowie dem zugehörigen Montagevorranggraphen (s. Abbildung 5.3) wurde zudem das Layout bzw. die Anordnung des Materials bei der Materialbereitstellung aufgenommen. Entsprechend der Abbildung 5.6 erfolgt die Anordnung des

Materials in reihenweiser Bodenlagerung mit drei Bereitstellungsreihen auf einer Materialbereitstellungsfläche von 104,4m². Die Breite der Materialbereitstellungsfläche beträgt 12m, während die Flächenhöhe 8,7m beträgt. Eine Zuordnung des Materials auf der Materialbereitstellungsfläche existiert nicht, sodass das Material nicht standardisiert und zufällig auf der Materialbereitstellungsfläche angeordnet wird. Für den Montagemitarbeiter resultiert daraus ein hoher Suchaufwand bei der Auswahl und Identifizierung der als nächstes zu montierenden Bauteile.

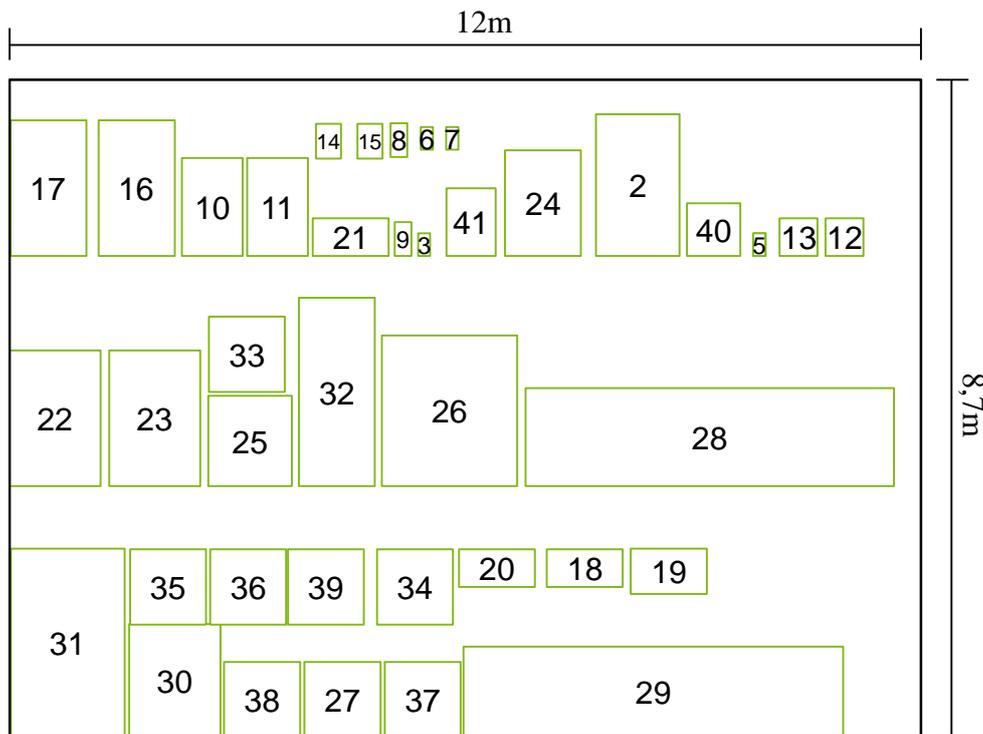


Abbildung 5.6: Ist Zustand der Materialanordnung

5.3 Anwendung der entwickelten Planungssystematik

Die Anwendung der entwickelten Planungssystematik besteht aus den in Kapitel 4 vorgestellten drei Teilschritten. Der Ausgangspunkt ist die Erzeugung der Planungsdatenbasis, auf deren Basis der SP-MBS Algorithmus angewendet und die standardisierten Tätigkeitsbeschreibungen abgeleitet werden.

5.3.1 Erzeugung der Planungsdatenbasis

Die Erzeugung der Planungsdatenbasis für die Anordnung des Materials wurde im Rahmen der Validierung manuell durchgeführt, da der Aufbau einer Planungsdatenbasis den zeitlichen Umfang der Validierung deutlich überschritten hätte. Hintergrund dieser Vorgehensweise war der zeitliche und personelle Aufwand zur Befüllung der Referenzbaugruppen der Planungsdatenbasis. Stattdessen

wurde die Montagereihenfolge erfahrungsbasiert auf Basis eines zuvor aufgenommenen Montagevorranggraphs definiert und die erforderlichen Planungsdaten sowie die Abmessungen der bereitzustellenden Bauteile bzw. Baugruppen manuell aufgenommen.

5.3.2 Anwendung des SP-MBS Algorithmus

Zur Validierung der entwickelten Planungssystematik wurde die Materialanordnung für das zweite Validierungsobjekt mit dem SP-MBS Algorithmus geplant. Dazu wurde das Material mit Hilfe des SP-MBS Algorithmus angeordnet und die resultierenden Level jeweils so aneinander geschoben, dass die Zugänglichkeit des Materials dauerhaft sichergestellt wird. Das Ergebnis des SP-MBS Algorithmus ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

Anhand des Ergebnisses wird ersichtlich, dass die erforderliche Materialbereitstellungsfläche ebenfalls 12m breit ist, die Höhe jedoch um 8% auf 8m reduziert werden konnte. Statt drei Materialbereitstellungsreihen erfolgt die Materialbereitstellung nach dem SP-MBS Algorithmus lediglich in zwei Materialreihen.

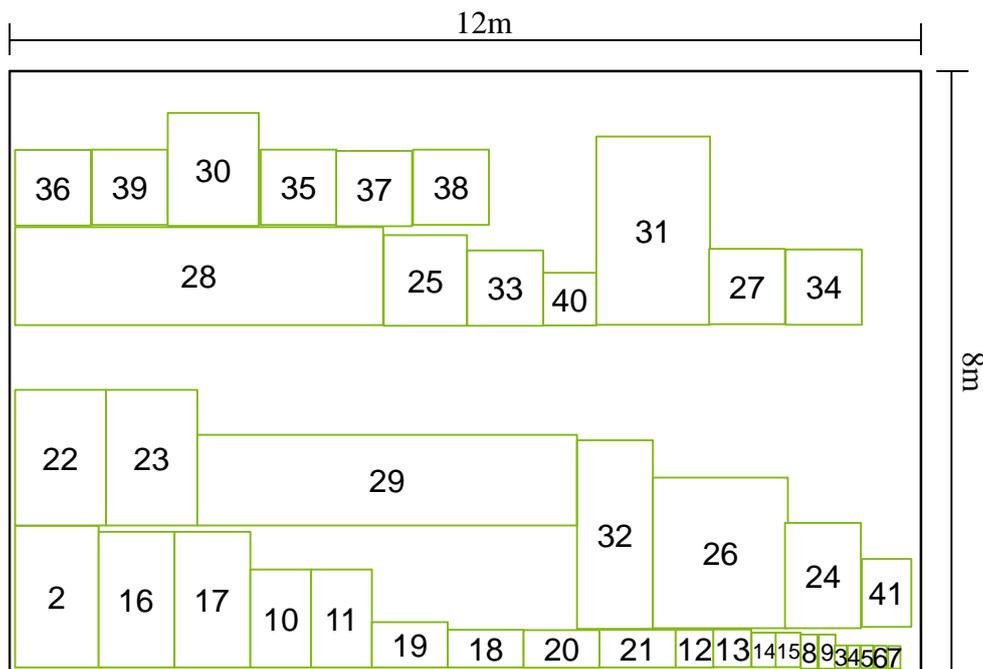


Abbildung 5.7: Materialanordnung nach Anwendung des SP-MBS Algorithmus

5.3.3 Standardisierte Tätigkeitsbeschreibungen

Aufbauend auf der berechneten Materialanordnung wurde die in Kapitel 4.6 entwickelte Vorgehensweise zur standardisierten Tätigkeitsbeschreibung für die Materialbereitstellung angewendet. Dazu wurde auf Basis des Referenzprozesses die jeweilige Materialbereitstellung veranlasst und die Tätigkeiten mit Hilfe der dafür vorgesehenen Bausteine spezifiziert. Durch die zusätzliche Eingabe der

erforderlichen Entfernungen zur Materialbereitstellung, wurde zudem der Logistikaufwand abgeschätzt, der zur Bereitstellung eines Auftrags notwendig ist. In Abbildung 5.8 ist ein Ausschnitt eines entwickelten Tätigkeitsplans dargestellt.

Standardarbeitsblatt Materialbereitstellung								
Nr.	Tätigkeitscode	Tätigkeit	Meter	Anzahl	Objekt	Beschreibung/ Kommentar	Zeitbedarf [Sek]	Zeitbedarf kumuliert [Sek]
1	L1	Laufweg	63	1			57,6	57,6
2	L2	Lesen der Kommissionierliste		1			30	87,6
3	K1	Leere Kiste holen		3			24	111,6
4	K2	Kommissionierung (Material in Kiste)		3			60	171,6
5	T5	Transport (Stapler)	760	1			697,9	869,5
6	L3	Lesen der MBS-Anleitung		1			30	899,5
7	A3	Kiste (Klein) platzieren		3			12	911,5
8	T5	Transport (Stapler)	760	1			697,9	1609,4
9	L2	Lesen der Kommissionierliste		1			30	1639,4
10	K1	Leere Kiste holen		4			32	1671,4
11	K2	Kommissionierung (Material in Kiste)		4			80	1751,4
12	T5	Transport (Stapler)	760	1			697,9	2449,3
13	L3	Lesen der MBS-Anleitung		1			30	2479,3
14	A3	Kiste (Klein) platzieren		4			16	2495,3
15	T5	Transport (Stapler)	760	1			697,9	3193,2

Anleitung:
 1. Tätigkeit eintragen
 2. Meter/ Anzahl eintragen
 3. Objekt spezifizieren
 4. Beschreibung/ Kommentar einfügen (optional)

Abbildung 5.8: Ausschnitt des erzeugten Tätigkeitsplans für den Logistikmitarbeiter

5.4 Bewertung der Planungssystematik

Analog zum ersten Validierungsobjekt wurde auch für die Montage des zweiten Validierungsobjekts eine Prozessaufnahme durchgeführt und die Ergebnisse in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3: Zeitbedarf in der Montage nach Anwendung des SP-MBS Algorithmus

	Zeitbedarf [min]	Anteil [%]
Durchlaufzeit	402,4	100%
Montagezeit	364	90,7%
Laufwege	8	2,0%
Laufwege Materialdisposition	6,4	1,6%
Suchzeiten	23	5,7%

Zur besseren Vergleichbarkeit der Montagezeiten wurde die wertschöpfende Montagezeit als konstant angenommen. Zwar war diese beim zweiten Validierungsobjekt im Vergleich zum ersten Validierungsobjekt um 13 Minuten schneller, allerdings ist dieser Unterschied auf zwei Fehlteile in der ersten Prozessaufnahme zurückzuführen. Für die Bearbeitungszeit wurden demnach ebenfalls 364 Minuten angenommen.

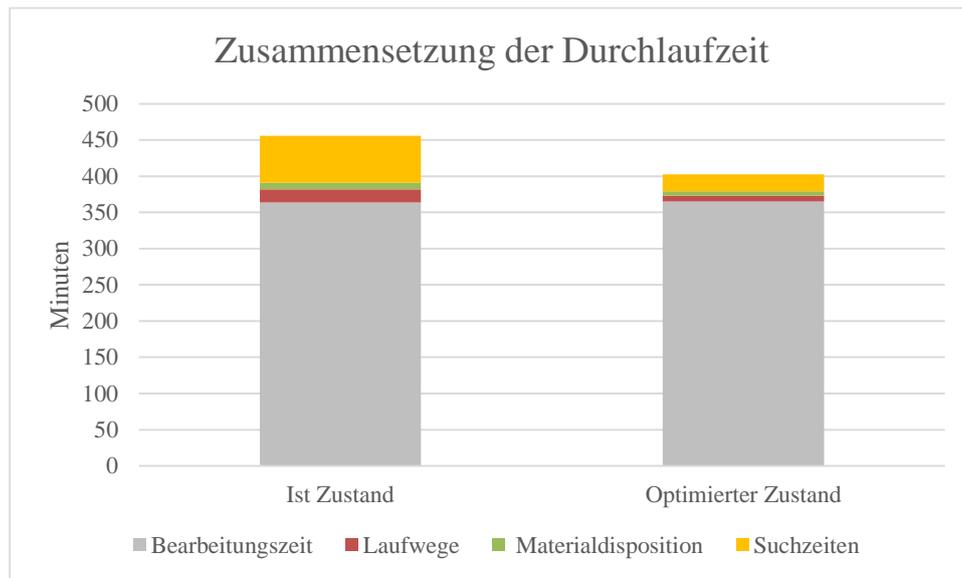


Abbildung 5.9: Zusammensetzung der Durchlaufzeit in der Montage

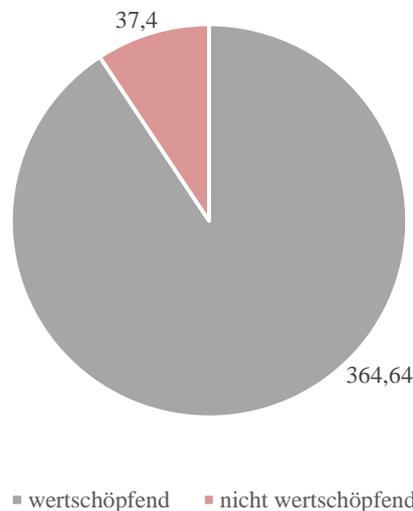


Abbildung 5.10: Wertschöpfungsanteil nach Anwendung der entwickelten Planungssystematik

Nach Anwendung des SP-MBS Algorithmus beträgt die Durchlaufzeit 402,4 Minuten. Der wertschöpfende Zeitanteil beträgt dabei 90,7%, sodass der nicht wertschöpfende Zeitanteil auf 9,3% reduziert werden konnte (s. Abbildung 5.10). Die Bearbeitungszeit dauerte 365 Minuten. Die zeitliche Dauer für Laufwege beträgt 8 Minuten (2,0%), für Laufwege mit Materialdisposition 6,4 Minuten (1,6%) und für Suchzeiten 23 Minuten (5,7%) (s. Abbildung 5.9).

Der Vergleich der aufgenommenen Prozessdaten zeigt, dass mit Hilfe der entwickelten Planungssystematik eine deutliche Verbesserung des Wertschöpfungsanteils in der Baustellenmontage erreicht werden konnte. Wie in Dieser wurde um 10,9% reduziert. Während die Laufwege zuvor insgesamt 18 Minuten dauerten, wurden diese auf 8 Minuten gesenkt. Statt 3,9% liegt der Anteil der Laufwege im optimierten Zustand bei lediglich 2,0%. Auch die Laufwege mit Materialdisposition wurden entsprechend reduziert und betragen nach der Optimierung 6,4 statt 9 Minuten. Den größten Einfluss hat

die Anwendung der Planungssystematik auf die Suchzeiten zur Identifizierung und Auswahl des erforderlichen Materials. Diese wurden von 65 Minuten auf 23 Minuten reduziert (s. Abbildung 5.11).

Tabelle 5.4 dargestellt, wurde die Durchlaufzeit von 456 Minuten auf 402,4 Minuten gesenkt und somit um 10,9% reduziert. Da die wertschöpfende Bearbeitungszeit dabei als konstant angenommen wurde, ist die Verbesserung auf eine Reduzierung des nicht wertschöpfenden Zeitanteils zurückzuführen.

Dieser wurde um 10,9% reduziert. Während die Laufwege zuvor insgesamt 18 Minuten dauerten, wurden diese auf 8 Minuten gesenkt. Statt 3,9% liegt der Anteil der Laufwege im optimierten Zustand bei lediglich 2,0%. Auch die Laufwege mit Materialdisposition wurden entsprechend reduziert und betragen nach der Optimierung 6,4 statt 9 Minuten. Den größten Einfluss hat die Anwendung der Planungssystematik auf die Suchzeiten zur Identifizierung und Auswahl des erforderlichen Materials. Diese wurden von 65 Minuten auf 23 Minuten reduziert (s. Abbildung 5.11).

Tabelle 5.4: Durch Anwendung der Planungssystematik erreichte Optimierung

	<i>Ist Zustand</i>	<i>Optimierter Zustand</i>	<i>Verbesserung</i>
<i>Durchlaufzeit</i>	456 min	402,4 min	10,9%
<i>Bearbeitungszeit</i>	365 min	365 min	-
<i>Laufwege</i>	18 min	8 min	1,9%
<i>Laufwege mit Materialdisposition</i>	9 min	6,4 min	0,4%
<i>Suchzeiten</i>	65 min	23 min	8,5%

Die Reduzierung der Suchzeiten zeigt den Einfluss der Planungssystematik auf den Standardisierungsgrad. Während das Material im Ist-Zustand nicht standardisiert und zufällig auf der Materialbereitstellungsfläche angeordnet wurde, erfolgte die Materialanordnung im optimierten Zustand mit Hilfe des SP-MBS Algorithmus. Auf diese Weise wurden klare Beziehungen zwischen dem Material und dem Lagerort auf der Materialbereitstellungsfläche geschaffen, in Folge derer die Suchaufwände des Montagemitarbeiters signifikant gesenkt wurden.

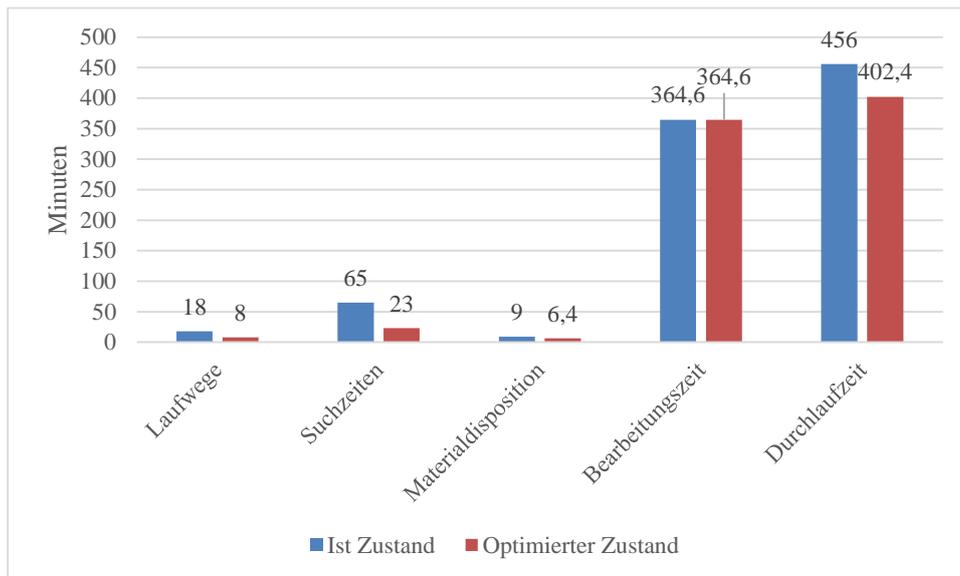


Abbildung 5.11: Vergleich des Ist Zustands mit dem optimierten Zustand

Auch hinsichtlich der Laufwege wurde eine Optimierung erreicht. So wurde die Gesamtlänge der Laufwege zur Auswahl des Materials sowie dessen Transport von der Materialbereitstellungsfläche zur zugehörigen Montageobjektseite von 513 Meter auf 301 Meter reduziert (58%). Die geringere zeitliche Verbesserung ist dabei über die erforderliche Handhabungszeit des Hubwagens zu erklären, die im Vergleich zu den Fahrwegen deutlich zeitbestimmender ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Eine effiziente Materialbereitstellung stellt eine wichtige Voraussetzung zur Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen dar. Vor allem in der Großgerätemontage, die oftmals nach dem Baustellenprinzip organisiert ist, erfolgt die Materialbereitstellung jedoch sehr unstrukturiert und führt zu einem geringen Standardisierungsgrad und einer hohen Intransparenz hinsichtlich des Materialflusses.

In der Folge geht die Arbeit der Montagemitarbeiter mit langen Laufwegen und hohen Suchzeiten zur Identifikation des als nächstes zu montierenden Materials einher und ist in der Folge durch einen hohen Anteil nicht wertschöpfender Tätigkeiten charakterisiert. Gleichzeitig wirkt sich der Sekundäraufwand negativ auf die Durchlaufzeit und damit implizit auf die Liefertermintreue aus, die das wichtigste Wettbewerbsmerkmal der Großgerätemontage darstellt.

Da bisher keine zielführenden Ansätze zur Optimierung der Materialbereitstellung in der Großgerätemontage existieren und diesbezüglich eine klare Forschungslücke besteht, wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens SySMaG eine Planungssystematik zur standardisierten Materialbereitstellung in der Großgerätemontage entwickelt.

Hierzu wurden im zweiten Kapitel die theoretischen Grundlagen für die weitergehenden Betrachtungen gelegt. Dazu wurden die theoretischen Grundlagen auf den Themengebieten der Großgerätemontage und der Materialbereitstellung erläutert und der diesbezügliche Stand der Forschung diskutiert. Der Schwerpunkt hinsichtlich der Materialbereitstellung lag dabei auf den Organisationprinzipien und Materialbereitstellungsstrategien, die stets hinsichtlich ihrer Eignung für die Großgerätemontage bewertet wurden.

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen wurden in Kapitel drei die Anforderungen an die zu entwickelnde Planungssystematik hergeleitet. Die Basis zur Anforderungsdefinition bildete eine Umfrage unter 15 Unternehmen der Großgerätemontage zu ihren Zielen in der Montage und Logistik sowie den dabei wirkenden Herausforderungen. Dabei wurden als Hauptziele die Liefertermintreue und die Stabilität der Durchlaufzeit identifiziert. Die wesentlichen Herausforderungen sind die Einhaltung der Durchlaufzeit und die nicht standardisierte Materialbereitstellung. Aufbauend auf den Umfrageergebnissen wurden anschließend gemeinsam mit Experten sechs Anforderungen an die Planungssystematik definiert.

Im vierten Kapitel erfolgte die Entwicklung der Planungssystematik zur standardisierten Materialbereitstellung. Dazu wurden bestehende Materialbereitstellungsmethoden hinsichtlich ihres Adaptions-

bedarfs an die Großgerätemontage analysiert und die Adaptionsbedarfe herausgearbeitet. Anschließend wurde eine Vorgehensweise zum sukzessiven Aufbau einer Planungsdatenbasis vorgestellt, mit deren Hilfe auftragsunabhängige Ähnlichkeiten nutzbar gemacht werden können, um den Aufwand bei der Planung eines neuen Auftrags zu minimieren. Den Kern der Planungssystematik bilden die Anordnung des Materials am Montageobjekt. Dazu werden vier mögliche Materialbereitstellungsstrategien voneinander abgegrenzt und mit dem SP-MBS Algorithmus ein Algorithmus zur Standardisierung der Materialbereitstellung entwickelt. Das resultierende Ergebnis wird anschließend in standardisierte Tätigkeitsbeschreibungen übersetzt, durch die der zur Materialbereitstellung erforderliche Logistikaufwand abschätzbar ist.

Die Validierung der entwickelten Planungssystematik wird in Kapitel 6 vorgestellt. Dazu wurde die Planungssystematik bei einem interessierten Unternehmen des Mittelstands angewendet. Hierbei zeigte sich die breite Anwendbarkeit und hohe Praxistauglichkeit der Planungssystematik.

Es bleibt festzuhalten, dass durch die erarbeitete Planungssystematik zur Standardisierung der Materialbereitstellung der Stand der Technik durch die Ergebnisse des Forschungsvorhabens SySMaG erweitert werden konnte. So trägt die strukturierte Anordnung des Materials dazu bei sowohl den Standardisierungsgrad in der Montage und Logistik als auch den wertschöpfenden Zeitanteil der Montagemitarbeiter zu erhöhen und den zur Materialbereitstellung erforderlichen Flächenbedarf zu minimieren. Fehlteile werden durch die standardisierte Anleitung der Logistikmitarbeiter frühzeitig entdeckt und Montagestillstände vermieden.

Wie in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben, wurde der bei der Antragsstellung formulierte Nutzen, die Rationalisierungspotenziale in der Montage und Materialbereitstellung von KMU zu identifizieren und umzusetzen erreicht. Darüber hinaus wurde auch das definierte Forschungsziel, eine Systematik zur Planung und Ausführung einer standardisierten Materialbereitstellung, die mit einer geringen Datenbasis im Hinblick auf die gegebene Variabilität hinreichend genaue und gleichzeitig robuste Ergebnisse generiert zu entwickeln, erfüllt. Das Forschungsziel wurde demnach erfolgreich umgesetzt und weitere Forschungsfragen identifiziert, um die Wettbewerbsfähigkeit der Großgerätemontage langfristig zu sichern.

7 Literatur

1. Adolph S, Metternich J (2016) Materialbereitstellung in der Montage.: Eine empirische Analyse zu Identifikation der Anforderungen an zukünftige Planungsvorgehen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111:15–18.
2. Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R (2016) Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.
3. Behrens B-A, Nyhuis P, Overmeyer L, Bentlage A, Rüter T, Ullmann G (2014) Towards a definition of large scale products. Prod. Eng. Res. Devel. 8:153–164.
4. Bozer YA, McGinnis LF (1992) Kitting versus line stocking: A conceptual framework and a descriptive model. International Journal of Production Economics 28:1–19.
5. Brynzér H, Johansson MI (1995) Design and performance of kitting and order picking systems. International Journal of Production Economics 41:115–125.
6. Bullinger H-J, Lung MM (1994) Planung der Materialbereitstellung in der Montage. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
7. Coffman EG, Shor PW (1990) Average-case analysis of cutting and packing in two dimensions. European Journal of Operational Research 44:134–144.
8. Dickmann P (Hrsg) (2009) Schlanker Materialfluss: Mit Lean Production, Kanban und Innovationen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
9. Domschke W, Drexl A, Klein R, Scholl A (2015) Einführung in Operations Research. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg.
10. Droste M (2013) Parameterbasierte Modellierung innerbetrieblicher Milkrun-Systeme zur Planung der Materialbereitstellung in der Montage. Dissertation, Dortmund.
11. Fahrmeir L (1996) Multivariate statistische Verfahren. De Gruyter, s.l.
12. Faupel T (2009) Einsatz von RFID zur Optimierung dezentraler Materialfluss-Steuerung: Ein Informationssystem zur Flexibilisierung der Reihenfolgeplanung in Kanban. Rombach, Freiburg i. Br.
13. Gerdt M, Lempio F (2011) Mathematische Optimierungsverfahren des Operations Research. De Gruyter, Berlin.
14. Große-Heitmeyer (2004) Logistik. In: Wiendahl H-P, Gerst D, Keunecke L (Hrsg) Variantenbeherrschung in der Montage. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S 67–76.

15. Gudehus T (2006) Dynamische Disposition: Strategien zur optimalen Auftrags- und Bestandsdisposition ; mit 7 Tabellen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
16. Guhlemann S (2016) Neue Indexingverfahren für die Ähnlichkeitssuche in metrischen Räumen über große Datenmengen. Dissertation, Dresden.
17. Haasis H-D (2008) Produktions- und Logistikmanagement: Planung und Gestaltung von Wertschöpfungsprozessen ; [Bachelor-geeignet! Gabler / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.
18. Han X, Iwama K, Ye D, Zhang G (2007) Strip Packing vs. Bin Packing. In: Kao M-Y, Li X-Y (Hrsg) Algorithmic aspects in information and management: Third international conference, AAIM 2007, Portland, OR, USA, June 6 - 8, 2007 ; proceedings. Springer, Berlin, S 358–367.
19. Hansmann K-W (2006) Industrielles Management. Oldenbourg, München.
20. Hasselmann V-R, Maschek T, Bohnen F, Deuse J (2013) Taktgebundene Fließmontage in der Großgerätemontage.: Reifegradorientierte Gestaltung eines Produktionssystems. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108:32–36.
21. Heinz K, Grünz L, Mayer M (2003) Auswahl zeit- und kostenoptimaler Materialbereitstellungsstrategien für die Montage. Verl. Praxiswissen, Dortmund.
22. Henke T, Deuse J (2019) Arbeitsfortschrittssynchrone Materialbereitstellung in der Großgerätemontage. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 114:243–246.
23. Henke T, Weisner K, Schulte L, Deuse J (2017) Einzel- und Kleinserienfertigung von Großgeräten: Optimierung der Materialbereitstellung durch (un)überwachtes Lernen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112:873–876.
24. Hopp WJ, Spearman ML (2011) Factory physics. Waveland Press, Long Grove, Ill.
25. Huwart J-V, Verdier L (2009) Internationaler Handel. OECD.
26. Ihde GB (1978) Distributions-Logistik. Fischer, Stuttgart.
27. Industrie Anzeiger (2018) Maschinenbau 2017 dank Export erfolgreich. Industrie Anzeiger:14–16.
28. Isermann H (Hrsg) (1998) Logistik. Gestaltung von Logistiksystemen. Moderne Industrie, Landsberg/Lech.
29. Jünemann R (1989) Materialfluß und Logistik: Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

30. Kestel R (1995) Variantenvielfalt und Logistiksysteme: Ursachen - Auswirkungen - Lösungen. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, s.l.
31. Kiener S, Maier-Scheubeck N, Obermaier R, Weiß M (2018) Produktionsmanagement. De Gruyter Oldenbourg, Berlin, Boston.
32. Klepzig H-J (2014) Working Capital und Cash Flow: Finanzströme durch Prozessmanagement optimieren. Gabler, Wiesbaden.
33. Klug F (2018) Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik Im Automobilbau. Vieweg, Berlin, Heidelberg.
34. Li K, Cheng K-H (1990) On Three-Dimensional Packing. *SIAM J. Comput.* 19:847–867.
35. Lödding H (2016) Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
36. Lodi A, Martello S, Vigo D (2002) Heuristic algorithms for the three-dimensional bin packing problem. *European Journal of Operational Research* 141:410–420.
37. Lotter B, Deuse J, Lotter E (2016) Die Primäre Produktion: Ein praktischer Leitfaden zur verlustfreien Wertschöpfung. Springer Vieweg, Wiesbaden.
38. Lotter B, Wiendahl H-P (2012) Montage in der industriellen Produktion.: Ein Handbuch für die Praxis; mit 18 Tabellen. Springer Vieweg, Berlin.
39. Mach F (2015) Organisation einer XXL-Fertigung: Ein Ansatz zur systematischen und zielgerichteten Identifikation von Optimierungsansätzen in der Produktion von XXL-Produkten. *Industrie 4.0 Management* 31:32–35.
40. Martin H (2006) Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.
41. (2018) Maschinenbau in Zahl und Bild 2018: Mechanical engineering - figures and charts.
42. Monden Y (2012) Toyota production system: An integrated approach to just-in-time. CRC Press; IIE Inst. of Industrial Engineers, Boca Raton, Fla., Norcross, Ga.
43. Nyhuis P, Wiendahl H-P, Fiege T, Mühlenbruch H (2006) Materialbereitstellung in der Montage. In: Lotter B, Wiendahl H-P (Hrsg) Montage in der industriellen produktion: Optimierte abläufe, rationelle automatisierung. Springer, Berlin, S 323–351.

44. Ohno T, Hof W (2009) Das Toyota-Produktionssystem: Das Standardwerk zur Lean Production. Campus-Verl., Frankfurt/Main.
45. Ortmann FG (2010) Heuristics for Offline Rectangular Packing Problems. Dissertation, Stellenbosch.
46. Ortmann FG, Ntene N, van Vuuren JH (2010) New and improved level heuristics for the rectangular strip packing and variable-sized bin packing problems. *European Journal of Operational Research* 203:306–315.
47. Pawellek G (2007) Produktionslogistik: Planung - Steuerung - Controlling ; mit 42 Übungsfragen. Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l.
48. Peters SHF, Brühl R, Stelling JN (2000) Betriebswirtschaftslehre: Einführung. Oldenbourg, München.
49. Pfohl H-C (2010) Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen. Springer, Berlin.
50. Pillkahn U (2007) Trends und Szenarien als Werkzeuge zur Strategieentwicklung: Wie Sie die unternehmerische und gesellschaftliche Zukunft planen und gestalten. Publicis Corp. Publ, Erlangen.
51. Plümer T (2003) Logistik und Produktion. Oldenbourg, München.
52. Puchinger J (2011a) Verfahren zur Lösung eines Glasverschnittproblems. Dissertation, Wien.
53. Puchinger J (2011b) Verfahren zur Lösung eines Glasverschnittproblems. Dissertation, Wien.
54. Regber H, Zimmermann K (2007) Change-Management in der Produktion: Prozesse effizient verbessern im Team. mi-Fachverl., Landsberg am Lech.
55. Reuter C, Burggräf P, Böning C, Schmitz T, Wagner J, Prinzhorn H (2014) Adaptive Montage für XXL-Produkte. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109:718–721.
56. Röhrig M (2002) Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionsendstufen. VDI-Verl., Düsseldorf.
57. Schenk M, Wirth S, Müller E (2014) Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
58. Schmitt I (2009) Ähnlichkeitssuche in Multimedia-Datenbanken: Retrieval, Suchalgorithmen und Anfragebehandlung. Oldenbourg, München.
59. Schonberger RJ (1983) Applications of Single-Card and Dual-Card Kanban. *Interfaces* 13:56–67.

60. Schönsleben P (2016) Integrales Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
61. Sietz M, Weber S (2013) Innovative Produktionslogistik für die Einzelfertigung. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108:841–845.
62. Steven M (2007) Handbuch Produktion: Theorie - Management - Logistik - Controlling. Kohlhammer, Stuttgart.
63. Steven M (2012) BWL für Ingenieure. Oldenbourg, München.
64. Syska A (2006) Produktionsmanagement. Gabler Verlag, s.l.
65. (1989) Transportkette: Grundbegriffe. Beuth, Berlin.
66. van Genuchten M (1992) Towards a software factory. Kluwer Acad. Publ, Dordrecht.
67. Wanka R (2006) Approximationsalgorithmen: Eine Einführung. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.
68. Westkämper E (2006) Einführung in die Organisation der Produktion. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg.
69. Wiendahl H-P (2014) Betriebsorganisation für Ingenieure: Mit 3 Tabellen. Hanser, München.
70. Wiendahl H-P, Reichardt J, Nyhuis P (2014) Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Hanser, München.
71. Yagy S (2009) Das synchrone Managementsystem: Wegweiser zur Neugestaltung der Produktion auf Grundlage des synchronen Produktionssystems. mi-Wirtschaftsbuch, München.