

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Entwicklung einer Methode für kurzfristige Anpassungen in der Montage von XXL-Produkten

der Forschungsstellen

Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Produktionssystematik,
Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen, Lehrstuhl für Produktionsmanagement,
Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH).

Das IGF-Vorhaben 17707N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V.
wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Ort, Datum

Name und Unterschrift des Projektleiters
an der ersten Forschungsstelle

Ort, Datum

Name und Unterschrift des Projektleiters
an der zweiten Forschungsstelle

Ort, Datum

Name und Unterschrift des Projektleiters
an der dritten Forschungsstelle

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Wissenschaftlich technische und wirtschaftliche Problemstellung	2
3	Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse	4
4	Darstellung der erzielten Ergebnisse	7
4.1	AP I: Identifikation und Darstellung von alternativen Montageprozessen	7
4.1.1	Identifikation von Montageprozessen	8
4.1.2	Darstellung von (alternativen) Montageprozessen	17
4.2	AP II: Entwicklung eines Bewertungsmodells für alternative Montageprozesse	20
4.2.1	Operative Ermittlung der logistischen Zielgrößen	22
4.2.2	Überführung der logistischen Zielgrößen in Kostengrößen	24
4.2.3	Zusammenführung in ein ganzheitliches Kostenmodell	27
4.3	AP III: Identifikation von Informationsbedarfen und Aufbau eines Datenmodells	28
4.3.1	Identifikation von Informationsbedarfen	28
4.3.2	Aufbau eines Datenmodells	29
4.4	AP IV: Entwicklung eines Softwaredemonstrators	30
4.4.1	Aufbau und Funktionen des Softwaredemonstrators	30
4.4.2	Handlungsleitfaden	34
4.5	AP V: Anwendung und Verifizierung der Projektergebnisse bei zwei Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses (PA)	36
4.6	AP VI: Dokumentation und Veröffentlichung	38
5	Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen	39
5.1	Voraussichtliche Nutzung der Forschungsergebnisse in KMU	39
5.2	Möglicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU	40
6	Verwendung der Zuwendung	41
7	Umsetzung der Forschungsergebnisse / Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft	42
8	Durchführende Forschungsstelle	45
9	Förderhinweis	47
10	Literaturverzeichnis	48
11	Abbildungsverzeichnis	53
12	Tabellenverzeichnis	53
13	Anhang	54
13.1	Anhang A1: Montagevorrangfolgraphen	54
13.2	Anhang A2: Vergrößerte Abbildungen	57

1 Zusammenfassung

In der Montage von XXL-Produkten sind Störungen allgegenwärtig. Insbesondere kommt es zu Problemen der Materialverfügbarkeit, der Konstruktion sowie Kapazitätsengpässen bei Mensch und Maschine. Ein wichtiger Ansatz als Reaktion auf Montagestörungen besteht in der Umsteuerung der Aufbaureihenfolge. Gleichzeitig ergibt sich durch die hohe Produktkomplexität bei geringen Stückzahlen eine häufig aufwandsbedingte, unzureichende Arbeitsplanqualität, die das Auffinden von alternativen Reihenfolgen zur Bearbeitung der Montageschritte erschwert. Dieser Problematik wird in der Praxis durch die Nutzung des impliziten Prozesswissens erfahrener Mitarbeiter begegnet, wodurch allerdings nicht sichergestellt werden kann, dass alle möglichen alternativen untersucht und eine aus logistischer Sicht geeignete Alternative ausgewählt wird.

Das durchgeführte Forschungsprojekt „Entwicklung einer Methode für kurzfristige Anpassungen in der Montage von XXL-Produkten“ hatte daher zum Ziel, eine geeignete Positionierung innerhalb der Dichotomie aus Planungsaufwand und Praxistauglichkeit zu erreichen und eine Methode zu entwickeln, die im Störfall der Montage von XXL-Produkten durchführbare alternative Montageprozesse ermittelt, visualisiert, aus logistischer Sicht bewertet und die Auswahl einer geeigneten Alternative ermöglicht. Das Projekt wurde in sechs Arbeitspaketen bearbeitet. Im ersten Arbeitspaket wurden die Grundlagen zur Identifikation und Darstellung von alternativen Montageprozessen gelegt. Neben der Auswahl einer Darstellungsform wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher alternative Montageprozesse aus der Produktstruktur unter Berücksichtigung von Randbedingungen, wie Material- oder Kapazitätsverfügbarkeiten, ermittelt. Im zweiten Arbeitspaket wurde ein Bewertungsmodell aufgebaut, das auf Basis der logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Termintreue, Bestand und Auslastung eine monetäre Bewertung alternativer Montageprozesse ermöglicht. Das dritte Arbeitspaket diente der Identifikation der Informationsbedarfe der Gesamtmethodik, um ein Datenmodell für die Anwendung in der Praxis zu schaffen. Innerhalb des vierten Arbeitspakets wurde ein Softwaredemonstrator entwickelt, welcher die vorher entwickelten Bausteine (Identifikation, Darstellung und Bewertung von alternativen Montageprozessen) integriert und den Prozessablauf der Gesamtmethode unterstützt. Durch die Umsetzung in einer Webapplikation kann der Softwaredemonstrator auf einem Tablet in der Produktion eingesetzt werden und dem Werker im Störfall eine geeignete Montagealternative aufzeigen. Die Anwendbarkeit der Projektergebnisse wurde mithilfe von Daten zweier Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses in Arbeitspaket fünf verifiziert. Parallel zur Bearbeitung wurden und werden die Projektergebnisse in Veröffentlichungen dokumentiert (Arbeitspaket sechs).

Es konnte gezeigt werden, dass durch die Anwendung der Gesamtmethode die Grundlage zur Auswahl von Prozessalternativen in beiden Unternehmen vergrößert werden konnte. Insgesamt wurden neue Alternativen identifiziert, die in dieser Form zuvor nicht betrachtet wurden. Nach Aussage der Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses ergeben sich durch den Einsatz der Gesamtmethode eine personenunabhängige, transparente und übersichtliche Bewertung der alternativen Montageprozesse, wodurch schnellere und bessere Entscheidungen getroffen werden können.

Das Ziel des Projekts wurde erreicht.

2 Wissenschaftlich technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Montage von großskaligen Produkten, sogenannten XXL-Produkten, ist in der Einzel- und Kleinserienfertigung als Standplatz oder Baustellenmontage organisiert [BEH09]. XXL-Produkte zeichnen sich besonders durch große Abmessungen und ein hohes Gewicht aus [POT11]. Die Herausforderungen der Baustellenmontage liegen, insbesondere bei XXL-Produkten, in der aufwendigen Prozessplanung aufgrund einer hohen Produktkomplexität bei geringen Stückzahlen sowie in der unzureichenden Arbeitsplanqualität zur Abbildung der Montageprozesse [LOT06]. Vor dem Hintergrund des vorliegenden Forschungsvorhabens wird ein Montageprozess als eine festgelegte Reihenfolge aller zu durchlaufenden Montageschritte verstanden. Innerhalb eines Montageschrittes erfolgt jeweils eine oder mehrere Montagetätigkeit/en. Prozessalternativen oder alternative Montageprozesse zeichnen sich durch eine unterschiedliche Reihenfolge der zu durchlaufenden Montageschritte aus.

In der Produktion von XXL-Produkten stellt die Einzel- bzw. Kleinserienmontage, bei der produktionsrelevante Daten produktspezifisch erzeugt werden müssen, die häufigste Montageform dar. Bei Auftragseingang liegen häufig nur wenige Informationen zu den konkreten Projekten und Montageprozessen vor, weshalb Entscheidungen mit einer gewissen Unsicherheit getroffen werden. Die Montage von XXL-Produkten ist demzufolge durch eine schlechte Datenverfügbarkeit und einer geringen Prozessstandardisierung gekennzeichnet. Zudem treten nach Produktionsstart noch häufige Produktänderungen auf. Resultierend daraus ergeben sich Montagestillständen aufgrund von Material- und Kapazitätsengpässen, wobei diese in 91 % der Unterbrechungen mit Materialmängeln begründet sind [ESS96]. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) haben große Probleme, aufgrund ihrer geringen Marktmacht und hohen Abhängigkeiten von Lieferanten, eine störungsfreie Materialversorgung sicherzustellen. Die Folge sind meist erhöhte Durchlaufzeiten. In Kombination mit den von ihren Kunden meist vorgegebenen, nicht verhandelbaren Lieferterminen, kommt es so schnell zu Problemen bei der Liefertreue der KMU. Es ergeben sich erhöhte Kosten (durch z.B. Vertragsstrafen), Kundenverlust und allgemeine Kundenunzufriedenheit. Um dies zu verhindern, nehmen über 50% der Unternehmen erhöhte Sicherheitsbestände in Kauf, was aber auch erhöhte Kapitalbindungskosten mit sich bringt [SHU13].

Neben der Abhängigkeit von Lieferanten ist auch die Umplanung aufgrund ausgefallener/nicht verfügbarer Ressourcen (Betriebsmittel, Maschinen, Personal) ein wesentlicher Störungsgrund in der Montage von XXL-Produkten. Sie müssen daher in die Lage versetzt werden, auf sich ändernde Rahmenbedingungen, wie z. B. eine mangelnde und schwankende Materialversorgung, reagieren zu können [IHL13].

Um derartige Stillstände in der Montage von XXL-Produkten zu minimieren bzw. zu unterbinden, fehlte bisher ein geeigneter Ansatz, der mit einem vertretbaren Aufwand alternative Montageprozesse im Störfall identifiziert, aus logistischer Sicht bewertet und geeignet visualisiert. Die in der Forschung bekannten Methoden zur Darstellung und Optimierung von Montageprozessen sind geprägt von einer hohen Exaktheit und somit einem für die XXL-Industrie zu hohem Planungsaufwand. Auf der anderen Seite ermöglichen die in der Praxis eingesetzten Lösungen, bspw. der Rückgriff auf das implizite Wissen der Mitarbeiter, eine hohe Praktikabilität, allerdings zu Lasten potenzieller erhöhter

Kosten durch suboptimale Entscheidungen. Daher ist es notwendig, eine geeignete Abbildung von Montageprozessen zu finden, die eine ausreichende Exaktheit bei einer hinreichenden Praktikabilität bietet, um eine adaptive Montage zu gewährleisten. Dieser Zusammenhang ist in Bild 2-1 nochmals dargestellt.

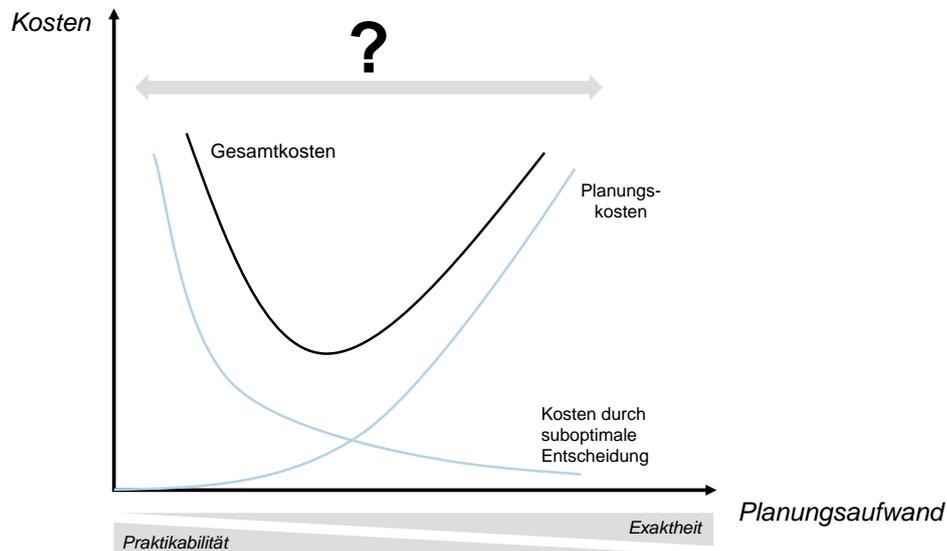


Bild 2-1: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Kosten und Planungsaufwand

Der Forschungsbedarf bestand daher in einer transparenten Abbildung von Montageprozessen für XXL-Produkte, um Montageprozessalternativen als Reaktion auf kurzfristige Abweichungen im Produktionsplan auszuwählen. Vorhandene Montageprozessalternativen können heute in der industriellen Praxis nicht hinsichtlich ihrer aktuellen Durchführbarkeit bzgl. Material und Kapazitäten geprüft werden. Eine kurzfristige Auswahl aus logistischer Sicht zweckmäßiger Montageprozessalternativen ist gegenwärtig zudem ebenfalls nicht möglich. Die genannten Defizite wurden durch das beantragte Forschungsvorhaben „Adaptive Montage für XXL-Produkte“ behandelt und gelöst.

3 Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer Methode, die im Störfall der Montage von XXL-Produkten alle durchführbaren alternativen Montageprozesse ermittelt, visualisiert und aus logistischer Sicht bewertet sowie eine Vorzugsalternative anzeigt. Diese Methode sollte weiterhin in einen Softwaredemonstrator implementiert werden. Zur Erreichung dieses Ziels wurden zu Projektbeginn drei Teilziele definiert (Bild 3-1), welche anhand von sechs Arbeitspaketen erarbeitet wurden.



Bild 3-1: Angestrebte Teilziele des vorliegenden Forschungsprojekts

Nachfolgend werden die erreichten Ergebnisse den angestrebten Teilzielen (kursiv gedruckte Abschnitte) gegenübergestellt.

Teilziel 1: Verfahren für die Identifikation und Darstellung von alternativen Montageprozessen

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Im Zuge der Erreichung des ersten Teilziels wird ein Verfahren für die Identifikation von alternativen Montageprozessen entwickelt. Das Verfahren identifiziert nach dem Auftreten einer Störung unter der Berücksichtigung von technologischen Restriktionen, dem störungsbehafteten Montageschritt und den bereits erfolgten Montageschritten alle verbleibenden technologisch möglichen Prozessalternativen. Das Verfahren soll als Tool in Excel oder Java umgesetzt werden. Zur Berechnung der Prozessalternativen ist ein Algorithmus zu programmieren. Die alternativen Montageprozesse sollen als Montagevorgangsgraph visualisiert werden. Unter einem Montagevorgangsgraphen wird nachfolgend die Visualisierung der Prozessalternativen in einem Graphen verstanden. Als hierfür verwendete Darstellungsform sollen AND/OR-Graphen verwendet werden. Mit den beschriebenen Ergebnissen des ersten Teilziels kann die Entwicklung des Bewertungsmodells im nächsten Teilziel vorgenommen werden.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Das Ergebnis des ersten Teilziels ist ein Verfahren, mit dessen Hilfe alternative Montageprozesse bzw. -pläne identifiziert und visualisiert werden können. Hierfür wurde ein Algorithmus in Java programmiert. Dieser besteht aus drei Bausteinen und durchläuft diese in sukzessiver Abfolge so lange, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Das Abbruchkriterium ist die Terminierung aller betrachteten Montageschritte. Die Funktion des ersten Bausteins ist die Durchführbarkeitsprüfung von Montageschritten zu einem Planungszeitpunkt. Basis der Durchführbarkeitsprüfung sind organisatorische und technologische Vorrangbeziehungen sowie kapazitive und materielle Restriktionen. Der zweite Baustein dient der Bewertung durchführbarer Montageschritte zu einem Planungszeitpunkt. Grundlage hierfür stellen Selektionskriterien, welche in Prioritätsregeln überführt wurden und die Bewertung eines Montageschrittes bzw. die Differenzierung ermöglichen. Der dritte Baustein dient der Terminierung von durchführbaren Montageschritten zu einem Planungszeitpunkt, also der Zuordnung von Montageschritten auf die benötigten Ressourcen. Hierbei werden die Montageschritte in absteigender Prioritätsfolge terminiert, solange die verfügbare Kapazität der Ressource nicht

überschritten wird. Insgesamt wurden acht verschiedene Prioritätsregeln implementiert, sodass im Störfall als Endergebnis acht alternative Montageprozesse zur Verfügung stehen. Diese bilden den Input für das Bewertungsmodell des zweiten Teilziels. Die Montageprozesse werden nicht als AND/OR-Graph, sondern als Montagevorrangfolgegraph in der kombinierten Darstellungsform eines Gantt-Diagramms und eines Netzplans visualisiert.

Teilziel 2: Modell zur Bewertung von alternativen Montageprozessen

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: *Das zweite Teilziel dient der Entwicklung eines Bewertungsmodells für alternative Montageprozesse. Das Bewertungsmodell ist zweistufig aufgebaut. In der ersten Stufe wird die Durchführbarkeit der zur Auswahl stehenden Prozessalternativen geprüft. Dies erfolgt anhand zu identifizierender Kriterien für Mensch, Technik und Organisation, welche für eine Durchführbarkeit erfüllt sein müssen. Als Ergebnis der ersten Stufe ergeben sich Prozessalternativen, die nach der aktuellen Ressourcenverfügbarkeit unmittelbar durchführbar sind. In der zweiten Stufe werden die in der ersten Stufe ermittelten durchführbaren Prozessalternativen anhand der logistischen Zielgrößen bewertet, um eine Vorzugsvariante zu identifizieren. Dazu werden den logistischen Zielgrößen Kosten zugeordnet. Für beide Stufen des Bewertungsmodells wird eine Systematik entwickelt, welche die beschriebene Funktionsweise umsetzt. Die Systematik soll als Tool in Excel oder Java implementiert werden. Im zweiten Teilziel erfolgt weiterhin die Ermittlung der für die entwickelten Methoden benötigten Daten aus dem Unternehmensumfeld.*

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Die in diesem Teilziel vorgesehene Durchführbarkeitsprüfung wurde bereits durch die Erfüllung von Teilziel 1 erreicht, da das Verfahren zur Identifikation und Darstellung alternativer Montageprozesse in der Lösung eng mit der Durchführbarkeitsprüfung verknüpft ist. Der Fokus im zweiten Teilziel lag daher auf einem Modell für die monetäre Bewertung der alternativen Montageprozesse anhand der logistischen Zielgrößen. Dabei werden zunächst die vier logistischen Zielgrößen Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue der alternativen Montageprozesse operativ ermittelt. Im Anschluss werden diese Ausprägungen in Kostengrößen überführt und daraufhin durch Addition zusammengeführt. Alle alternativen Montageprozesse können somit mit einer Kostengröße bewertet und einem Vergleich zugänglich gemacht werden, um eine Vorzugsvariante zu identifizieren. Die Methode wurde im Softwaredemonstrator in Java umgesetzt. Die Datenbedarfe für die entwickelten Methoden wurden in Zusammenarbeit mit den Unternehmen des PA ermittelt.

Teilziel 3: Implementierung der entwickelten Methode in einem Softwaredemonstrator

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: *Das dritte Teilziel dient der Nutzbarmachung der Forschungsergebnisse für KMU. Das in diesem Kontext angestrebte Ergebnis des Forschungsvorhabens bildet ein aufwandsarm und intuitiv anzuwendender Softwaredemonstrator. Dieser bildet alle im Rahmen der ersten beiden Teilziele zu generierenden Ergebnisse ab. Dazu werden die Forschungsergebnisse als Software in dem Demonstrator umgesetzt und mit dem zu erstellenden Handlungsleitfaden anwendbar. Mit dem Demonstrator können KMU für komplexe XXL-Produkte mögliche Prozessalternativen in dem Montagevorgangsgraphen visualisieren und nach einer Bewertung die*

optimale Alternative durchführen. Als weiteres Ergebnis werden die Validierung des Demonstrators und die Anwendbarkeit des Handlungsleitfadens in KMU angestrebt.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Die Forschungsergebnisse der Teilziele 1 und 2 wurden in einen browser-basierten Softwaredemonstrator implementiert, der es ermöglicht, auf Grundlage einer Datenbankstruktur Montageprozesse abzubilden sowie Alternativen zu berechnen und zu bewerten. Der Softwaredemonstrator wurde in mehreren Projekttreffen bzgl. Erweiterbarkeit, ergonomischem Design sowie einer intuitiven und praxistauglichen Anwendbarkeit mit dem PA diskutiert. Die Erkenntnisse wurden dokumentiert, hinsichtlich der Durchführbarkeit sowie Aufwand bewertet und letztlich überwiegend in der Entwicklung des Demonstrators umgesetzt.

4 Darstellung der erzielten Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse anhand der einzelnen Arbeitspakete ausführlich dargestellt. Für jedes Arbeitspaket werden die durchgeführten Arbeiten und anschließend die daraus resultierten Ergebnisse detailliert beschrieben. Bild 4-1 ordnet die Arbeitspakete den drei genannten Teilzielen zu.

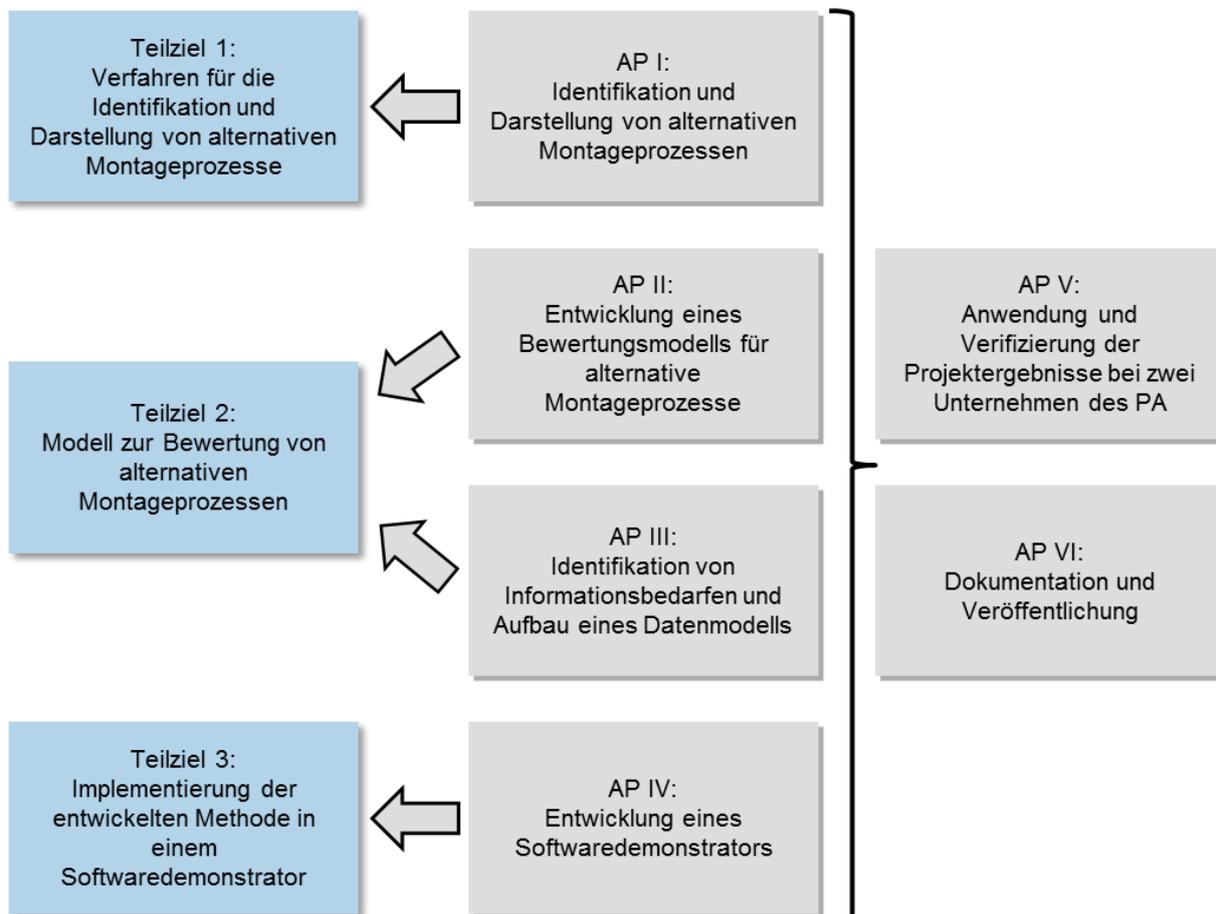


Bild 4-1: Zuordnung von Arbeitspaketen zu Teilzielen

4.1 AP I: Identifikation und Darstellung von alternativen Montageprozessen

Mit der Aufgabe, alternative Montageprozesse im Störfall zu identifizieren und zu visualisieren, befasste sich das erste Arbeitspaket. Bild 4-2 zeigt, welche Schritte durchgeführt werden müssen, um als Ergebnis durchführbare, alternative Montageprozesse vorliegen zu haben.

Die Grundannahme ist dabei, dass bei einem Störfall gewisse Montageschritte bereits abgeschlossen sind, sich manche zum Zeitpunkt der Störung in der Bearbeitung befinden und mit anderen noch nicht begonnen wurde. Die Grundidee zur Identifizierung von alternativen Montageprozessen besteht in einer sukzessiven Einplanung von Montageschritten in absteigender prioritätsfolge unter Berücksichtigung organisatorischer und technologischer Vorrangbeziehungen sowie materieller und kapazitiver Restriktionen. In Anbetracht dessen wird unter Berücksichtigung der Störfallinformationen (gestörter Montageschritt, Störungsdauer, Störungsursache und Zeitpunkt der Information) zunächst eine Durchführbarkeitsprüfung der Montageschritte zum aktuellen Planungszeitpunkt durchgeführt. Die zum betrachteten Planungszeitpunkt durchführbaren Montageschritte werden anschließend anhand von Prioritätswerten bzw. -regeln bewertet. Im Anschluss werden

in absteigender prioritätsfolge Montageschritte auf die benötigten Ressourcen zeitlich terminiert bzw. dem betrachteten Planungszeitpunkt zugeordnet. Die zeitliche Terminierung ist unter dem Begriff Terminierungslogik zu verstehen. Die Einhaltung von Kapazitätsgrenzen der Ressourcen wird hierbei berücksichtigt. Die Grundidee zur Identifizierung von alternativen Montageprozessen beinhaltet somit drei wesentliche Bausteine: Durchführbarkeitsprüfung, prioritätsregelbasierte Bewertung, Terminierungslogik. Dieser Ablauf wiederholt sich, bis alle Montageschritte zulässig terminiert wurden. Im Ergebnis entsteht ein alternativer Montageprozess, welcher die in Bearbeitung befindlichen und die noch nicht begonnen Montageschritte zum Zeitpunkt der Störung aus organisatorisch, kapazitiver und technologischer sowie materieller Sicht zulässig neu terminiert.

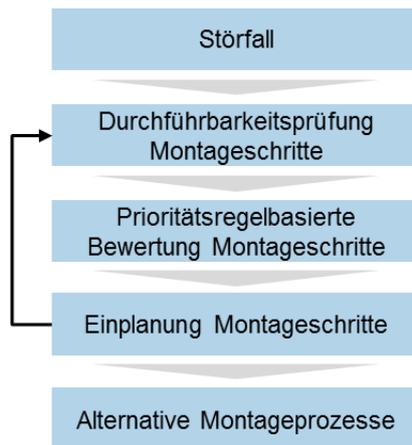


Bild 4-2: Ablauf für die Identifikation von alternativen Montageprozessen

In Bild 4-3 wird der Betrachtungsbereich des durchgeführten Forschungsprojekts abgegrenzt. Betrachtet werden demnach Störungen in den Dimensionen Zeit, Fehlteil und Kapazität. Die Dimension Zeit betrachtet insbesondere Störungen, die den Liefertermin des fertigen Produkts beeinflussen. Die Dimension Zeit ergibt sich als Konsequenz der anderen betrachteten Störgrößen. Die Dimension Fehlteil ist charakterisiert durch eine quantitative Unterdeckung des Materialbedarfs für einen Montageschritt. Schließlich werden unter der Dimension Kapazität nicht vorhandene Personal- und Betriebsmittelkapazitäten verstanden, die zu Verzögerungen in der Montage führen können. Der Schwerpunkt der Gesamtmethode liegt dabei auf der Montagesteuerung (Umplanung) in der Vormontage bzw. der Endmontage eines Unternehmens.

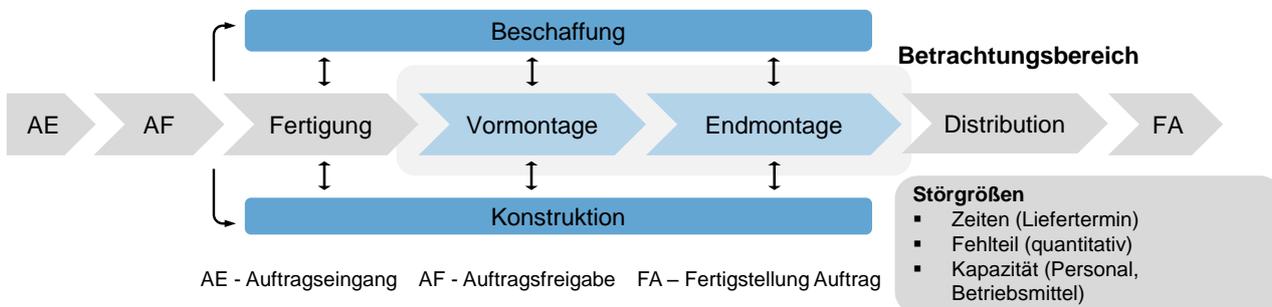


Bild 4-3: Betrachtungsbereich des Forschungsprojekts

4.1.1 Identifikation von Montageprozessen

Der generelle Ablauf zur Identifizierung von alternativen Montageprozessen ist in Bild 4.2 gezeigt. Die Grundidee besteht wie dargestellt in der sukzessiven Terminierung durchführbarer Montageschritte zu einem Planungszeitpunkt unter Berücksichtigung von or-

ganisatorischer und technologischer Vorrangbeziehung sowie kapazitiver und materieller Restriktionen.

Im Störfall muss der aktuelle Montageprozess auf Zulässigkeit aus organisatorischer, kapazitiver, materieller und technologischer Sicht überprüft werden. Ein Montageprozess ist zulässig, wenn die darin enthaltenen Montageschritte so terminiert sind, dass Ressourcenkapazitäten nicht überschritten werden sowie technologische, organisatorische Vorrangbeziehungen eingehalten werden. Zudem darf ein Montageschritt nur dann terminiert sein, wenn zu dem Startzeitpunkt alle für den Montageschritt benötigten Komponenten vorhanden sind, d.h. es darf keine Fehlteilsituation vorliegen. Sofern der aktuelle Montageprozess infolge eines Störfalls unzulässig wird ist eine Identifizierung von alternativen Montageprozessen erforderlich.

In Anbetracht dessen wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher über drei wesentliche Bausteine verfügt: Durchführbarkeitsprüfung, prioritätsregelbasierte Bewertung und Terminierungslogik. Dem Ablaufes des Algorithmus folgend (siehe Bild 4-2) wird zunächst auf Durchführbarkeitsprüfung eingegangen, bevor die prioritätsregelbasierte Bewertung und die Logik zur zeitlichen Terminierung beschrieben werden.

Durchführbarkeitsprüfung der Montageschritte (1. Baustein)

Während der Identifizierung von alternativen Montageprozessen werden in einem Planungszeitpunkt nur diejenigen Montageschritte betrachtet, welche zu dem betrachteten Planungszeitpunkt durchführbar sind.

Ein Montageschritt ist zu einem Planungszeitpunkt durchführbar, wenn

1. die Vorgänger-Nachfolger-Prinzipien erfüllt sind. Das heißt, dass alle erforderlichen, vorgelagerten Montageschritte abgeschlossen sein müssen, bevor dieser Montageschritt bearbeitet werden kann.
2. die benötigten Materialien zur Verfügung stehen. Da nicht angenommen wird, dass vor Beginn des gesamten Montageprozesses, alle Materialien auf Lager liegen, sondern im Laufe der Montage termingerecht angeliefert werden, ist sicherzustellen, dass das angeforderte Material für die Montage bereitliegt.
3. die benötigten Ressourcen (Fachpersonal und Betriebsmittel) zur Verfügung stehen. Sofern Facharbeitskräfte als Ressourcen betrachtet werden, ist es erforderlich, dass die Facharbeitskraft mit den richtigen Qualifikationen zum Planungszeitpunkt genug Kapazität zur Verfügung stellt, damit ein Montageschritt in der Planungsperiode eingeplant werden kann.

Die Montageschritte, die diese drei Kriterien zu einem Planungszeitpunkt erfüllen, dienen als Input für die Generierung von alternativen Montageprozessen. Ein alternativer Montageprozess ist dem zu Folge vollständig, wenn alle Montageschritte, mit denen zum Zeitpunkt der Störung noch nicht begonnen wurde und diejenigen, welche sich in Bearbeitung befanden, neu terminiert wurden. Sofern bei einem Planungszeitpunkt mehrere durchführbare Montageschritte zur Auswahl stehen, basiert die Wahl eines Montageschrittes auf das Ergebnis einer prioritätsregelbasierten Bewertung.

Bewertungslogik anhand von Prioritätsregeln (2. Baustein)

Zur Erzeugung alternativer Montageprozesse wurde eine Bewertungslogik entwickelt, welche im Wesentlichen zwei Komponenten benötigt. Zunächst wurden Selektionskrite-

rien identifiziert, anhand derer einzelne Montageschritte gegeneinander priorisiert werden konnten (siehe Bild 4-4). Anschließend wurden Regeln erstellt, wie die Priorisierung auf Basis dieser Selektionskriterien stattzufinden hat.

Um eine Priorisierung durchführen zu können, sind quantifizierbare Werte notwendig. Jeder Montageschritt weist gewisse Eigenschaften auf, anhand derer innerhalb einer Menge von Montageschritten eine Priorisierung durchgeführt werden kann. Diese Eigenschaften lassen sich aus den Informationsbedarfen eines Montageschrittes ableiten, wie beispielweise die Bearbeitungszeit oder die Anzahl der Vorgänger bzw. Nachfolger. Diese Informationen stellen quantifizierbare Werte dar und können somit als Selektionskriterien herangezogen werden. Die Selektionskriterien können des Weiteren in unterschiedliche Informationstypen (siehe Bild 4-4) klassifiziert werden.

Selektionskriterien	Informa- tionstyp	Netzwerk	Zeit	Ressource
	Selektionskriterium	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl direkter Vorgänger Anzahl indirekter Vorgänger Anzahl direkter Nachfolger Anzahl indirekter Nachfolger 	<ul style="list-style-type: none"> Bearbeitungszeit Frühester Starttermin / spätester Endtermin eines Auftrages 	<ul style="list-style-type: none"> Ressourcentyp Ressourcenverbrauch Materialkosten

Bild 4-4: Darstellung u. Klassifizierung¹ von Selektionskriterien in Anlehnung an [KOL99]

Die eingeführten Selektionskriterien bilden die Datengrundlage zur Priorisierung einzelner Montageschritte. Die Selektionskriterien werden daher in Prioritätsregeln überführt. Es lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass mehrere Selektionskriterien in eine Prioritätsregel überführt werden können. Durch die Art und Weise der Kombination der Selektionskriterien weisen die daraus entstehenden Prioritätsregeln gewisse Charakteristika auf, die zusätzlich zur Klassifizierung herangezogen werden können.

Analog zur Klassifizierung der Selektionskriterien können Prioritätsregeln ebenfalls klassifiziert werden. Eine Übersicht über die Klassifizierungsparameter einer Prioritätsregel liefert das Bild 4-5. Die Klassifizierung der Prioritätsregeln besteht aus den Merkmalen Informationstyp, Informationsbedarf, Zeitabhängigkeit und Beschränkung.

¹ Netzwerk: Selektionskriterien, die der Klasse Netzwerk zugeordnet sind, werden aus Daten gebildet, welche die Netzwerkstruktur eines Produktes bzw. der enthaltenen Montageschritte wiedergeben. Hierzu zählen beispielsweise die Anzahl direkter und indirekter Vorgänger beziehungsweise Nachfolger.

Zeit: Der Klasse Zeit sind alle zeitbasierten Kriterien zuzuordnen. Neben der Bearbeitungszeit jedes Montageschrittes können zur Priorisierung auch der früheste Starttermin beziehungsweise der späteste Fertigstellungstermine eines Auftrages oder der Schlupf eines Montageschrittes herangezogen werden.

Ressource: Informationen über den benötigten Ressourcentyp, den Ressourcenverbrauch und die Materialkosten eines Montageschrittes werden in der Klasse Ressource zusammengefasst.

Prioritätsregeln	Merkmal	Informationstyp	Informationsbedarf	Zeitabhängigkeit	Beschränkung
	Ausprägung	Netzwerk	lokal	statisch	beschränkt
		Zeit			
		Ressource	global	dynamisch	unbeschränkt

Bild 4-5: Darstellung von Klassifizierungsparameter einer Prioritätsregel

Innerhalb jedes Merkmals ist jede Regel immer über eine der beiden Ausprägungen charakterisiert. [KOL96] Davon ausgenommen ist das Merkmal Informationstyp (drei Ausprägungen).

- Informationstyp: Analog der Klassifizierung der Selektionskriterien entspricht der verarbeitete Informationstyp den Klassen Netzwerk (N), Zeit (T) und Ressource (R).
- Informationsbedarf: Abhängig vom nötigen Informationsbedarf zur Berechnung einer Regel kann diese als lokal (L) oder global (G) bezeichnet werden. In lokalen Regeln werden nur Informationen des Montageschrittes (bspw. Bearbeitungszeit) selber oder seiner unmittelbaren Umgebung (z.B. direkte Vorgänger/Nachfolger) verarbeitet. Zur Berechnung von globalen Regeln wird auf einen größeren Teil der Netzwerkstruktur zurückgegriffen. Es werden also Informationen von einer großen Anzahl an Montageschritten benötigt (bspw. Regeln, die die Anzahl indirekter Nachfolger mit einbeziehen).
- Zeitabhängigkeit: Ist der Prioritätswert eines Montageschrittes abhängig von dem Planungszeitpunkt, zu der er berechnet wird, so spricht man von einer dynamischen (D) Regel. Die Regel bezieht den aktuellen Systemzustand oder den aktuelle Planungszeitpunkt mit in die Berechnung ein. Mit solchen Regeln muss der Prioritätswert zur Entscheidungsfindung also immer neu berechnet werden, da sich ihr zurückgegebener Funktionswert abhängig vom Systemzustand verändert. Im Gegensatz dazu liefert eine statische (S) Regel immer den gleichen Prioritätswert, unabhängig vom Zeitpunkt ihrer Berechnung. Die Prioritätswerte können einmalig berechnet werden und ändern sich mit vorlaufender Zeit nicht.
- Beschränkung: Prioritätsregeln sind entweder unbeschränkt (u) oder beschränkt (B). Beschränkungen bzw. Schranken können in zwei Varianten vorliegen. Entweder weist der Prioritätswert selbst eine Schranke auf oder die Regel bezieht eine Schranke in die Berechnung des Prioritätswertes mit ein.

Aufbauend auf der vorgestellten Logik sind im Rahmen des Forschungsprojekts eine Reihe möglicher Prioritätsregeln zur Bildung alternativer Montageprozesse analysiert worden.

Neben den Abkürzungen und Beschreibungen kann der Tabelle 4-1 die Klassifizierung und entsprechende Bedeutung einer Prioritätsregel entnommen werden.

Tabelle 4-1: Ausschnitt der Analyseergebnisse zu den Prioritätsregeln

Prioritätsregel		Klassifizierung		Bedeutung
Abkürzung	Beschreibung	Information	Ausprägung	
KOZ	Kürzeste Operationszeit	T	S, L, uB	Montageschritt mit der kürzesten Bearbeitungszeit
LOZ	Längste Operationszeit	T	S, L, uB	Montageschritt mit längster Bearbeitungszeit
HWT	Höchster Kapitalwert	R	S, L, uB	Montageschritt mit höchsten Materialkosten
NWT	Niedrigster Kapitalwert	R	S, L, uB	Montageschritt mit niedrigsten Materialkosten
KRB	Kürzeste Restbearbeitungszeit	N, T	S, G, uB	Montageschritt mit kleinster Summe der Bearbeitungszeiten aller nachfolgenden Montageschritte
GRB	Größte Restbearbeitungszeit	N, T	S, G, uB	Montageschritt mit größter Summe der Bearbeitungszeiten aller nachfolgenden Montageschritte
WAA	Wenigste ausstehende Montageschritte	N, T	D, G, uB	Montageschritt desjenigen Produktes mit der geringsten Anzahl ausstehender Montageschritte
MAA	Meiste ausstehende Montageschritte	N, T	D, G, uB	Montageschritt desjenigen Produktes mit der meisten Anzahl ausstehender Montageschritte
FFT / FLT	Frühester Fertigstellungstermin / Liefertermin	N, T	S, G, B	Montageschritt desjenigen Produktes mit frühestem Liefertermin
FAT	Frühester Anfangstermin	N, T	S, G, B	Montageschritt mit frühestem potentiellen Anfangstermin
Schlupf (1)	Geringster Schlupf (statisch)	N, T	S, G, B	Montageschritt mit der geringsten Differenz aus spätestem und frühestem Starttermin
Schlupf (2)	Geringster Schlupf (dynamisch)	N, T	D, G, B	Montageschritt mit der geringsten Differenz aus Fertigstellungstermin des Produktes abzüglich der Bearbeitungszeit des Montageschrittes und der Summe der Restbearbeitungszeiten nachfolgender Montageschritte bzgl. des aktuellen Planungszeitpunktes
MIN	Meiste Anzahl indirekter Nachfolger	N	S, G	Montageschritt mit der größten Anzahl direkter und indirekter Nachfolger
MDN	Meiste Anzahl direkter Nachfolger	N	S, G	Montageschritt mit der größten Anzahl direkter Nachfolger
PWR	Positionswertregel	N, T	S, L, uB	Montageschritte mit der größten

				Summe der Bearbeitungszeit und Restbearbeitungszeiten direkter Nachfolger
ZFP	Zufallsprinzip		D, L, uB	Zufällige Auswahl eines Montageschrittes
WP	Werkspriorisierung	T	S, L, uB	Montageschritt entsprechend des vom Anwender vergebenen Prioritätswertes
KAV	Kapazitätsverteilung	T	S, B	Angabe durch Anwender, dass Kapazitäten von Ressourcen zu einem bestimmten Anteil an Montageschritten von priorisierten Projekten genutzt werden

Auf Grund der Komplexität und Herausforderungen innerhalb der Montage von XXL-Produkten kann davon ausgegangen werden, dass Montageprozesse in ihrer Art sehr verschieden sein können. Daraus folgt, dass einzelne Prioritätsregeln abhängig vom Planungsumfeld und des konkreten Problemfalles unterschiedlich gut funktionieren. Zum Beispiel wenn die Abweichung der Bearbeitungszeiten über alle Montageschritte gering ist, ist die Verwendung einer Prioritätsregel welche sich auf dieses Selektionskriterium bezieht unter Umständen nicht zielführend, weil häufig Montageschritte mit dem gleichen Prioritätswert zur Auswahl stehen und so keine eindeutige Auswahl möglich ist. Aus diesem Grund wurde eine Systematik entwickelt, anhand derer unterschiedliche Problemfälle innerhalb der störungsbedingten Umplanung von Montageprozessen verglichen werden können (siehe Bild 4-6).

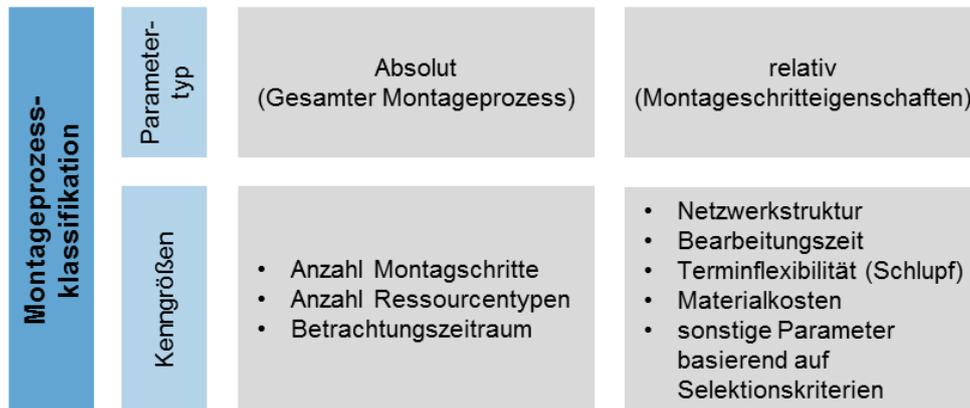


Bild 4-6: Systematik zur Klassifikation von Montageprozessen

Absolute Montageprozessparameter beziehen sich auf die Rahmenbedingungen, denen ein Montageprozess unterliegt. Diese geben eine schnelle und grobe Orientierung über die Größe des Montageproblems. Die absoluten Montageprozessparameter lassen jedoch keine Aussage über die Beschaffenheit bzw. Eigenschaften der enthaltenen Montageschritte zu. Als Beispiel sei hier eine Kombination aus Anzahl Montageschritte und Betrachtungszeitraum genannt. Die gleiche Anzahl an Montageschritten bei gleichem Betrachtungszeitraum kann entweder durch kurze und eher sequentiell verkettete Montageschritte oder durch länger dauernde aber dafür parallel durchführbare Montageschritte

erreicht werden. Aus diesem Grund werden zudem relative Montageprozessparameter eingeführt, welche sich auf die Informationen eines Montageschrittes beziehen.

Mit den Vertretern des projektbegleitenden Ausschusses wurde anhand der Systematik untersucht, wie gut sich die unterschiedlichen Regeln für die Montagesteuerung von XXL-Montageprozessen im Störfall nutzen lassen. Tabelle 4-2 können die Analyseergebnisse der Prioritätsregeln entnommen werden.

Tabelle 4-2: Anwendbarkeitsanalyse von Prioritätsregeln für die Forschungsfrage

Regel		Relevanz	Eigenschaften	Implementierung
Abkürzung	Beschreibung		Vorteile [+] & Nachteile [-]	
KOZ	Kürzeste Operationszeit	++	– Schnelle Wiedereinplanung bei kurzen Störungen [+] – Störbehafteter Montageschritt wird wieder schnell eingeplant (aufgrund Planungsgranularität) [-]	ja
LOZ	Längste Operationszeit	++	– Hohe Auslastung [+] – Verzögerung weiterer Montageschritte [-]	ja
HWT	Höchster Kapitalwert	++	– Gebundenes Kapitel wird umgesetzt [+]	ja
NWT	Niedrigster Kapitalwert	0	– Hohe Kapitalbildung im Lager [-]	nein
KRB	Kürzeste Restbearbeitungszeit	++	– Fokus weitestgehend fertiggestellter Produkte [+] – Geringe Varianz gleichzeitiger Produkte in Bearbeitung [+] – Erhöhung Terminabweichung kaum fertiggestellter Produkte [-]	nein
GRB	Größte Restbearbeitungszeit	++	– Fokus kaum fertiggestellter Produkte [+] – Geringe Varianz gleichzeitiger Produkte in Bearbeitung [+] – Erhöhung Terminabweichung weitestgehend fertiggestellter Produkte [-]	nein
WAA	Wenigste ausstehende Montageschritte	+	– Fast fertiggestellte Produkte werden schnell beendet [+]	nein
MAA	Meiste ausstehende Montageschritte	+	– Viele Unterschiedliche Produkte, um im weiteren Verlauf Auswahlmöglichkeiten zu generieren [+]	nein
FFT / FLT	Frühester Fertigstellungstermin / Liefertermin	+	– Fokus: Liefertermintreue [+] – Betrachtung Produkte und keine Montageschritte [-]	nein
FAT	Frühester Anfangstermin	+	– Ähnlichkeit zum Ursprünglichen Montageprozess bleibt weitestgehend erhalten [+] – Geringe Berücksichtigung der neuen Rahmenbedingungen infolge der Störung [-]	nein

Schlupf (1)	Geringster Schlupf (statisch)	++	– Fokus: Liefertermintreue [+] – Unabhängig von der bisherigen Terminierung [-]	ja
Schlupf (2)	Geringster Schlupf (dynamisch)	+	– Fokus: Liefertermintreue [+] – Abhängig von der bisherigen zeitlichen Terminierung [+]	ja
MIN	Meiste Anzahl indirekter Nachfolger	++	– Erhöhung Auswahlmöglichkeiten [+] – Zufällige Berücksichtigung logistischer Zusammenhänge [-]	nein
MDN	Meiste Anzahl direkter Nachfolger	++	– Erhöhung Auswahlmöglichkeiten [+] – Zufällige Berücksichtigung logistischer Zusammenhänge [-]	nein
PWR	Positionswertregel	+	– Berücksichtigung im Netzplan des Produktes eng eingebundene Montageschritte (frühe Durchführung technologisch kritischer Montageschritte) [+]	nein
ZFP	Zufallsprinzip	0	– Einfach und intuitiv zu implementieren [+] – Garantie für eine Lösung [+] – Keine Garantie auf „hohe“ Lösungsgüte [-]	ja
WP	Werkspriorisierung	0	– Berücksichtigung unternehmensspezifischer Informationen bzgl. der Bedeutung eines Kunden [+]	ja
KAV	Kapazitätsverteilung	++	– Berücksichtigung unternehmensspezifischer Informationen bzgl. der Kapazitätszuordnung von Produkten [+] – Fokus: Liefertermintreue [+]	ja

Durch die Analyse der Prioritätsregeln zeigten sich manche Prioritätsregeln als geeignet für die zu entwickelnde Gesamtmethode. Diese sind in der Tabelle 4-2 in der Spalte „Implementierung mit einem „ja“ gekennzeichnet. Im Hinblick auf die ausgewählten Prioritätsregeln lässt sich erkennen, dass diese unterschiedliche Informationsbedarfe und Ausprägungen beinhalten. Dies lässt sich darüber begründen, da eine Störung in der Einzel- und Kleinserienmontage als einzigartig angenommen werden kann und somit sinnvoll erscheint, eine hohe Variabilität an Prioritätsregeln aufgrund störfallspezifischer Änderungen der Rahmenbedingungen in der Montagesteuerung zu berücksichtigen. Die folgende Erläuterung soll dies bekräftigen: Grundsätzlich wird ein alternativer Montageprozess im Störfall auf Basis der logistischen Zielgrößen Termintreue, Auslastung, Bestand und Durchlaufzeit bewertet. Unter Umständen führt die Anwendung einer Prioritätsregel in Störfall A zu einer guten logistischen Zielerreichung, in Störfall B jedoch nicht. Grund dafür ist die störfallspezifische Änderung der Rahmenbedingungen in der Montagesteuerung. Entgegen dieser Argumentation stehen wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse bzgl. der Anwendung von Prioritätsregeln, insbesondere in der Fertigungssteuerung. Diese favorisieren im Allgemeinen die Prioritätsregeln wie „FiFo“ (First-In-First-Out) und „Schlupf“ aufgrund einer geringen Durchlaufzeitstreuung und einer daraus resultierenden höheren Termintreue.

Insgesamt ist Softwaredemonstrator derart aufgebaut, dass Prioritätsregeln als Bausteine angesehen werden können und daher beliebig erweiterbar sind bzw. im Softwaredemonstrator integriert werden können.

Terminierungslogik (3. Baustein)

Der letzte Baustein des Algorithmus zur Identifizierung von alternativen Montageprozessen besteht in der Terminierung von Montageschritten. Grundlage hierfür stellen die durchführbaren Montageschritte zu einem Planungszeitpunkt dar. Diese werden in absteigender prioritätsfolge den jeweils benötigt Ressourcen zugeordnet, bzw. entsprechend dem Planungszeitpunkt zeitlich terminiert. Schließlich ist anzumerken, dass für die Generierung eines alternativen Montageprozesses immer eine Prioritätsregel zu Grunde gelegt wird. D.h., dass während der Alternativengenerierung planungszeitpunktübergreifend kein Wechsel der Bewertungsgrundlage (Prioritätsregel) von durchführbaren Montageschritten zur Terminierung stattfindet bzw. berücksichtigt ist.

Die Vorgehensweise des Algorithmus zur Identifizierung von alternativen Montageprozessen soll nachfolgend anhand von Bild 4-7 beispielhaft illustriert werden

Beispielhafte Anwendung des Algorithmus

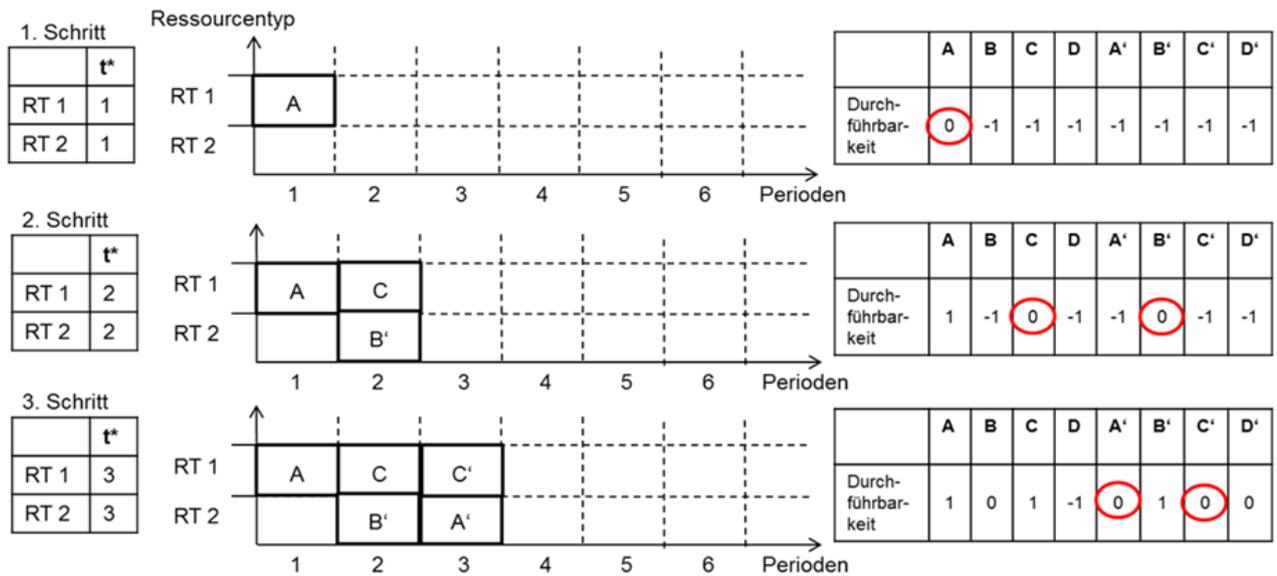
In dem Beispiel sind zwei Produkte (X und Y) mit jeweils 4 Montageprozessen (inklusive Vorrangbeziehungen) und zwei Ressourcentypen (RT1 und RT2) enthalten. Die Kapazität eines Ressourcentyps entspricht in jeder Periode 8 Einheiten (z. B. Mitarbeiterstunden). Jeder Montageschritt wird durch eine Bearbeitungszeit, einen Kapazitätsbedarf eines bestimmten Ressourcentyps sowie einen Termin für die Materialbereitstellung beschrieben. Beginn des Algorithmus ist der erste mögliche Planungszeitpunkt – Periode 1. Im ersten Planungszeitpunkt ist lediglich Montageschritt A durchführbar und wird dementsprechend auf den benötigten Ressourcentyp eingeplant. Da keine weiteren Montageschritte zu diesem Planungszeitpunkt mehr eingeplant werden können, wird der Planungszeitpunkt um eine Periode erhöht. Im zweiten Planungszeitpunkt existiert für jeden Ressourcentyp ein durchführbarer Montageschritt. Diese werden entsprechend dem Ressourcentyp terminiert. Im dritten Planungszeitpunkt existieren für jeden Ressourcentyp zwei durchführbare Montageschritte. In diesem Fall ist der entsprechende höchste Prioritätswert für die Terminierung entscheidend (hier: Zufallsprinzip). Dieser Ablauf wiederholt sich bis alle betrachteten Montageschritte zulässig eingeplant sind.

Produkt X				
Ressourcenanforderung	RT1	RT2	RT1	RT2
Montageschritt	A	B	C	D
Materialbereitstellungstermin	1	3	2	4
Bearbeitungszeit	1	1	1	1
Kapazitätsbedarf	8	8	8	8

Restriktion: C vor D

Produkt Y				
Ressourcenanforderung	RT2	RT2	RT1	RT1
Montageschritt	A'	B'	C'	D'
Materialbereitstellungstermin	3	2	2	3
Bearbeitungszeit	1	1	1	1
Kapazitätsbedarf	8	8	8	8

Restriktion: B' vor C'



0: durchführbarer Montageschritt 1: durchgeführter Montageschritt -1: nicht durchführbarer Montageschritt ○ ausgewählter Montageschritt

Bild 4-7: Beispielhafte Anwendung des Algorithmus

4.1.2 Darstellung von (alternativen) Montageprozessen

Zur Darstellung von alternativen Montageprozessen im Störfall existieren in der Literatur verschiedene Ansätze, welche bereits in unterschiedlichen Bereichen angewendet werden. Diese Ansätze können der Graphentheorie zugeordnet werden und lauten: Gantt-Chart, Netzplantechnik, AND/OR-Graphen und Petri-Netze. Im Hinblick auf das vorliegende Forschungsvorhaben wurden bei der Auswahl einer Darstellungsweise die Möglichkeiten seitens der zweckmäßigen Visualisierung von XXL-Montageprozessen im Störfall und praktischen Anwendbarkeit auf Basis der jeweiligen Vor- und Nachteile bewertet (siehe Bild 4-8).

	Gantt-Chart	Netzplan	And/OR-Graphen	Petri-Netze
Basis	Zeitliche Abfolge von Aktivitäten auf zugeordneten Ressourcen	Logische und zeitliche Abfolge von Aktivitäten	Fallspezifische Unterscheidung der logischen Abfolge von Aktivitäten	Logische und zeitliche Abfolge von Aktivitäten
Vorteil	<ul style="list-style-type: none"> Übersichtlichkeit und Kompaktheit Zeitlicher Verlauf und Ressourcenbelastung sofort erkennbar Universell einsetzbar Praxis weit verbreitet 	<ul style="list-style-type: none"> Anschauliche Darstellung Projektablauf Transparente Darstellung von Abhängigkeiten Abschätzung der zeitlichen Konsequenzen von Verzögerungen Hervorhebung Projektengpass 	<ul style="list-style-type: none"> Komprimierte Darstellung aller kombinatorisch möglichen Abfolgen Geringe Datenbedarf im Vergleich zu Netzplan 	<ul style="list-style-type: none"> Exakte und formale Beschreibung von Prozessen Vielfältig anwendbar
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Darstellungsmöglichkeit von Abhängigkeiten Nur für kleine Projekte geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> Ungeeignet für kleinere Projekte Desto höher Detaillierungsgrad, je höher Kontrollaufwand Teilweise nicht intuitiv 	<ul style="list-style-type: none"> Intransparent kritischer Pfad Hohe Unübersichtlichkeit bei vielen kombinatorisch möglichen Abfolgen 	<ul style="list-style-type: none"> Mitunter hohe Komplexität Hoher Aufwand Modellierung und Validierung eher akademischer Ansatz

Bild 4-8: Bewertung der Visualisierungsalternativen von Montageprozessen

Um eine finale Auswahl des Darstellungsverfahrens zu ermöglichen, wurde insbesondere die Produktstruktur analysiert. Hierbei zeigte sich, dass eine Kombination von Gantt-

Chart und Netzplan eine sinnvolle Kombination aus wissenschaftlicher und praktischer Sicht darstellt und in der Lage ist, die Komplexität der Entscheidungssituation hinreichend genau und dennoch übersichtlich abzubilden. Die hierbei umgesetzten Elemente werden in Kapitel 4.4 detailliert vorgestellt.

Grundsätzlich kann eine sehr detaillierte Betrachtung der Produkte auf der Ebene von Bauteilen/Stücklisten oder beliebige aggregierte Betrachtungsebenen für Modul- bzw. Baugruppen eingezogen werden, wobei das Verständnis über die Baugruppen unternehmensspezifisch zu formulieren ist (Bild 4-9). In einem Workshop zusammen mit Unternehmensvertretern des projektbegleitenden Ausschusses wurde der notwendige Detaillierungsgrad diskutiert. Hierbei zeigt sich, dass eine detaillierte Erfassung der Bauteile eines Produkts grundsätzlich Potenziale bietet, eine größere Anzahl an alternativen Montageprozessen für den Umplanungsfall zu identifizieren. Jedoch ergeben sich sehr detaillierte Datenbedarfe, welche in keinem der Unternehmen ohne weitere Aufbereitung vorlagen. Daher war eine Abstrahierung der Produkte notwendig, um einen geeigneten Kompromiss aus Aufwand und Nutzen für die Unternehmen zu finden.

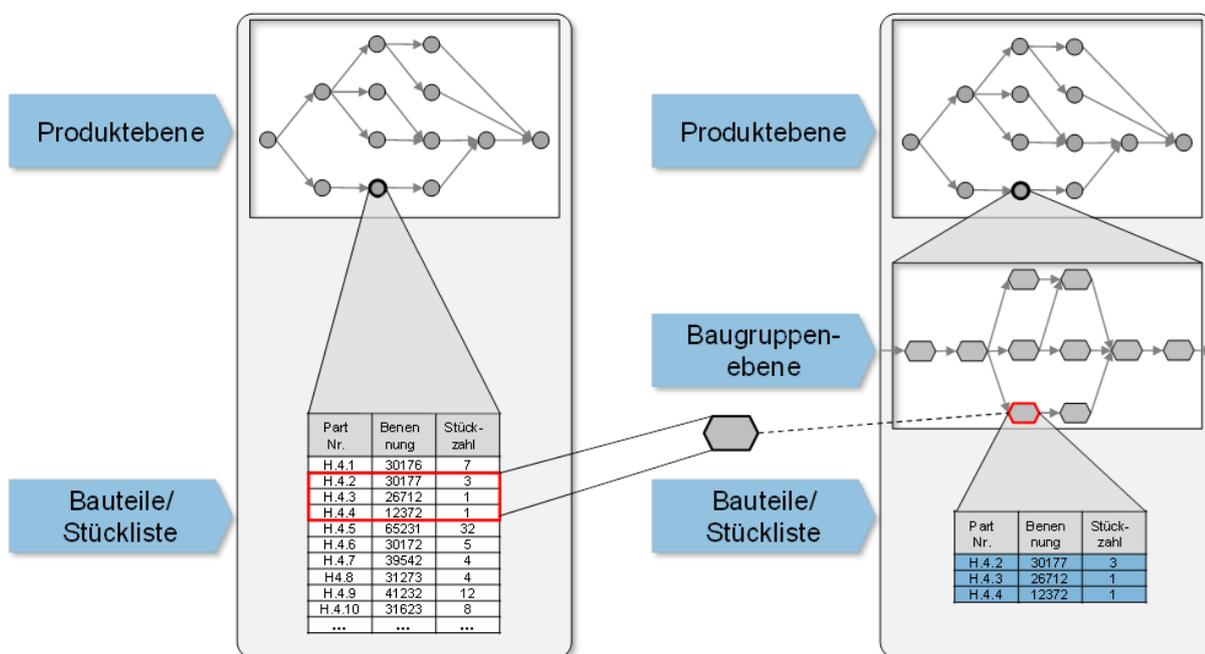


Bild 4-9: Definition des notwendigen Detaillierungsgrads

Das nachfolgende Beispiel (Bild 4-) einer Produktstruktur auf Baugruppenebene eines Unternehmens des projektbegleitenden Ausschusses demonstriert, dass sich bei dieser Betrachtung eine Reihe von parallelen und somit alternativen Reihenfolgen der Bearbeitung existiert.

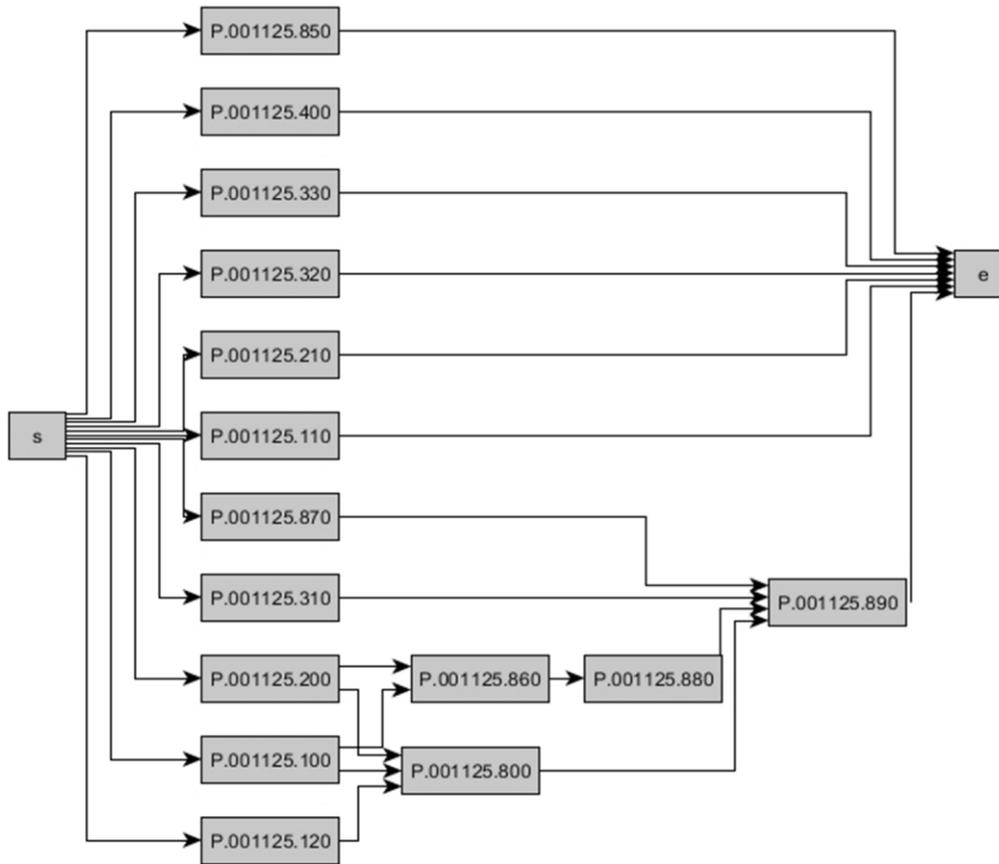


Bild 4-10: Produktstruktur eines Beispielprodukts in SAP

Abgeleitet aus der Produktstruktur wurde für vier Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses ein Montagevorrangfolgegraph erstellt, der die Abhängigkeiten der einzelnen Baugruppen untereinander visualisiert (Bild 4-11).² Es zeigt sich dass die Darstellung auf Baugruppenebene eine große Übersichtlichkeit bietet und somit für die Illustration alternativer Montageprozesse geeignet ist.

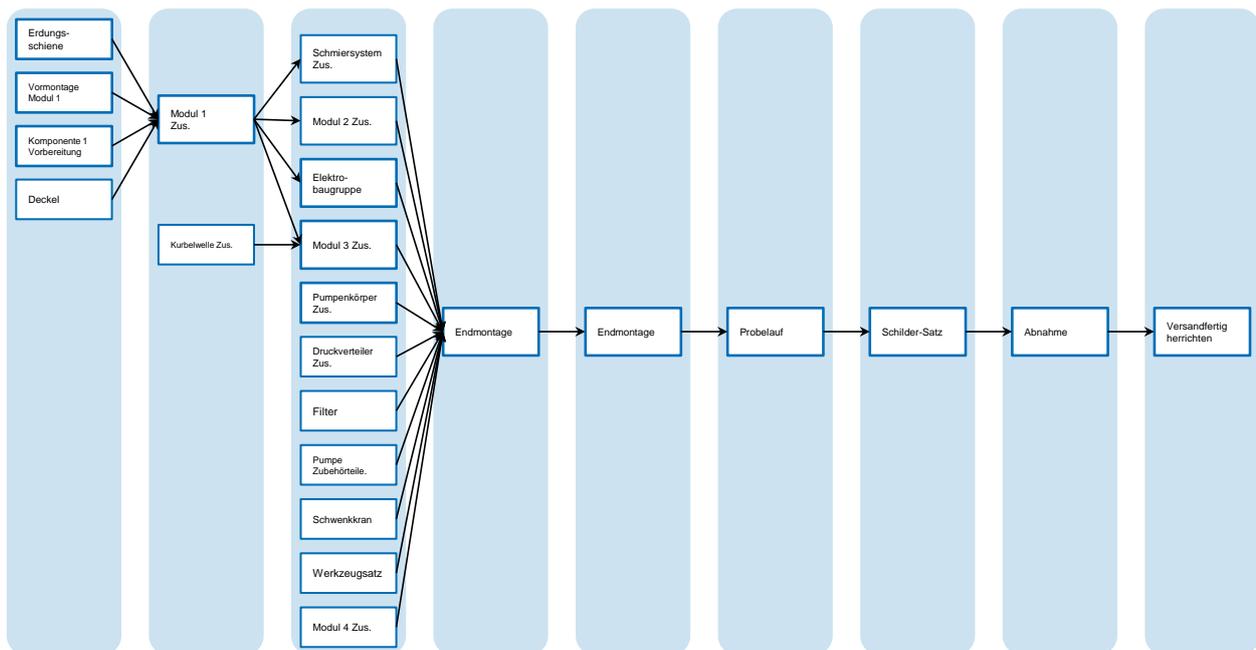


Bild 4-11: Aufbereitete Produktstruktur eines Beispielprodukts

² Weitere Montagevorrangfolgegraphen sind im Anhang A1 zu finden.

In mehreren Entwicklungsstufen wurden die finale Visualisierungsform entwickelt, die Eingang in den Softwaredemonstrator gefunden hat (Bild 4-2). Aufbauend auf den dargestellten Prioritätsregeln kann der Nutzer sich hierbei verschiedene, alternative Montageprozesse anzeigen lassen.

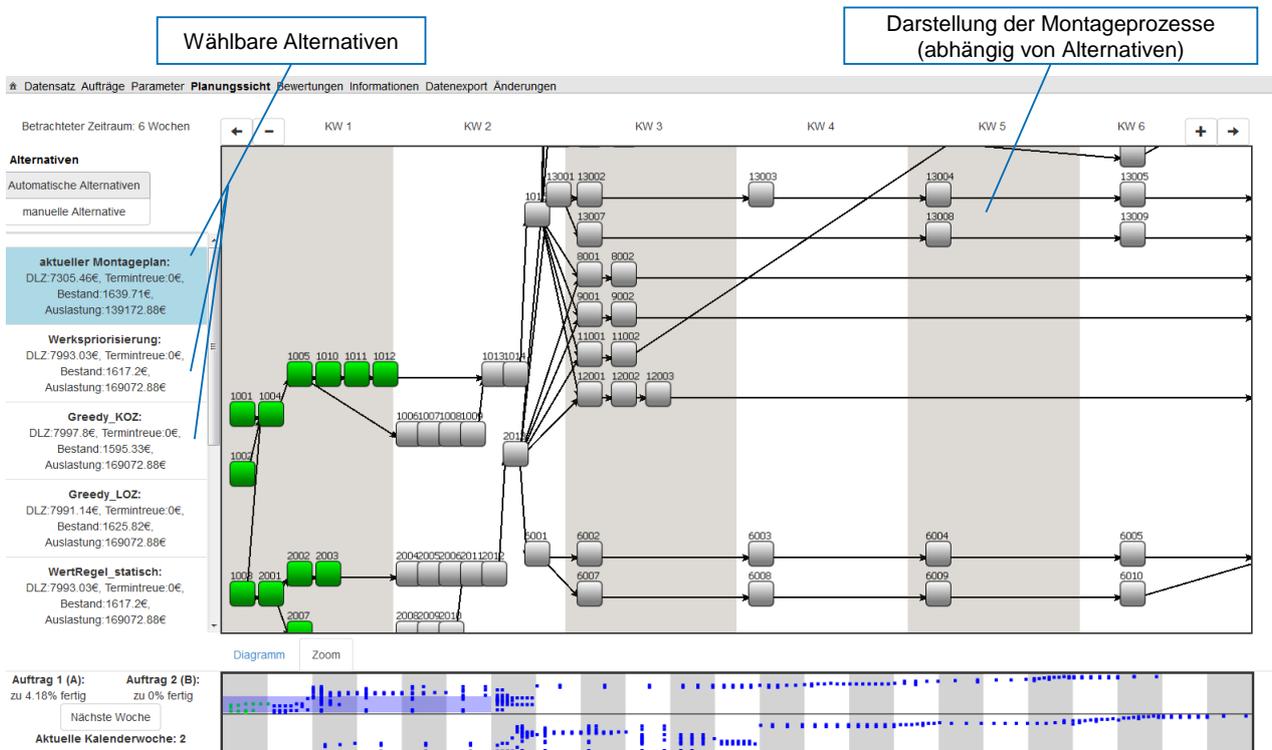


Bild 4-12: Im Softwaredemonstrator umgesetztes Darstellungskonzept³

4.2 AP II: Entwicklung eines Bewertungsmodells für alternative Montageprozesse

Im zweiten Arbeitspaket wurde ein Bewertungsmodell entwickelt, um alternative Montageprozesse anhand der logistischen Zielgrößen Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue monetär bewerten zu können. Dazu wurde in einem ersten Schritt herausgearbeitet, wie sich die logistischen Zielgrößen operativ für einen Montageprozess ermitteln lassen, und es wurden diesbezüglich Berechnungsgrundlagen definiert. Im zweiten Schritt wurde untersucht, wie sich diese Wertausprägungen monetär quantifizieren lassen. Die zu diesem Zweck für jede einzelne logistische Zielgröße aufgestellten Kostenbeziehungen konnten abschließend in ein ganzheitliches Kostenmodell überführt werden.

Der Montagebereich in einem Unternehmen verfolgt prinzipiell die gleichen logistischen Ziele wie die Produktionslogistik [SCM11]. Als relevante produktionslogistische Zielgrößen lassen sich in der wissenschaftlichen Literatur Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue ausmachen (siehe Bild 4-). Ersterer wird in einem produzierenden Unternehmen grundsätzlich in Lager- und Fertigungsbestand unterteilt. Der Lagerbestand umfasst Rohmaterialien, Halbfabrikate und Fertigteile. Dagegen beinhaltet der Fertigungsbestand die freigegebenen, aber noch nicht fertiggestellten Aufträge in der Produktion. Dieser wird im Weiteren aufgrund des Anwendungszusammenhangs als Montagebestand bezeichnet, unter dem die Bauteile zusammengefasst werden, die sich bereits im Montagesystem befinden. Die Auslastung eines Systems ist grundsätzlich als das

³ Vergrößerung im Anhang A2 zu finden

Verhältnis von Leistung und maximal möglicher Leistung definiert und unterscheidet sich bei verschiedenen Montageplänen nur, wenn die Durchlaufzeit der Aufträge sich auch unterscheidet. Die Durchlaufzeit eines Auftrages ist als die Zeitspanne zwischen der Auftragsfreigabe und dem Bearbeitungsende eines Auftrags definiert. Letztgenannte Zielgröße, die Termintreue, bezeichnet den prozentualen Anteil derjenigen Aufträge, die innerhalb einer gegebenen Termintoleranz um ihren Plan-Fertigstellungstermin fertiggestellt wurden. [LÖD08]

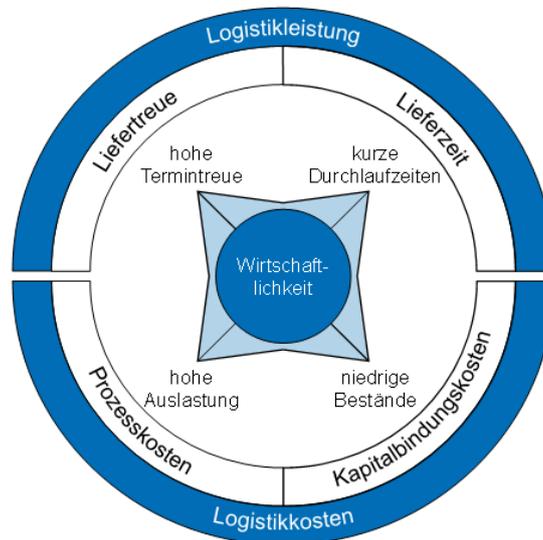


Bild 4-13: Produktionslogistische Zielgrößen nach LÖDDING [LÖD08]

Die genannten vier logistischen Zielgrößen stehen in einem Zielkonflikt zueinander. Das Zielsystem der Produktionslogistik (Bild 4-) veranschaulicht das sogenannte Dilemma der Ablaufplanung. Den Kunden sind hohe Liefertreue und kurze Lieferzeiten wichtig, dem Unternehmen geringe Prozess- und Kapitalbindungskosten. Die Sicherung einer hohen Auslastung erfordert hohe Bestände, die ihrerseits jedoch lange Durchlaufzeiten hervorrufen. Lange und damit erfahrungsgemäß stark schwankende Durchlaufzeiten stehen jedoch dem Ziel einer hohen Termintreue entgegen. [WIE14, GUT79]

Die notwendige Positionierung in diesem Spannungsfeld wird durch das vorzustellende Bewertungsmodell erleichtert, da die vier Zielgrößen in einen monetären Wert transferiert werden und dieser einen direkten Vergleich der Montageplanalternativen anhand einer einzigen Kennzahl ermöglicht. Diese Zusammenführung aller vier logistischen Zielgrößen in ein Kostenmodell stellt den Neuheitswert gegenüber den bereits existierenden Ansätzen zu dieser Thematik dar. Beispielsweise konzentriert sich JASINSKI in seiner Dissertation ausschließlich auf den Wert der Termintreue in Wertschöpfungsnetzwerken. Diese und weitere Arbeiten sind bei der Erarbeitung des zu erläuternden Modells eingeflossen. [SCH11, LÖD08, JAS14]

Die monetäre Bewertung alternativer Montageprozesse anhand der logistischen Zielgrößen kann als Methode verstanden werden, welche in zwei Schritten abläuft. Zuerst werden die Zielgrößen operativ und in ihren natürlichen Maßeinheiten ermittelt, um daraufhin im zweiten Schritt in einen monetären Wert überführt zu werden.

Der Methode liegen einige Annahmen zugrunde:

- Jeder Auftrag o besteht aus einer Menge durchzuführender Montageschritte M_A .

- Ein Montageprozess repräsentiert die Zuordnung von Montageschritten aller betrachteten Aufträge O auf unterschiedliche Ressourcen r in feste Perioden t . In jeder Periode sind die verfügbaren Kapazitäten C aller Ressourcen R definiert.
- Jeder Montageschritt benötigt Bauteile j und beansprucht erforderliche Ressourcen r über die entsprechende Dauer des Montageschrittes. Aufgrund der hohen Planungsgranularität (~Wochen) in der XXL-Montage wird die Dauer eines Montageschrittes auf die Länge einer Periode begrenzt, weshalb ein Montageschritt m genau einer Periode zugeordnet werden kann. Tatsächlich längere Montageschritte werden in dem Modell zunächst in mehrere Montageschritte heruntergebrochen, die maximal die Länge einer Periode betragen.
- Alternative Montagepläne werden im Zeitpunkt des Erkennens eines Störfalles erzeugt, bewertet und verglichen. Daher wird die Periode dieses Zeitpunktes als Bezugsperiode $t=0$ herangezogen. Die Bewertung anhand der Größen, bei denen der zeitliche Aspekt eine Rolle spielt, erfolgt beginnend mit der Periode $t=1$.
- Der Betrachtungszeitraum des Montageplans aller Aufträge ist begrenzt durch den Beginn des ersten und die Fertigstellung des letzten Montageschrittes. Auslieferungsprozesse werden dementsprechend nicht betrachtet.
- Die Kapazitäten C aller Ressourcen r werden ausschließlich für die Montage der betrachteten Aufträge O eingesetzt. Für zukünftige Montageaufträge stehen diese erst wieder zur Verfügung, nachdem der letzte Montageschritt der betrachteten Aufträge beendet wurde. Diese Annahme ermöglicht eine positive Bewertung von zeitlich kürzeren Montageplänen hinsichtlich der Auslastung. Je kürzer die Durchlaufzeit eines Auftrags auf Basis des aktuellen Montageplans ist, desto höher ist die Auslastung der Ressourcen und umgekehrt.

4.2.1 Operative Ermittlung der logistischen Zielgrößen

Bestand

In einem produzierenden Unternehmen lässt sich der Bestand grundsätzlich in Lager- und Fertigungsbestand unterteilen. Beide Kenngrößen können entweder in Mengeneinheiten oder für die finanzielle Bewertung in Währungseinheiten gemessen werden. [LÖD08]

Um den Lagerbestandswert W_{LB} des betreffenden Montagesystems zu ermitteln, wird die Summe über die einzelnen Werte w_i^L (Einkaufspreise) aller im Lager befindlichen Bauteile i , sprich über das im Lager gebundene Kapital, gebildet: [MÜL13]

$$W_{LB} = \sum_{i=1}^I w_i^L$$

$$i = 1, \dots, I [-]$$

Gelagerte Bauteile werden im Prozess für die Montage aus dem Lager abgerufen und parallel werden neue Bauteile angeliefert. Aufgrund dieser ständigen Ein- und Auslagerungs-Prozesse ändert sich der Lagerbestand mit der Zeit. Für die Bewertung wird daher ein durchschnittlicher Lagerbestandswert (W_{LB}^{\emptyset}) über eine Periode t benötigt. Dieser berechnet sich aus der Hälfte der Summe aus den Lagerbestandswerten zum Anfang

(W_{ALB_t}) und zum Ende (W_{ELB_t}) der Periode – diese Werte stellen Konkretisierungen des Lagerbestandswertes W_{LB} dar:

$$W_{LB_t}^{\emptyset} = \frac{W_{ALB_t} + W_{ELB_t}}{2}$$

$$t = 1, \dots, T \text{ [ZE]}$$

Analog verhält es sich mit der Berechnung des Montagebestandswertes W_{MB} . Auch dieser unterliegt einer zeitlichen Veränderung. Allerdings wird er stetig, aber nicht linear, mit dem Montageverlauf ansteigen, da pro Periode Materialien aus dem Lager in das Montagesystem einfließen und montiert werden.

Zunächst wird zur Ermittlung von W_{MB} die Summe über die einzelnen Werte w_j^M aller im Montagesystem befindlichen Bauteile j gebildet:

$$W_{MB} = \sum_{j=1}^J w_j^M$$

$$j = 1, \dots, J \text{ [-]}$$

Der durchschnittliche Montagebestandswert einer Periode t ($W_{MB_t}^{\emptyset}$) wird wie folgt berechnet:

$$W_{MB_t}^{\emptyset} = \frac{W_{AMB_t} + W_{EMB_t}}{2}$$

$$t = 1, \dots, T \text{ [ZE]}$$

mit

W_{AMB_t} : Montagebestandswert W_{MB} am Anfang einer Periode t [€]

W_{EMB_t} : Montagebestandswert W_{MB} am Ende einer Periode t [€]

Auslastung

Die Auslastung der Ressourcen A_r im Montagesystem für einen beliebigen Zeitraum berechnet sich aus dem Verhältnis der Leistung L_r zur maximal möglichen Leistung. Vereinfachend wird im Nenner statt der maximal möglichen Leistung die Kapazität C_r der jeweiligen Ressource angenommen.

Diese Zielgröße wird für jede Ressource r (Fachpersonal und Betriebsmittel) ermittelt, die bei der Montage benötigt wird.

$$A_r = \frac{L_r}{C_r}$$

$$r = 1, \dots, R \text{ [-]}$$

Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit DLZ_o eines Montageauftrags o ist die Zeitspanne zwischen dem Ist-Beginn („Anfang“: $z_o^{A,ist}$) des ersten und dem Ist-Ende ($z_o^{E,ist}$) des letzten Montageschritts. Sie kann je nach betrachtetem Montageumfang in Stunden, Betriebskalendertagen oder Kalenderwochen (KW) gemessen werden.

$$DLZ_o = z_o^{E,ist} - z_o^{A,ist}$$

$$o = 1, \dots, O [-]$$

Termintreue

Die Terminintreue bezeichnet den prozentualen Anteil derjenigen Montageaufträge, die innerhalb einer gegebenen Termintoleranz um ihren Plan-Fertigstellungstermin fertiggestellt wurden. Sie ist eine vergangenheitsbezogene Kennzahl [KUY13]. Da die Bewertung der alternativen Montageprozesse jedoch zum Zeitpunkt des Erkennens eines Störfalls in der Montage durchgeführt werden muss, wird hierfür auf die Terminabweichung im Abgang TAA_o , also die Differenz von Ist- und Plan-Bearbeitungsende ($z_o^{E,plan}$) des zuletzt durchzuführenden Montageschrittes, zurückgegriffen [DOM88]. Diese wird für jeden Montageauftrag o einzeln ermittelt und in Kalenderwochen gemessen.

$$TAA_o = z_o^{E,ist} - z_o^{E,plan}$$

$$o = 1, \dots, O [-]$$

4.2.2 Überführung der logistischen Zielgrößen in Kostengrößen

Nach der operativen Ermittlung der Wertausprägungen von Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue wurden diese Größen in Kostengrößen überführt. Dieser Transformationsschritt wird im Folgenden für jede einzelne logistische Zielgröße erläutert.

Bestand

Um Überschneidungen mit der Durchlaufzeit zu vermeiden, wurde die Zielgröße Bestand ausschließlich anhand des Lagerbestands in eine monetäre Größe überführt.

Für den Bestand im Lager fallen Kosten an, die als Lagerhaltungskosten (K_{LH}) bezeichnet werden. Diese setzen sich aus Kapitalkosten (K_K), Lagerinfrastrukturkosten (K_{LI}) und Entwertungsrisikokosten (K_{ER}) zusammen. Für alle drei Kostenkomponenten wird angenommen, dass sie sich proportional zum durchschnittlichen Lagerbestandswert verhalten. Dieser wird über alle Perioden t zwischen dem Störfall und dem Montageplanende aufsummiert. Als Proportionalitätsfaktor wird der kalkulatorische Lagerhaltungskostensatz q , als ein Prozentsatz pro Jahr, eingesetzt. Damit ergibt sich für die Lagerhaltungskosten folgende Berechnungsformel: [SHÖ11]

$$K_{LH} = K_K + K_{LI} + K_{ER} = \left(\overset{\text{Perioden pro Jahr}}{\text{Perioden pro Jahr}} \sqrt{1 + q} - 1 \right) * \sum_{t=1}^T W_{LB_t}^\emptyset$$

$$t = 1, \dots, T [ZE]$$

In den angesetzten Lagerhaltungskostensatz fließen Kosten ein, die von Branche zu Branche stark variieren können. Beispielsweise muss für das Entwertungsrisiko bei leicht korrodierenden Metallbauteilen oder schnell brüchig werdenden Gummi- oder Kunststoffteilen, analog zu kurzlebigen Artikeln wie Lebensmitteln oder Medikamenten, ein erheblich höherer Kostensatz angesetzt werden. Diese Kalkulationsgröße ist von jedem Unternehmen spezifisch festzulegen. Eine standardmäßige und weit verbreitete Regel positioniert den Lagerhaltungskostensatz bei 25% p.a. des vorhandenen Lagerbestandswerts. [SHÖ11]

Auslastung

Die Kosten für nicht genutzte Kapazitäten einer Ressource r lassen sich als sogenannte Leerkosten K_{Lr} berechnen, wobei zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Betriebsbereitschaft des Montagesystems Fixkosten K_{fix_r} anfallen. Die im zeitlichen Verlauf variierenden Leerzeiten von Ressourcen werden über alle Perioden t gemessen.

In der letzten Periode T , in der der letzte Montageschritt der betrachteten Aufträge endet, stehen die an den Auftrag gebundenen Ressourcen wieder für andere Aufträge zur Verfügung (projektcharakter). Mit diesem Gedanken kann verhindert werden, dass durch sehr hohe Leerzeitanteile von Ressourcen, die in der letzten Periode kaum ausgelastet sind, das Bewertungsergebnis zu stark verzerrt wird. Außerdem ergibt sich dadurch ein differenzierteres Ergebnis bezüglich der Auslastung bei Montageprozessen, die dieselbe Durchlaufzeit haben. Daher werden in dieser letzten Periode die Leerkostenanteile über die Differenz aus der Auslastung der höchstausgelasteten Ressource ($\max(A_T)$) abzüglich der Auslastung der betrachteten Ressource (A_{rT}) berechnet. Die höchstausgelastete Ressource definiert somit die maximale Auslastung und fließt also in dieser Periode als volla ausgelastete Ressource (und somit mit einem nullprozentigen Leerkostenanteil) in die Bewertung ein.

$$\max(A_T) - A_{rT}$$

Die Summe über alle ressourcen- und periodenspezifischen Leerkostenanteile K_{Lr} ergibt die Leerkosten des gesamten Montagesystems K_L im betrachteten Zeitraum. [GUT79, MÜL13]

$$K_L = \sum_{r=1}^R K_{Lr} = \sum_{r=1}^R K_{fix_r} * \left[\sum_{t=1}^{T-1} (1 - A_{rt}) + \max(A_T) - A_{rT} \right]$$

Durchlaufzeit

Aufgrund einer schwierigen direkten Überführung der Lieferdauer in einen Kostensatz wird hier der indirekte Ansatz gewählt, die Durchlaufzeit eines Montageprozesses anhand der Kapitalbindung des Montagebestands K_{KBM} monetär zu bewerten. Die Kapitalbindung des Montagebestands über alle Aufträge berechnet sich durch Multiplikation eines periodischen kalkulatorischen Zinssatzes s mit dem durchschnittlichen Montagebestandswert W_{MB}^\emptyset , der über alle Perioden beginnend mit $t=1$ bis $D=t_{E}^{soll}$, Soll-Bearbeitungsende, respektive $D=t_{E}^{ist}$, Ist-Bearbeitungsende, aufsummiert wird:

$$K_{KBM} = \left(\text{Perioden pro Jahr} \sqrt{1+s} - 1 \right) * \sum_{t=1}^D W_{MB_t}^\emptyset$$

$$D = \max(t_{E}^{soll}, t_{E}^{ist})$$

Die Maximierungsfunktion ist dadurch begründet, dass bei einer verfrühten Fertigstellung trotzdem der ursprüngliche Soll-Fertigstellungstermin herangezogen wird, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine verfrühte Auslieferung möglich ist und damit die Kapitalbindung weiter bestehen bleibt.

Termintreue

Zur monetären Bewertung des Montageprozesses anhand der Termintreue wird die damit stark korrelierende Größe Terminabweichung im Abgang (TAA), die Differenz von Ist- und Plan-Bearbeitungsende, herangezogen.

Die Terminabweichung im Abgang kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Werte größer als Null stehen für eine Terminüberschreitung des Fertigstellungstermins, wodurch Kosten verursacht werden, die untenstehend näher erläutert werden. Werte kleiner als Null weisen dagegen darauf hin, dass ein Produkt verfrüht fertiggestellt wurde. Aufgrund dieser Terminunterschreitung können ebenfalls fallspezifische Kosten (K_{TU}) anfallen – zum Beispiel im Fertigwarenlager, sofern die Lieferung und Fakturierung nicht ebenfalls vorzeitig erfolgen kann. Eine verfrühte Fertigstellung bringt aber auch positive Aspekte mit sich. Beispielsweise stehen Ressourcenkapazitäten wieder früher für andere Aufträge zur Verfügung. Diese positive Sichtweise fließt über die Auslastung in die Bewertung mit ein. [BLO08]

Die monetäre Bewertung eines Montageprozesses hinsichtlich eines ermittelten Zeitverzugs, d.h. eines positiven Wertes für die TAA, erfolgt anhand eines Stufenmodells in Anlehnung an JASINSKI. Basis dieses Modells ist der Gedanke, dass gewisse Zeitverzüge durch entsprechenden Mehraufwand kompensiert werden können. Die Schranken der Zeitverzüge (z_1 , z_2 usw.) sind dabei unternehmens- und situationsspezifisch. Die Kosten des Mehraufwands ergeben den monetären Wert einer Terminabweichung. [JAS14]

1. Zeitverzug < 0 : Wie bereits obenstehend beschrieben, fallen bei einer verfrühten Fertigstellung Terminunterschreitungskosten K_{TU} pro Periode an.
2. Zeitverzug $= 0$: Das Produkt wird pünktlich fertiggestellt und es fallen keine Kosten an.
3. $0 < \text{Zeitverzug} \leq z_1$: Dieser Zeitverzug wird mit Kosten für auslieferungsbeschleunigende Maßnahmen K_V belegt. Es wird also davon ausgegangen, dass eine geringe Terminabweichung durch diese Kompensationsaktivitäten in der Auslieferung ausgeglichen werden kann. Es fallen Mehrkosten an, die durch die Wahl einer neuen, schnelleren Transportart entstehen können, etwa der Verlagerung von Containerfracht auf Expresslieferung per Luftfracht. Um- bzw. Neuplanungen dieser Versandalternativen führen außerdem zu Personalkosten.
4. $z_1 < \text{Zeitverzug} \leq z_2$: Durch zusätzliche Maßnahmen kann dieser Zeitverzug in der Inbetriebsetzung kompensiert werden, wenn eine solche Inbetriebsetzung, wie häufig im Maschinen- und Anlagenbau anzutreffen, notwendig ist. Sie stellen dann die letzte Möglichkeit für einen Hersteller dar, den zugesagten Termin beim Kunden zu halten und Konventionalstrafen zu vermeiden, und sind mit (ungeplanter) Mehrarbeit und Mehrkosten K_{IB} verbunden. Dies geschieht in der Regel durch das Ausschöpfen des maximal verfügbaren Kapazitätsangebots in Form von Zusatzschichten (z.B. Nacht-, Samstags- und Sonntagsschichten) oder nach Möglichkeit der Aussendung von mehr Inbetriebsetzungspersonal.
5. Zeitverzug $> z_2$: Ab einem gewissen Terminüberschreitungszeitpunkt ist der Zeitverzug nicht mehr durch unternehmensseitige Maßnahmen zu kompensieren. Der zugesagte Termin kann nicht gehalten werden. Es fallen ab diesem Zeitpunkt in vielen Branchen Pönalen K_P an, d.h. Strafzahlungen, die vertragsabhängig sind und sich für gewöhnlich nach der Lieferzeit und dem Auftragsvolumen richten. In der Maschinen- und Anlagenbaubranche ist die Zahlung eines auftragsvolumenabhängigen Pönale-Satzes k_{PS} auf

wöchentlicher Basis die Regel. Als Richtwert können 0,5% des Auftragsvolumens AV je angefangener Verzugswoche angesetzt werden, der üblicherweise durch einen ebenfalls auftragsabhängigen Deckelungsbetrag K_D begrenzt ist. Eine gesetzliche Regelung dieser Konventionalstrafen findet sich seit Inkrafttreten des BGB in den §§ 339 bis 345. [BGB13]

Die Kosten aufgrund einer Verspätung des montageseitigen Fertigstellungstermins K_{TA} lassen sich somit mit folgender stufenförmiger Formel abbilden:

$$K_{TA}(TAA) = \begin{cases} -TAA * K_{TU} & , \text{wenn } TAA < 0 \\ 0 & , \text{wenn } TAA = 0 \\ K_V & , \text{wenn } 0 < TAA \leq z_1 \\ K_V + K_{IB} & , \text{wenn } z_1 < TAA \leq z_2 \\ K_V + K_{IB} + K_P(TAA) = K_V + K_{IB} + (TAA - z_2) * k_{PS} * AV & , \text{wenn } z_2 < TAA \wedge K_P < K_D \\ K_V + K_{IB} + K_D & , \text{wenn } K_P \geq K_D \end{cases}$$

4.2.3 Zusammenführung in ein ganzheitliches Kostenmodell

Das ganzheitliche Modell der monetären Bewertung von Montageplänen entsteht durch Addition der vier vorgestellten Kostengrößen zu den Gesamtkosten für den Montageplan K_{MP} :

$$K_{MP} = K_{LH} + K_L + K_{KBM} + K_{TA}$$

Bild 4- gibt abschließend einen Überblick über die vier logistischen Zielgrößen und deren Überführung in Kostengrößen.

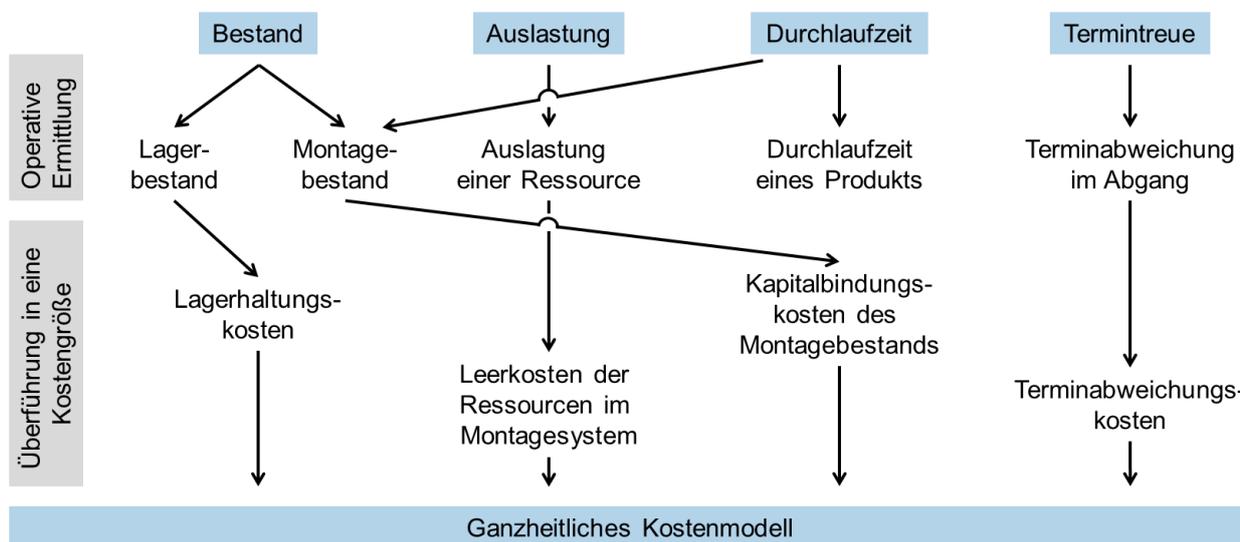


Bild 4-14: Überblick über den Transfer von logistischen Zielgrößen in Kostengrößen

Die vorgestellte Methode ermöglicht es, die Wertausprägungen der vier logistischen Zielgrößen Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue eines Montageplans in einem einzigen monetären Wert abzubilden. Insbesondere bei den beiden letztgenannten Zielgrößen ist diese Überführung nur bedingt und mit vereinfachten Annahmen möglich gewesen. So wurde beispielsweise der Aspekt, dass einem Unternehmen mit einer schlechten Termintreue zukünftige Kundenaufträge entgehen könnten, im Modell nicht berücksichtigt. Monetäre Vorteile kurzer Durchlaufzeiten sind beispielsweise, dass diese

über verkürzte Lieferzeiten sofort umsatzwirksam sein können. Die Einschränkung der rein monetären Quantifizierbarkeit zeigt exemplarisch, dass neben der Unterstützung durch das vorgestellte Modell auch die Erfahrung und das Wissen von Fachpersonal und Unternehmensführung für eine Entscheidungsfindung erforderlich sind.

Das Ziel, Montageplanalternativen anhand einer Kenngröße bewerten und untereinander vergleichen zu können, wurde durch die dargestellte Methode erreicht, welche vollumfänglich im Softwaredemonstrator umgesetzt wurde.

4.3 AP III: Identifikation von Informationsbedarfen und Aufbau eines Datenmodells

Im dritten Arbeitspaket erfolgten die Identifikation der für die Methode erforderlichen Informationsbedarfe und der Aufbau eines Datenmodells. Diese beiden Schritte werden in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert.

4.3.1 Identifikation von Informationsbedarfen

Während der Bearbeitung des ersten und zweiten Arbeitspakets konnten die benötigten Daten bereits größtenteils identifiziert werden. Bei einem Meilensteintreffen im Februar 2015 wurde mit den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses geprüft, welche Daten standardmäßig vorliegen und welche gegebenenfalls erst noch ermittelt werden müssen. Außerdem wurde der Datenkatalog durch weitere Vorschläge seitens der Unternehmen ergänzt. Zusätzlich wurden Datentyp und –herkunft, sowie Art der Datenerhebung dokumentiert.

Der Übersichtlichkeit halber sind in Bild 4-5 lediglich die kategorisierten Informationsbedarfe dargestellt. Die deklarierten Datentypen können dem Datenmodell in Unterkapitel 4.3.2 aus Bild 4-66 entnommen werden. Zum einen werden auftragsbezogene Daten wie die Anzahl parallel betrachteter Kundenaufträge inklusive Vorrangfolge der Montagevorgänge benötigt, sowie zum anderen planungsobjektspezifische Informationen wie der benötigter Materialbedarf, Durchführungs- und Übergangszeiten. Neben ressourcenbezogenen Informationen werden schließlich noch Informationen in Form von Kostensätzen für die Bewertung benötigt.

Im Störfall werden diese Informationen um störfallspezifische Informationen wie Störungsdauer und Störungsursache des störfahrigsten Montageschrittes ergänzt und dem Algorithmus zur Identifikation von alternativen Montageprozessen zur Verfügung gestellt.

Ausgangsbasis		Methode
Auftrag	Planungsobjekt (Montagevorgang)	Input
<ul style="list-style-type: none"> Anzahl Kundenaufträge Anzahl Montagevorgänge Vorrangfolgebeziehung Montagevorgänge Plan-Liefertermin und Starttermin Vertriebsseitige Priorisierung Kundenauftrag 	<ul style="list-style-type: none"> Bauteile / Komponenten Bereitstellungstermin Durchführungszeit Übergangszeit Qualifikationsanforderung Personalbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> Störungsursache Störungsdauer Zeitpunkt Information Störung Störbehafteter Montagevorgang
Ressource	Bewertung	Output
<ul style="list-style-type: none"> Schichtmodell Anzahl verfügbarer Ressourcen je Periode 	<ul style="list-style-type: none"> Einkaufspreis Material Kapitalbindungskosten / Zinssatz Ressourcenstundenkostensatz Pönale Terminüberschreitung 	<ul style="list-style-type: none"> Soll-Starttermin Montagevorgang Soll-Fertigstellungstermin Kundenauftrag Zulässiger Ressourcenbelegungsplan

Bild 4-15: Darstellung der kategorisierten Informationsbedarfe

4.3.2 Aufbau eines Datenmodells

Für die Speicherung der identifizierten Datenbedarfe wurde auf Basis des Datenkatalogs ein Datenmodell in Form einer Postgre-Datenbank aufgebaut (Bild 4-6). Hinsichtlich der Vermeidung redundanter Daten und für einen schnellen Zugriff auf die Datenbank wurde der Datenbedarf analysiert und in eine Normalform gebracht. Ergebnis ist ein Datenmodell mit folgenden 12 Tabellen: Datensatz, Auftrag, Änderung, Einstellungen, Montageschritt, Baugruppe, Alternative, Ressource, Kapazität, Material, Materiallieferung und Vorgänger. Mithilfe dieser Tabellen ist es möglich, den gesamten Informationsbedarf abzudecken.

Jede Tabelle besitzt Attribute, welche als Spalten in der Tabelle interpretiert werden können. Die Attribute besitzen immer einen Datentyp, wie z.B. String oder Integer, und einen Namen. Außerdem besitzt jeder Eintrag in einer Tabelle ein Attribut namens ID. Diese sind einzigartig und haben die Funktion, ein schnelles Auslesen zu ermöglichen und die Daten für die Darstellung im Browser zu anonymisieren. Die Verbindungen im Bild zeigen die Abhängigkeiten zwischen den Tabellen.

Der Client bzw. Nutzer ist durch die Datenbank in der Lage, CRUD-Operationen zu benutzen, d.h. Daten zu speichern, zu ändern, zu lesen und zu löschen.

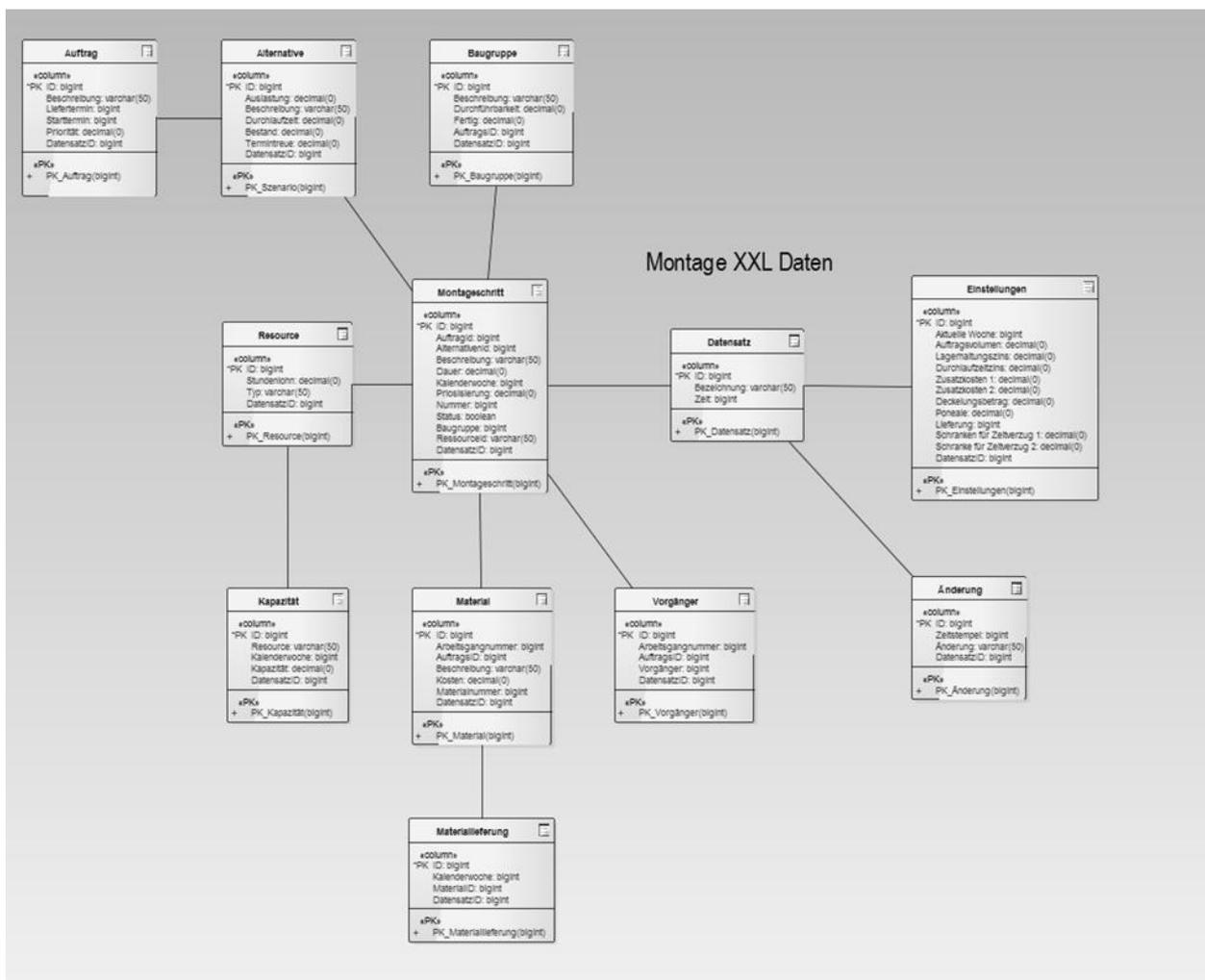


Bild 4-66: Aufbau des Datenmodells⁴

4.4 AP IV: Entwicklung eines Softwaredemonstrators

4.4.1 Aufbau und Funktionen des Softwaredemonstrators

Nachfolgend wird zuerst die prinzipielle Funktionsweise des Demonstrators vorgestellt und dann, vor allem auf die Usernutzung bezogen, dessen Aufbau erläutert.

Bild 4-7 zeigt den inneren Aufbau und die Funktion des Softwaredemonstrators zur Alternativengenerierung, logistischen Bewertung und Visualisierung von alternativen Montageprozessen im Störfall in sogenannten Software-„Modulen“. Der Softwaredemonstrator besteht somit aus den Modulen: Auftragsinformationen, Datenbank, Störfallinformationen, Alternativengenerierung, logistische Bewertung und Benutzeroberfläche, wobei Alternativengenerierung und logistische Bewertung die Umplanung beschreiben.

⁴ Vergrößerung im Anhang A2 zu finden.

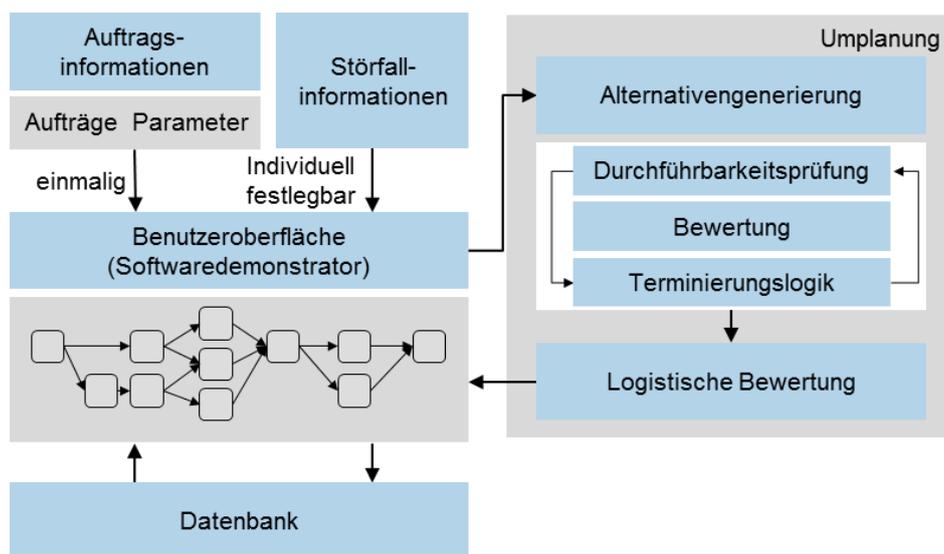


Bild 4-17: Innerer Aufbau und Funktionen des Softwaredemonstrators

Die für den Softwaredemonstrator erforderlichen Datenbedarfe, welche in Unterkapitel 4.3.1 beschrieben sind, sind als Datenbankmodell (siehe Unterkapitel 4.3.2) im Demonstrator implementiert und im Datenbank-Modul des Softwaredemonstrators verankert. Bei diesen Informationsbedarfen handelt es sich um „Offline-Daten“, welche bspw. auch für eine Montageplanung genutzt werden können. Die Umplanung sorgt im Störfall unter Einbeziehung von aktuellen Informationen („Online-Daten“) dafür, dass die Anpassungen für einen neuen Montageplan entsprechend der Zielsetzung des Unternehmens gering gehalten werden. Unter „Online-Daten“ sind hierbei der gestörte Montageschritt, die Störungsursache und einhergehende Störungsdauer, der Zeitpunkt der Störung sowie eine Änderung von Kundenauftragsinformationen (Lieferterminänderung usw.) zu verstehen. Die „Online-Daten“ werden in dem Störfallinformations-Modul erfasst und dem Alternativengenerierungs-Modul, neben den Offline-Daten, zugeführt. Die Generierung von alternativen Montageprozessen basiert, wie zuvor beschrieben, auf einer rekursiven Durchführbarkeitsprüfung und prioritätsregelbasierten Terminierungslogik von Montageschritten. Das Ergebnis des Generierungs-Moduls ist ein aus technologischer, materieller und kapazitiver Sicht zulässiger Montageplan auf Basis der vorliegenden Informationsbasis. Mit Hilfe des logistischen Bewertungs-Moduls kann der zulässige Montageplan hinsichtlich Termintreue, Durchlaufzeit, Auslastung und Bestand sowohl qualitativ als auch quantitativ auf Kostenbasis bewertet werden. Die Visualisierung im Benutzeroberflächen-Modul stellt letztlich den zulässigen Montageplan dar.

Die Benutzeroberfläche des entwickelten Softwaredemonstrators ist, neben der Planungsansicht in mehrere Abschnitte unterteilt, die teilweise mit den Softwaremodulen direkt korrelieren. So existieren folgende Abschnitte: Datensatz, Aufträge, Parameter, Planungssicht, Bewertungen, Informationen und Änderungen.

Der Demonstrator kann mehrere verschiedene Datensätze bearbeiten, die vom Benutzer in der ersten Oberfläche individuell eingestellt und verwendet werden können. Zu jedem Datensatz können mehrere Aufträge angelegt werden (siehe Bild 4-78). Diese werden mit Prioritätszuordnung, Start- und Liefertermin vom Benutzer eingetragen und die entsprechend notwendigen Auftragsdaten hochgeladen. Wie oben beschrieben sind dafür Daten wie „benötigtes Material“, „Montageschritte“ und „Vorgänger und Nachfolger Beziehungen“ notwendig.

☛ Datensatz **Aufträge** Parameter Planungssicht Bewertungen Informationen Datenexport Änderungen

Laufende Montagen neuer Auftrag

Kundenauftragsnummer	Produkt	Starttermin [KW]	Endtermin [KW]	
1	A	1	30	🗑️
2	B	3	31	🗑️

Bild 4-78: Auftragsanlegung im Softwaredemonstrator⁵

Zusätzlich zu den Aufträgen müssen Parameter für einen Datensatz eingegeben bzw. hochgeladen werden. Diese werden nach dem Hochladen für den Benutzer angezeigt und können im Demonstrator selber bei Bedarf angepasst und verändert werden. Die Parameter werden sowohl für die Planung als auch für die Umplanung des Montageplans verwendet. Wie in Bild 4-89 dargestellt umfassen sie Lieferzeitpunkte von Materialien, den Lagerkostensatz, den kalkulatorischen Zinssatz, Überstundenkosten und Terminabweichungskosten. Zusätzlich sind die aktuelle Woche und die Liefertermine der Aufträge einstellbar.

☛ Datensatz **Aufträge** Parameter Planungssicht Bewertungen Informationen Datenexport Änderungen

Parameter

Lieferzeitpunkt vor Einbau [KW]	Lagerhaltungskostensatz [%]	
<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="30"/>	
Aktuelle Woche [KW]	Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr [%]	
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="6"/>	
Liefertermin von A [KW]	Liefertermin von B [KW]	
<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="31"/>	
Überstundenkosten Montage [€]	Überstundenkosten Lackieren [€]	Überstundenkosten Elektromontage [€]
<input type="text" value="92.2"/>	<input type="text" value="65.2"/>	<input type="text" value="75.4"/>

Terminabweichungskosten

1. Stufe: Ein Zeitverzug von bis zu KW kann durch Maßnahmen im Versand/Lieferung kompensiert werden. Dafür fallen Kosten in Höhe von € an.

2. Stufe: Ein Zeitverzug von bis zu KW kann durch zusätzliche Maßnahmen in der Inbetriebnahme kompensiert werden. Dafür fallen zusätzliche Kosten in Höhe von € an.

3. Stufe: Ein Zeitverzug von ab KW kann durch keine zusätzlichen betriebsinternen Maßnahmen kompensiert werden. Pro weiterer Verzugswoche fallen daher Pönalen mit einem Pönale-Satz von % des Auftragsvolumens (€) an. Der Deckelungsbetrag beträgt €.

Resourcendaten hochladen

✓

Kapazitätsanteil Auftrag 1 [%]	Kapazitätsanteil Auftrag 2 [%]
<input type="text" value="30"/>	<input type="text" value="70"/>

Bild 4-89: Parameterfestlegung im Softwaredemonstrator⁶

Die Planungssicht aus Bild 4-9 ist das eigentliche Kernstück der Visualisierung. Bei dieser Oberfläche wird ein Montageschritt als Kästchen mit der entsprechenden Bezeichnung dargestellt. Weitere Informationen des Montageschrittes können durch „rechtsklick“ abfragt werden. Darstellung der Informationen erfolgt als Pop-Up Fenster. Der aktuelle Zustand des Montageprozess wird in der Planungssicht sowohl durch Einfärbung der Montageschritte gekennzeichnet als auch quantitativ dargestellt (Statusanzeige links unten). Eine grüne Einfärbung bedeutet, dass der entsprechende Montageschritt durchgeführt wurde. Eine lila-Einfärbung deutet auf einen gestörten Montageschritt hin. Der Zustand der Ressourcen, also die Auslastung, ist in der Planungssicht ebenfalls dargestellt (Statusanzeige Mitte unten), wobei unterschiedliche Ressourcentypen mit unterschiedlichen Farben dargestellt werden. Zum Beispiel ist der Ressourcentyp „Elektriker“

⁵ Vergrößerung im Anhang A2 zu finden.

⁶ Vergrößerung im Anhang A2 zu finden.

in der Kalenderwoche 4 vollkommen ausgelastet. Der Anwender kann im Störfall entweder eine manuelle Umplanung oder eine automatische Umplanung vornehmen, wobei kontinuierlich eine Durchführbarkeitsüberprüfung stattfindet. Hierbei kann er außerdem verschiedene Alternativen, welche mit Hilfe dem Algorithmus zur Identifizierung von alternativen Montageprozessen identifiziert werden, auswählen. Durch auswähle einer Alternative wird diese in der Planungssicht dargestellt. Die im Demonstrator eingesetzten Prioritätsregeln, welche dem Algorithmus zur Verfügung stehen, sind in Kapitel 4.1.1 aufgeführt.

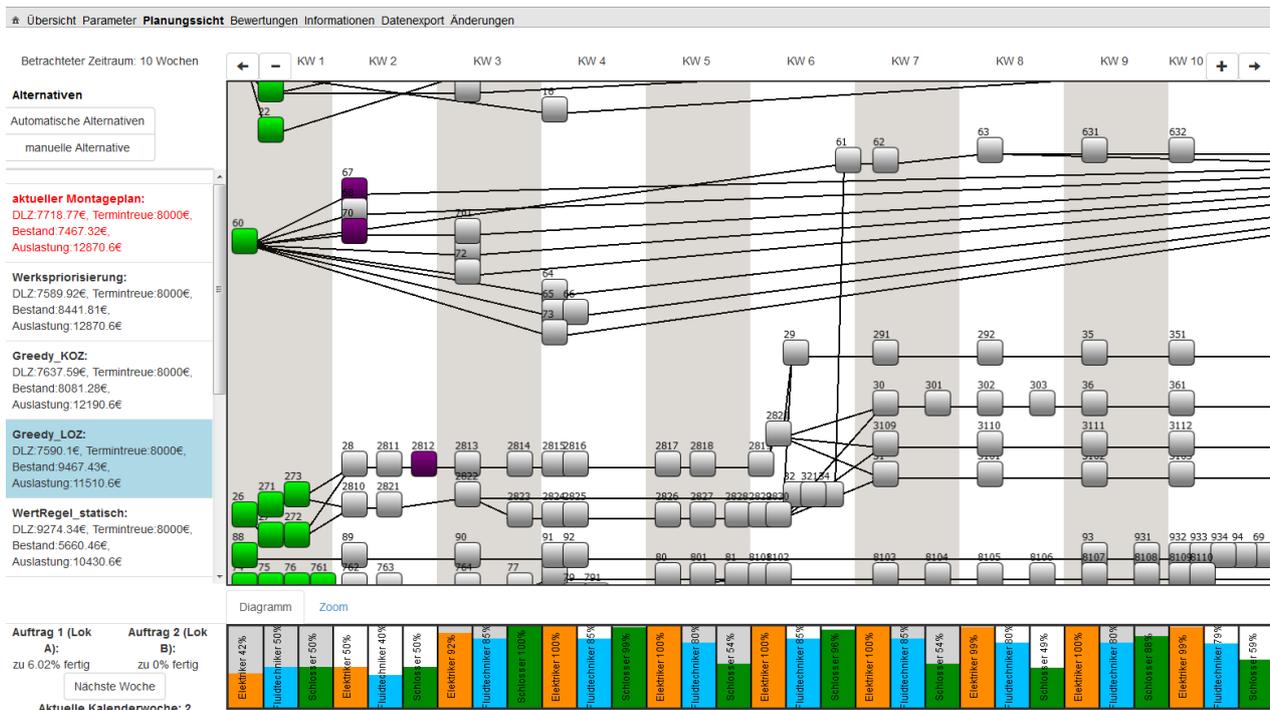


Bild 4-9: Planungssicht des Softwaredemonstrators⁷

Zur besseren Entscheidungsfindung stellt die Bewertungsoberfläche logistische Bewertungsgrößen für die verschiedenen Heuristik-Alternativen nach der automatischen Umplanung dar. Eine Informationsübersicht gibt außerdem Auskunft über die Unterschiede zwischen den Heuristiken und der Abschnitt Änderungen lässt den Benutzer veränderte Montageprozesse rückabwickeln.

Um eine Fehlerfreiheit zu gewährleisten laufen verschiedene Maßnahmen zur Eingabeüberprüfung ab. Die aktuellen „Online-Daten“ werden vor der Übergabe an die Montagesteuerung auf ihre Konsistenz hin geprüft. Dies geschieht bereits auf der Weboberfläche, indem bei allen Eingabefeldern das Eingegebene mit dem verglichen wird, was erwartet wird.

So gibt es beispielsweise Felder, in denen nur ganzzahlige Einträge akzeptiert werden, in anderen sind auch Dezimalzahlen erlaubt und wieder andere sind Freitextfelder. Sollte der Benutzer versuchen, eine fehlerhafte Eingabe an den Server, auf dem die Montagesteuerung läuft, zu übermitteln, wird er per Popup-Fenster darauf aufmerksam gemacht, was für ein Fehler vorliegt, sodass er die Eingabe korrigieren und die dann korrekten Daten abschicken kann. An anderen Stellen wird nur eine Auswahl aus vorgegebenen Optionen (die wiederum in den Offline-Daten hinterlegt sind) zugelassen. Hier werden

⁷ Vergrößerung im Anhang A2 zu finden.

Dropdown-Menüs oder sog. „Radio-Buttons“ verwendet, um mögliche Fehler in der Nutzereingabe auszuschließen.

Gibt der Nutzer eine Störung der Form „Montageschritt unvollendet“ ein, überprüft der Softwaredemonstrator automatisch, ob die als unvollständig markierten Montageschritte Nachfolgeschritte haben und markiert diese gegebenenfalls auch als unvollständig. So kann gewährleistet werden, dass die Validität des Montageprozesses erhalten bleibt, auch wenn der Nutzer einen Montageschritt übersehen hat. Durch diese Eingabeprüfungen wird u.a. die Möglichkeit zur automatischen Umplanungsfunktion des Demonstrators sichergestellt.

Der Handlungsleitfaden zur Bedienung des Softwaredemonstrators im nachfolgenden Kapitel führt insbesondere den Ablauf zur Anwendung des Softwaredemonstrators weiter aus und gibt ein Beispiel für die Umplanung bei Störungseintritt.

4.4.2 Handlungsleitfaden

Der Softwaredemonstrator ist für die Feinplanung von Montageprozessen gedacht. Vor allem bei KMUs existieren mangels ERP-Systemen nur wenig feinstrukturierte Montageplanungen, die sich zumeist auch nicht einfach im Störfall umplanen lassen. Das entwickelte Tool soll Montageplanern oder Meistern helfen übersichtlich und schnell ihre Montageprozesse darstellen und verändern zu können.

Der in Bild 4-10 dargestellte Prozessablauf gibt eine Übersicht über die für ein Unternehmen relevanten Schritte, die bei der Benutzung des Softwaredemonstrators durchgeführt werden müssen.

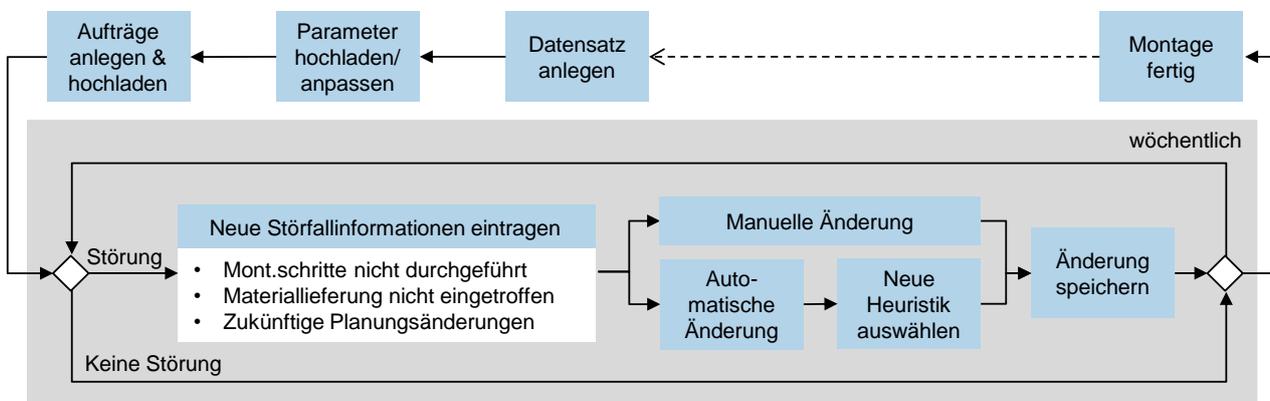


Bild 4-10: Prozessablauf für die Verwendung des Demonstrators

Als erster Schritt muss der Benutzer dafür einen Datensatz anlegen und benennen. Um Aufträge erstellen zu können, ist das Hochladen und ggf. Anpassen von Parametern zu diesem Datensatz notwendig. Hierfür werden folgende Daten in Form zweier Excel-Tabellen vom Benutzer benötigt:

- **Kapazitäten:** Alle verfügbaren Ressourcenkapazitäten der einzelnen Kalenderwochen
- **Ressourcenkosten:** Stundenlohn und Überstundenkosten für die unterschiedlichen Montagearbeiter (Maschinenkosten werden aufgrund von ihrer bei der Montage von KMUs vernachlässigbarer Größe nicht separat aufgenommen)

Anschließend kann der Benutzer ein oder mehrere Aufträge anlegen und die benötigten Datensätze hochladen. Wie beschrieben sind dafür eine Setzung von Start- und Liefer-

termin und eine Prioritätsverteilung notwendig. Außerdem müssen die nachfolgenden Excel-Datensätze bereitgestellt werden:

- Material: Eine vollständige Liste über alle im Montageprozess verwendeten Materialien inkl. einer Kostenbeifferung und einer Zuteilung zum jeweiligen Arbeitsgang
- Montageschritte: Die Auflistung aller Montageschritte inkl. deren Dauer, Ressourcenbelastung und einer Zuordnung zu einer Baugruppe,
- Vorgänger: Zu jedem Montageschritt alle vorhandenen Vorgänger

Nach erfolgreichem Anlegen der Aufträge kann in der Planungssicht der Gesamtmontageprozess und die pro Kalenderwoche belegten Kapazitäten betrachtet werden. Es können dann andere Planungsvarianten ausgewählt oder manuelle Umplanungen vorgenommen werden. Wenn eine erste Montageplanung zur Zufriedenheit des Benutzers besteht, kann die Montage gestartet werden.

Während der eigentlichen Montage findet eine Störungsüberprüfung zu Beginn jeder Kalenderwoche statt. Falls keine Störung auftritt bzw. in der vergangenen Woche auftrat, kann der Benutzer bei der Benutzeroberfläche Planungssicht die Kalenderwoche weiterstellen und sämtliche Prozessschritte der letzten Woche werden auf Grün geschaltet (für „abgeschlossen“).

Sollte eine Störung aufgetreten sein oder ist diese in Zukunft bereits absehbar (neuer Materialbereitstellungstermin, welcher zur Unzulässigkeit des aktuellen Montageplans führt), dann muss der Benutzer bei der Weiterschaltung der Woche neue Störfallinformationen in das Tool eintragen. Dabei wird zwischen nicht durchgeführten Montageschritten in der Vergangenheit, einer nicht eingetroffenen Materiallieferung, was eine Verzögerung in der Zukunft mit sich zieht, und zukünftigen Planungsänderungen unterschieden. Nach Eintragung werden in der Planungssicht alle verspäteten oder nicht durchführbaren Schritte inkl. aller Folgeschritte auf Rot gestellt und der Benutzer muss sich für eine manuelle oder automatische Änderung des Planes entscheiden. Bei Auswahl einer automatischen Umplanung berechnet das Tool nach allen vorhandenen Heuristiken neue Alternativen, welche dann in der Bewertungsansicht für den Benutzer verglichen werden. Nach Wahl einer Alternative wird der neue Montageplan gespeichert und ersetzt den Ursprünglichen. Dieser Zyklus wird wöchentlich wiederholt, bis die Montage von allen Aufträgen abgeschlossen ist. Daraufhin kann sich der Benutzer je nach seiner Auftragslage für einen erneuten Ablauf oder ggf. für Anpassungen entscheiden.

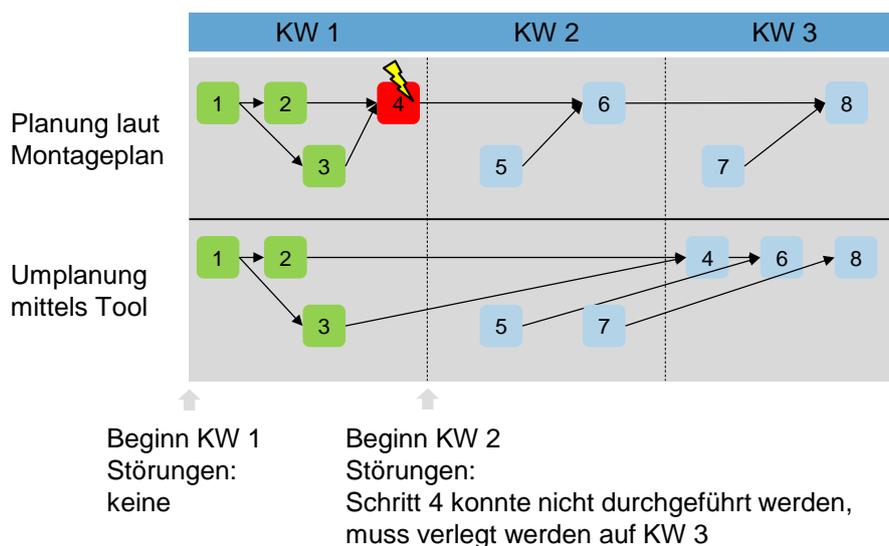


Bild 4-22: Umplanungsbeispiel bei Eintritt eines Störfalls

Zur Veranschaulichung der Umplanung ist in Bild 4-22 ein Beispiel für einen eintretenden Störfall und eine daraus resultierende Umplanung gegeben.

Der in KW 1 geplante Montageschritt 4 konnte aufgrund von Problemen nicht durchgeführt werden und muss sogar bis KW 3 aufgeschoben werden. Dies trägt der Benutzer Anfang KW 2 in das Tool als neue Störfallinformation ein. Daraufhin wird wie in der Abbildung gezeigt der entsprechende Montageschritt auf Rot gesetzt. Der Benutzer entscheidet sich dann für eine automatische Umplanung. Durch freie Kapazitäten in der KW 3 plant das Tool die Montageschritte entsprechend um und verschiebt Schritte zwischen den zukünftigen Kalenderwochen, um möglichst den Liefertermin am Ende der KW 3 einhalten zu können.

4.5 AP V: Anwendung und Verifizierung der Projektergebnisse bei zwei Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses (PA)

Der im Projekt erarbeitete Softwaredemonstrator wurde bei zwei Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses angewandt und auf seine Praxiseignung hin überprüft.

Erstes Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses

Dem Forschungsprojekt wurden seitens des Unternehmens Informationen zur Verfügung gestellt. Hierzu zählen die Arbeitspläne, bspw. Montagepläne, Stücklisten sowie Informationen zu Schichtmodellen, Personalkosten, Materialpreisen und allen weiteren montageprozessrelevanten Daten des Datenmodells (siehe Kapitel 4.3.2). Diese wurden in elektronischen Tabellen aufbereitet, angepasst und teilweise erweitert. Mit dieser Datenbasis konnten einige Testläufe des Softwaredemonstrators durchgeführt werden. Anhand der drei konkreten Störungsszenarien „Fehlendes Material“, „Unvollendeter Montageschritt“ und „Reduzierte Personalkapazität“ wurde der Softwaredemonstrator bei einem Arbeitstreffen im September 2015 mit Vertretern des Unternehmens angewandt. Die dabei aufgezeigten Ergebnisse trafen bei allen Teilnehmern auf positive Resonanz.

Im Rahmen des Treffens wurden Anpassungswünsche aufgenommen, um die Einsetzbarkeit des Demonstrators in der Praxis weiter zu erhöhen. Diese Wünsche wurden in den Kategorien „Ergonomie/ Bedienung“, „Datenaufbereitung/ Datenstruktur“ und „Allgemeine Anforderungen“ erfasst. Zu den wesentlichen Änderungen gehörten die Möglich-

keiten, Umplanung rückgängig zu machen, die Vorrangfolgebeziehungen eines Produkts im Demonstrator anzupassen, die Ressourcenbedarfe eines Montageschritts direkt kenntlich zu machen und die Kapazitäten frei zwischen mehreren Produkten, die sich in der Montage befinden, aufzuteilen und Planungsstände mit einem Zeitpunkt zu kennzeichnen.

Alle diese Wünsche sowie einige weitere Punkte konnten im Nachgang des Arbeitstreffens in den Softwaredemonstrator integriert werden. Bei ein paar Punkten wurde sich dazu entscheiden, eine Umsetzung zurückzustellen, da der Aufwand der Umsetzung die Möglichkeiten im Rahmen des Projekts übersteigen würde (z. B. eine Schnittstelle zu ERP-Systemen) oder bewusst eine Bearbeitung im Rahmen eines Nachfolgeprojekts angestrebt wird (z. B. Aufbau einer Wissensdatenbank). Eine Zusammenfassung über alle Änderungswünsche ist Bild 4-3 zu entnehmen.

Ergonomie/ Bedienung

- | | | |
|-----------|---|--|
| Umsetzung | + | – „Zurück/ Rückgängig“ – Funktion einbauen |
| | + | – Zusatzkosten/Überstunden berücksichtigen |
| | + | – Anpassung von Vorrangbeziehungen im Demonstrator ermöglichen (graphisch), Anpassung Stammdaten |
| | - | – Splitting der Prozessschritte auflösen (Anpassung Stammdaten beim Einplanen) |
| | - | – Erweiterung auf mehr als zwei Produkte |
| | + | – Beim Splitting: Angabe, um welchen Schritt in der Sequenz es sich handelt (1/7, 2/7, ...) |
| | + | – Ressourcenbedarf in Stunden je Schritt angeben |
| | - | – Gantt-Diagramm-Darstellung einfügen |
| | - | – Alle Materialien auflisten, den einzelnen Montageschritten zuordnen |
| | + | – Logistische Zielgrößen in ursprünglichen Dimensionen angeben |
| | + | – Vollständige Montageschritte > 1 Woche als fertig zurückmelden |
| | + | – Spindler und Bauer als „Fluidtechniker“ zusammenlegen |
| | + | – „Druckfunktion“ integrieren |
| | + | – Kapazitätsverhältnis Produkt A/B für Priorisierung nutzen |

Legende: + Umsetzung erfolgt - Zurückgestellt

Datenaufbereitung/Datenstruktur

- | | | |
|-----------|---|---|
| Umsetzung | - | – Schnittstelle zu ERP-System prüfen |
| | - | – Lerneffekte (BDE-Daten) integrieren |
| | - | – Informations-/ Wissensdatenbank aufbauen (Anknüpfungspunkt Folgeprojekt) |
| | + | – Zeiten/ Vorrangbeziehungen aktualisierbar gestalten (Liefertermin auch nach vorne verschieben können) |
| | + | – Planungsstände mit Zeitstempel abspeichern |

Allgemein Anforderungen

- | | | |
|-----------|---|--|
| Umsetzung | + | – Flexibilität im Einsatz (Kapa, Termin, Personal) aufrecht erhalten |
|-----------|---|--|

Legende: + Umsetzung erfolgt - Zurückgestellt

Bild 4-23: Anpassungswünsche aus dem Validierungstreffen im September 2015

Zweites Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses

Für eine weitere praxisnahe Anwendung des Softwaredemonstrators stellte das zweite Unternehmen dem Forschungsprojekt Datensätze eines anderen Montageobjektes zur Verfügung. Hierbei wurden ebenfalls, wie im Falle der ersten Anwendung, alle Daten zu allen Elementen des Datenmodells bereitgestellt. Auch diese Daten wurden aufbereitet, angepasst, teilweise ergänzt und beim Abschlusstreffen im Dezember 2015 Vertretern des

projektbegleitenden Ausschusses vorgestellt. Bei dieser Vorstellung kam eine mit den Anpassungswünschen des Arbeitstreffens im September 2015 aktualisierte Version des Softwaredemonstrators zum Einsatz. Die Rückmeldung des Projektbegleitenden Ausschusses war durchweg positiv. Es wurde positiv angemerkt, dass in kurzer Zeit die überwiegende Zahl der Änderungswünsche umgesetzt werden konnte.

Im Abschlusstermin wurden ebenfalls zusammen mit dem PA ausgewertet, wie sich Umplanungsvorgänge in der Praxis ohne und mit Einsatz des Softwaredemonstrators gestalten. Übereinstimmend konnte herausgestellt werden, dass die Transparenz, Übersichtlichkeit, und Reaktionsgeschwindigkeit durch den Einsatz des Demonstrators erhöht wird und eine personenunabhängige, nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage entsteht, jedoch unter Erhöhung des Planungs- bzw. Datenaufbereitungsaufwands (siehe Bild 4-24).

	Fehlteile	Montageschritt unvollständig	Mitarbeiterausfall/Krankheit
ohne Softwaredemonstrator	<ul style="list-style-type: none"> „Kannibalisierung ohne Bereinigung“ Anpassung Liefertermine Für geplante Fehlteile: Maßnahmensuche (Lieferanten tracken) & erfahrungsbasierte Umplanung (Personalwissen geführt) Für ungeplante Fehlteile (z.B. Qualität): Kapazitätsanpassung (z.B. Samstagsschicht, Sondermaßnahmen (z.B. Montage beim Kunden), evtl. Mikromanagement (negativ), mangelnde Transparenz Wird mit jedem Auftrag besser 	<ul style="list-style-type: none"> Umplanung Betriebsrunde mit Meister Auf Basis Personenwissen und Projektplan Individuelle Lösung für Problem finden (kritisch, falls nicht lokal zu lösen) Kapazitätsanpassung, falls „nur“ nicht fertig geworden Info an Kunden/ Terminverlegung 	<ul style="list-style-type: none"> Personal umplanen, anders einsetzen Personal-DL (je nach Verfügbarkeit, Qualifikation) Ab ca. 2 KW Umlanen zwischen Projekten Kapa-Anpassung (z.B. Samstagsschicht) Großes Potential: von ca. 35 Wochenstd. auf 60 Wochenstd.
Mit Softwaredemonstrator	<ul style="list-style-type: none"> Transparenz Übersichtlichkeit Folgen erkennen als Entscheidungsgrundlage/ Entscheidungshilfe Personenunabhängig Höhere Reaktionsgeschwindigkeit ABER: Planungs-/Datenaufbereitungsaufwand 		

Bild 4-24: Vergleich der Montagesteuerung mit und ohne Demonstrator

4.6 AP VI: Dokumentation und Veröffentlichung

Die Projektergebnisse sollten im Arbeitspaket VI detailliert dokumentiert und im Verlauf des Projektes in nationalen und internationalen Interessentenkreisen vorgestellt werden.

Diese beiden Punkte wurden unter anderem durch breiten- und medienwirksame Veröffentlichungen in regelmäßigen Abständen in Fachzeitschriften sichergestellt (vgl. Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3). Darüber hinaus wurde das Projektvorhaben und erste Teilergebnisse auf internationalen Tagungen vorgestellt. Des Weiteren konnten Fortschritte des Projekts sowie Ankündigungen von Veranstaltungen im Umfeld des Projekts auf einer Internet-Homepage verfolgt werden.

Da sowohl das IPH als auch das WZL in der Ausbildung von Maschinenbau- und Wirtschaftsingenieurstudenten tätig sind, wurden bereits einige Schritte eingeleitet, um die Erkenntnisse dieses Projekts zeitnah in die Lehre (Vorlesungs- und Übungsveranstaltungen) der RWTH Aachen University und der Leibnitz Universität Hannover zu integrieren. Neben der Integration in die Lehre wurden Bachelor- und Masterarbeiten im Rahmen des Forschungsprojekts angeboten (vgl. Tabelle 7.2)

5 Innovativer Beitrag und wirtschaftlicher Nutzen

5.1 Voraussichtliche Nutzung der Forschungsergebnisse in KMU

Der Nutzen des durchgeführten Forschungsprojekts für KMU wird laut dem PA als sehr hoch eingeschätzt. Der Fokus des durchgeführten Projekts lag auf der kurzfristigen Auswahl von alternativen Montageprozessen zur Reaktion auf Störungen. Durch den Einsatz der entwickelten Methode als webbasierter Softwaredemonstrator in Verbindung mit dem erstellten Handlungsleitfaden ergibt sich folgender Nutzen für KMU:

- Kurzfristige und aufwandsarme Identifikation von Prozessalternativen
- Minimierung von Montagestillständen
- Verbesserte Einhaltung von Lieferterminen
- Höhere Transparenz in der Montage bspw. hinsichtlich der logistischen und monetären Auswirkung von Prozessalternativen
- Wissens- und Erfahrungsaufbau

Mit dem Softwaredemonstrator können KMU für komplexe Produkte kurzfristige Prozessalternativen in der Montage identifizieren. Die Methode verzichtet auf komplexe Lösungsverfahren und ermöglicht durch die Nutzung von Standardsoftware eine aufwandsarme Anwendung. Vor diesem Hintergrund entfallen hohe monetäre Aufwände für die Nutzbarmachung der Forschungsergebnisse für KMU.

Die entwickelte Methode vereint alle zur Klärung der Durchführbarkeit einer Prozessalternative benötigten Daten in einer Datenbank. So entfallen langwierige Klärungsprozesse über die Durchführbarkeit einer Prozessalternative in verschiedenen Systemen zu Material-, Personal- und Betriebsmittelverfügbarkeit. Auf diese Weise können Montagestillstände nach dem Auftreten einer Störung verkürzt werden. Als Folge verbleibt dem Mitarbeiter mehr Zeit für die wertschöpfenden Montagetätigkeiten.

Gerade die Situation von KMU zeichnet sich oftmals durch eine fehlende Marktmacht aus. Von ihren Kunden diktierte Liefertermine sind für KMU daher meist nicht verhandelbar. Durch die innerhalb der Methode erfolgte Bewertung der Prozessalternativen anhand der logistischen Zielgrößen kann ein positiver Einfluss auf die Termintreue ausgeübt werden. In dem gezielt solche Alternativen ausgewählt werden, die die Einhaltung der Lieferfristen und somit der Termintreue begünstigen, können KMU ihre Kundenbindungen verstärken und Kosten der Lieferterminüberschreitung (z. B. durch Vertragsstrafen) reduzieren.

Durch die Anwendung der innerhalb der Methode integrierten Vorgehensweise zur Identifikation von technologisch möglichen Prozessalternativen und dem Verfahren zur Aufnahme und Darstellung dieser Alternativen in Form eines Montagevorrangfolgegraphen können KMU mit komplexen Produktstrukturen die Transparenz in der Montage erhöhen. Die gewonnene Transparenz bietet ebenfalls für die reguläre Arbeitsplanung außerhalb der Betrachtung von Störungen in der Montage Potentiale, die Durchlaufzeiten zu verringern und die Termintreue zu erhöhen.

Die Anwendung der Methode sowie eine begleitende Dokumentation ermöglichen einen Wissens- und Erfahrungsaufbau bezüglich des Umgangs mit auftretenden Störungen in der Montage. Durch das entstehende implizite Mitarbeiterwissen kann die Entschei-

dungsfindung für eine Prozessalternative in Verbindung mit dem Softwaredemonstrator weiter verbessert werden.

5.2 Möglicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU

Die Forschungsergebnisse unterstützen Einzel- und Kleinserienhersteller von XXL-Produkten. Insbesondere KMU haben im Vergleich zu Großunternehmen aufgrund ihrer geringen Größe und der damit einhergehenden geringen Marktmacht häufig eine schlechtere Ausgangsposition gegenüber ihren Zulieferern. Die Folge ist, dass KMUs häufig „als letztes“ beliefert werden. Die Konsequenzen sind Terminverzögerungen und eine geringe Materialverfügbarkeit. Die Forschungsergebnisse ermöglichen eine systematische Ausnutzung der Flexibilität im Montageprozess, um Montagestillstände auch bei einer geringeren Materialverfügbarkeit zu verhindern.

Um Vertragsstrafen bei Lieferverzögerungen zu verhindern und das Kundenvertrauen zu sichern, nehmen die KMUs häufig hohe Sicherheitsbestände in Kauf. Das Ausmaß der Bestände von Einzel- und Kleinserienherstellern, halb Projektfertiger halb Serienhersteller, führt zu den höchsten Beständen (20 % vom Umsatz) innerhalb der Branche. Im Vergleich weisen die Serienhersteller von Komponenten mit 11,9% das niedrigste Bestandsniveau auf [SHU09]. Der VDMA-Kennzahlenkompass bestätigt, dass das Verhältnis von Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen, unfertigen Erzeugnissen sowie fertigen Erzeugnissen und Waren ohne geleistete Anzahlungen zum Umsatzerlös 23,3 % für den gesamten Maschinenbau betragen [VDMA07]. Um die eigene Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, ist es daher unabdingbar, die Bestände in der Produktion zu senken und so die Kapitalbindungskosten zu reduzieren. Die Besonderheit von XXL-Produkten ist die Dimension ihrer Abmessungen. Ihre Montage erfordert daher einen hohen Platzbedarf, so dass die Fläche bei KMU zudem als Engpass gesehen werden muss. Gleichzeitig zeigt eine Erhebung des WZL bei 17 Projektpartnern im Maschinen- und Anlagenbau, dass in der manuellen Baustellenmontage unter 19% der Zeit der Montagemitarbeiter auf direkte Montagetätigkeiten entfallen. Ein wesentlicher Zeitanteil von bis zu 50% ist durch Tätigkeiten zur Informations-, Material- und Betriebsmittelbeschaffung, durch Klärungsprozesse sowie durch organisatorisch bedingte Wartezeiten belegt. Die Forschungsergebnisse dienen der Verbesserung der logistischen Leistungsfähigkeit mit dem Ziel einer optimalen Material- und Informationswirtschaft und führen somit zu einer Steigerung der Produktivität in der Produktion von XXL-Produkten. Weiterhin ermöglicht die höhere logistische Leistungsfähigkeit eine Verkürzung der Durchlaufzeiten sowie verbesserte Termintransparenz und somit implizit auch eine mögliche Reduzierung der Sicherheitsbestände.

6 Verwendung der Zuwendung

Das Projekt wurde am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH und am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen vom 01.03.2014 bis zum 31.12.2015 von insgesamt drei wissenschaftlichen Mitarbeitern (TV-L E13) mit fundierten Kenntnissen im Bereich der Produktionslogistik bearbeitet, wobei der Mitarbeiter des IPH in Vollzeit und die beiden Mitarbeiter des WZL in Teilzeit an dem Projekt beteiligt waren. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter sind während der Projektlaufzeit durch studentische Hilfskräfte unterstützt worden, die u.a. bei der Erstellung und Durchführung von Unternehmens- und Expertenbefragungen sowie Literaturrecherchen zu Ansätzen des Störungsmanagements sowie bei der Erstellung von potenziellen Gestaltungsansätzen mitgewirkt haben. Bei der Programmierung des Software-Demonstrators und der Implementierung der Bewertungsmethode sind die wissenschaftlichen Mitarbeiter von einem weiteren Wissenschaftlichen Mitarbeiter des IPH mit Programmierkenntnissen und einem mathematisch-technischen Assistenten des WZL mit abgeschlossener Fachhochschulausbildung unterstützt worden.

7 Umsetzung der Forschungsergebnisse / Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft

Erste Schritte zum Ergebnistransfer sind während der Projektlaufzeit durchgeführt worden. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Über den Austausch zwischen Forschungsstelle und den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein erster Wissenstransfer stattgefunden. Dieser ist die Basis für die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse. Die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses sind in der untenstehenden Tabelle 7-1 aufgeführt:

Tabelle 7-1: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses

Unternehmen	KMU	Ansprechpartner
Schalke Eisenhütte Maschinenfabrik		Herr Mock, Herr Riemann
ZPF GmbH	x	Herr Prof. Semrau
MHWirth GmbH		Herr Escher, Herr Rubio
Sauke Semrau GmbH	x	Herr Sauke
Frerk Aggregatebau GmbH	x	Herr Bormann

Die während des Berichtszeitraums durchgeführten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft sind der Tabelle 7-2 zu entnehmen. Die nach dem Berichtszeitraum geplanten Maßnahmen zum Ergebnistransfer sind in Tabelle 7-1 aufgeführt.

Tabelle 7-2: Während dem Berichtszeitraum durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Im Berichtszeitraum umgesetzte Transfermaßnahmen			
A Projektbegleitender Ausschuss	Fortlaufende Beratung über die geplanten und erzielten Projektergebnisse zur Gewährleistung der Praxisrelevanz	Vorstellung des Projekts, der geplanten Ergebnisse und Diskussion der geplanten Arbeiten	05/2014
		Austausch über den Projektzwischenstand	02/2015
		Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Projektabschluss	12/2015
B Information der interessierten Fachöffentlichkeit, insbesondere KMU	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Aufbau und Pflege einer projektbegleitenden Homepage (http://www.xxl-montage.de/)	04/2014
		Herausgabe einer Pressemitteilung: XXLMontage: Flexibel auf Störungen reagieren: Hersteller von großskaligen Produkten für Forschungsprojekt gesucht. Verfügbar unter: http://www.xxl-montage.de/sites/default/files/press/2014/IPH_Pressemittteilung_2014-04-15_XXL-Montage.pdf	04/2014
		Veröffentlichung: Reuter, C.; Burggräf P.;	06/2014

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Im Berichtszeitraum umgesetzte Transfermaßnahmen			
		Böning, C.; Schmitz, T.; Wagner, J.; Prinzhorn, H.: Adaptive Montage von XXL-Produkten. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 109. Jg. (2014) H. 10, S.718-721.	
		Veröffentlichung: Rochow, P.; Burggräf, P.; Reuter, C.; Prinzhorn, H.; Wagner, J.; Schmitz, T.: Identification of alternative assembly sequences for large-scale products. In: Narayanan, S.; Bhageria, R. (Hrsg.): Production and Operations Management Society - POMS 26th Annual Conference, 8.-11. Mai 2015, Washington D.C. Michigan State University, East Lansing 2015.	05/2015
		Eingereichte Veröffentlichung: Prinzhorn, H.; Nyhuis, P.; Wagner, J.; Burggräf, P.; Schmitz, T.; Reuter, C.: Optimization model for the identification of assembly alternatives of large-scale, make-to-order products. In: ICAMNA 18th international Conference on Applied Mathematics and Numerical Analysis, 25.-26. April 2016, Boston Massachusetts	02/2016
		Eingereichte Veröffentlichung: Burggräf, P.; Reuter, C.; Böning, C.; Wagner, J.; Schmitz, T.; Prinzhorn, H.; Ebertz, J.: Monetäre Bewertung von Montageplänen - Bewertung von Montageplanalternativen anhand der logistischen Zielgrößen im Störfall. In: wt Werkstatttechnik online, Springer VDI Verlag, Jg. 106 (2016) H. 4	04/2016
		Download des Software-Demonstrators und Handlungsleitfadens auf der projektbegleitenden Internet-Homepage (http://www.xml-montage.de/)	ab April 2016
C Weiterbildung während der Projektlaufzeit	Ergebnistransfer in die akademische Ausbildung	Bachelorarbeit Goos: Erzeugung und Bewertung von Mehrproduktsequenzen in der Montage	04/2015 – 06/2015
		Bachelorarbeit Ebertz, J.: Entwicklung einer Methodik zur monetären Bewertung von Montageplänen anhand der logistischen Zielgrößen.	04/2015 – 08/2015
		Bachelorarbeit Vosen, K.: Entwicklung einer Methodik zur Priorisierung alternativer Montagesequenzen für XXL-Produkte	09/2015 – 12/2015

Tabelle 7-1: Nach dem Berichtszeitraum geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Nach dem Berichtszeitraum geplante Transfermaßnahmen			
D Weiterbildung nach der Pro- jektlaufzeit	Qualifizierung von Mitarbei- tern in KMU	Aufnahme der Projektinhalte in das Seminar- programm des IPH und des WZL	ab Januar 2016
	Akademische Ausbildung	Übernahme der Projektergebnisse in die Leh- re der Leibniz Universität Hannover und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hoch- schule Aachen, Betreuung an die Projekter- gebnisse anknüpfender Projekt-, Bachelor-, Masterarbeiten und Praktika	ab Januar 2016
E Weiterentwick- lung der For- schungs- ergebnisse	Nutzung der erzielten Pro- jekt- ergebnisse für weitere For- schungs- vorhaben	Nutzung der erzielten Projektergebnisse für weitere Forschungsvorhaben „Erfahrungsba- sisiertes Störungsmanagement in der Einzel- und Kleinserienmontage im Maschinen- und Anlagenbau“ (ERFASST)	ab Januar 2016
	Nutzung der erzielten Er- gebnisse für die Anfertigung einer Disserta- tion	Identifikation und Systematisierung weiterer Ansätze zur Optimierung einer Montage von XXL-Produkten	ab Januar 2016
F Information der interes- sierten Fach- öffentlichkeit, insbesondere KMU	Ergebnis- transfer in die Wirtschaft	Veröffentlichung zur Gütebewertung des ent- wickelten Ansatzes	Anfang 2016

8 Durchführende Forschungsstelle

1. und 2. Forschungsstelle

Das Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, hier vertreten durch den Lehrstuhl für Produktionssystematik und den Lehrstuhl für Produktionsmanagement, führt zahlreiche nationale und internationale Forschungsprojekte durch. Professor Schuh ist Inhaber des Lehrstuhls für Produktionssystematik der RWTH Aachen und zugleich Mitglied des Direktoriums des Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der RWTH Aachen.

Um die vielfältigen Aufgaben im Bereich der Produktionssystematik und die neuen Forschungsgebiete im Bereich der Elektromobilproduktion besser koordinieren zu können, ist im Jahr 2009 der Lehrstuhl für Produktionsmanagement gegründet worden. Dieser wird seit der Gründung von Professor Kampker geleitet. Es besteht nach wie vor eine starke Kooperation beider Lehrstühle. Dadurch ist auch die erfolgreiche Bearbeitung des Forschungsprojektes sichergestellt. Der Lehrstuhl für Produktionssystematik fokussiert die Produktionslogistik und die Schnittstellen zu anderen Unternehmensbereichen und -funktionen. Auch die Gestaltung des Softwaredemonstrators liegt im Bereich des Lehrstuhls für Produktionssystematik. Der Forschungsschwerpunkt des Lehrstuhls für Produktionsmanagement liegt bei der Gestaltung von Montagesystemen. Es gibt bereits seit 2009 am WZL die Gruppe Montageorganisation, die sich intensiv mit der Steuerung von Standplatzmontagen beschäftigt.

3. Forschungsstelle

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung, die eng mit der Universität Hannover kooperiert. Die Gesellschafter des IPH, Prof. Behrens, Prof. Overmeyer und Prof. Nyhuis sind gleichermaßen Inhaber produktionstechnischer Lehrstühle an der Leibniz Universität Hannover. Während die universitären Mutterinstitute des IPH den Bereich der Grundlagenforschung abdecken, widmet sich das IPH hauptsächlich der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung. Das IPH wurde 1988 mit Unterstützung des niedersächsischen Wirtschaftsministeriums gegründet und ist besonders der technologischen Förderung mittelständischer Industriebetriebe verpflichtet. Der Technologietransfer von der Universität in die Industrie erfolgt dabei hauptsächlich über gemeinsam mit der Industrie durchgeführte, öffentlich geförderte Verbundforschungsprojekte sowie über Fortbildungsseminare und Arbeitskreise für spezielle Zielgruppen aus Industrie und Handel. Darüber hinaus stellt das IPH laufend in einer Vielzahl ausschließlich industriefinanzierter Projekte seine Praxisorientierung und Wettbewerbsfähigkeit unter Beweis.

Anschriften

- 1. Forschungsstelle** Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
Lehrstuhl für Produktionssystematik
Anschrift Steinbachstraße 19, 52074 Aachen
Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh
Projektleiter Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Torben Schmitz
- 2. Forschungsstelle** Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
Lehrstuhl für Produktionsmanagement
Anschrift Steinbachstraße 19, 52074 Aachen
Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker
Projektleiter Johannes Wagner, M.Sc. M.Sc.
- 3. Forschungsstelle** IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
Anschrift Hollerithallee 6, 30419 Hannover
Institutsleiter Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens
 Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis
 Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer
 Dr.-Ing. Georg Ullmann
Projektleiter Henrik Prinzhorn, M.Sc.

9 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben (17707 N) der Forschungsvereinigung BVL e.V. wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

10 Literaturverzeichnis

- [BEH09a] Behrens, B.-A.; Overmeyer, L.; Nyhuis, P.; Nickel, R.: XXL-Produkte – ein Trend in der Produktionstechnik. In: VDI-Z Integrierte Produktion, Springer VDI Verlag, 151. Jg. (2009), H.7/8, S. 56-58.
- [BEH09b] Behrens, B.-A., Nyhuis, P., Overmeyer, L. 2009. Produktionstechnik XXL. Phi - Produktionstechnik Hannover informiert. 2009, Bd. 10. Jg., 1, S. 10-11.
- [BGB13] BGB: Bürgerliches Gesetzbuch. München: Deutscher Taschenbuch Verlag 2013.
- [BLO08] Bloech, J.: Einführung in die Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2008.
- [BMW11] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BWi): Maritime Technologien der nächsten Generation
http://www.ptj.de/lw_resource/datapool/_items/item_2309/programm-schifffahrt_barrierefrei.pdf, 4.7.2011.
- [BON99] Bongaerts, L., Van Brussel, H., Valckenaers, P.: Interaction Mechanisms in Holonic Manufacturing Systems. Proc. 32nd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 1999, S. 571-588.
- [BUC05] Buchholz, T.: Mobile Datenerfassung: Handhelds für Profis. In: Logistik inside, Februar 2005, S. 54.
- [BULL94] Bullinger, H.-J.; Lung, M.: Planung der Materialbereitstellung in der Montage. Teubner-Verlag, Stuttgart 1994.
- [DEM90] De Mello, L. S. H.; Sanderson, A. C.: And/Or Graph Representation of Assembly Plans. In: Transactions on Robotics and Automation, vol. 6 (1990), no. 2, pp. 188-199.
- [DOB88] Dombrowski, U.: Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung. Düsseldorf: VDI-Verl, 1988.
- [DOM08] Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research. 7. Aufl., Springer-Verlag, Berlin und Heidelberg 2008.
- [END03] Enderlein, H.; Hildebrand, T.; Müller, E.: PLUG+PRODUCE. Die Fabrik mit Zukunft aus dem Baukasten. In: wt Werkstattstechnik online * Band 93 (2003) Heft 4, Seite 282-286
- [ESS96] Esser, H.: Integration von Produktionslogistik und Montageplanung und –steuerung; Shaker Verlag, Aachen, 1996.
- [ESS96] Esser, H.: Integration von Produktionslogistik. Diss. RWTH Aachen, 1996, S. 48ff.
- [FUJ04] Fujii K., Suda T., « Component Service Model with Semantics (CoSMoS) : A New Component Model for Dynamic Service Composition », Actes des International Symposium on Applications and the Internet Workshops (SAINTW'04), Tokyo, Japan, 2004, S. 348ff.
- [GOU10] Goudarzi, M.: Im Prinzip leicht. In: Sonne Wind & Wärme, Bielefelder Verlag, o. Jg. (2010), H. 13, S. 52.
- [GOU11] Goudarzi, M.: Hochhinaus: Leichtbaukonzepte für Windenergieanlagen. In: phi - Produktionstechnik Hannover informiert, PZH-Verlag, 12. Jg. (2011), H. 1, S. 12.

- [GUT79] Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Springer-Verlag, Berlin u.a., 1979.
- [HAC97] Hack, T. K. P.: Simulationsgestützte Belegungsplanung in der Montage unter Berücksichtigung der Unschärfe. Diss. RWTH Aachen, 1997, S. 5ff.
- [HEN11] Henlich, T.; Weigert, G.; Klemmt, A.: Modellierung und Optimierung von Montageprozessen. In: März, L. et al. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Springer-Verlag, Berlin und Heidelberg, 2011.
- [HIL02] Hildebrand, T.: Erfolgsfaktor Modularität - Ein Konzept für die Fabrik von morgen. In: Tagungsband „Kompetenznetze der Produktion und mobile Fabriken“ (TBI'02), 8.-9.10.2002, Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF, Sonderheft 5, ISSN 0947-2495, TU Chemnitz.
- [Innovationsreport06] O.V. "Logistics on Demand" - Basis für die sich selbst kontrollierende und reparierende Intralogistik. In: Innovations report. Online-Ausgabe vom 17.7.2006 URL: http://www.innovations-report.de/html/berichte/verkehr_logistik/bericht-67751.html (Stand: August 2006)
- [IHL13] Ihlau, S.; Duscha, H.; Gödecke, S.: Besonderheiten bei der Bewertung von KMU. Plausibilisierung, Steuern, Kapitalisierung. Springer Gabler, Düsseldorf, 2013.
- [INT00] Intra, C.: Effiziente Produktionsplanung durch eine vereinfachte Ablaufsimulation; Dissertation; RWTH Aachen, 2000.
- [JAS14] Jasinski, T.: Dezentraler Koordinationsmechanismus in Wertschöpfungsnetzwerken des Maschinen- und Anlagenbaus basierend auf dem Wert von Termintreue. Aachen: Apprimus Verlag 2014.
- [KLI11] Klindworth, H.; Otto, C.; Scholl, A.: On a learning precedence graph concept for the automotive industry. In: European Journal of Operational Research, vol. 217 (2012), no.2, pp. 259-269.
- [KÖL81] Kölle, J. H.: Entwicklung von Verfahren zur Terminplanung und -steuerung bei flexiblen Montagesystemen. Diss. Universität Stuttgart, 1981, S. 19-81.
- [KOL96] Kolisch, R.: Efficient priority rules for the resource-constrained project scheduling problem, in: Journal of Operations Management, 14. Jg. 1996, Nr. 3, S. 179-192.
- [KOL99] Kolisch, R., Hartmann, S.: Heuristic Algorithms for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analysis, in: Węglarz, J. (Hrsg.): Project Scheduling. Recent Models, Algorithms and Applications, (Reihe: International Series in Operations Research & Management Science, Bd. 14), Boston, MA, Springer US, 1999, S. 147-178.
- [KON89] Konz, H.-J.: Steuerung der Standplatzmontage komplexer Montage. Diss. RWTH Aachen, 1989, S. 8.
- [KÖS02] Kösel-Merkl, J.; Hildebrand, T.: Wandlungsfähige Fabriken auf der Basis integrierter Modulkonzepte. In: Tagungsband „Karlsruher Arbeitsgespräche 2002 – Forschung für die Produktion von morgen“, 14.-15.03.2002, PFT-Berichte, FZKA-PFT 210, ISSN 0948-1427, FZ Karlsruhe.
- [KUH05] Kuhn, A.; Wiesinger, G.: Sonderforschungsbereich 559 "Modellierung großer Netze in der Logistik. in: Wolf-Kluthausen, H. (Hrsg.): Jahrbuch der Logistik 2005. free beratung GmbH, Korschenbroich, 2005 S. 276-281
- [KUY13] Kuyumcu, A.; Lödding, H.; Nyhuis, P.: Modellierung der Termintreue in der

- Produktion. 1. Aufl., Hamburg: Techn. Univ. Hamburg-Harburg Inst. für Produktionsmanagement und -technik, 2013.
- [LAM06] Lambert, A. J. D.: Generation of assembly graphs by systematic analysis of assembly structures. In: European Journal of Operational Research, vol. 168 (2006), no. 3, pp. 932-951.
- [LEH92] Lehmann, F.: Störungsmanagement in der Einzel- und Kleinserienmontage. Diss. RWTH Aachen, 1992, S. 17-36.
- [LÖD08] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Springer Verlag, Berlin u.a., 2008.
- [LOTT06] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion, Springer Verlag, Berlin u. a., 2006.
- [MÄR06] Märtens, A. et al.: Dezentrale agentenbasierte Produktionssteuerung – Agentenconditionierung für logistikgerechte Verhandlungen. In: wt Werkstattstechnik online, 96. Jg. (2006), H. 5, S. 331-338.
- [MAR96] Markus, A., Vancza, T.K., Monostori, L.: A Market Approach to Holonic Manufacturing. Annals of the CIRP 45/1, 1996, pp. 433-436.
- [MEE10] Meers, S.; Gärtner, H.; Nyhuis, P.: Logistische Herausforderungen in Produktionsnetzen. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag München, 105. Jg. (2010), H. 11, S. 949-952.
- [MÜL13] Müller, D.: Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure. 2. Aufl., Springer Gabler, Berlin, 2013.
- [NIU03] Niu, X.; Ding, H.; Xiong, Y.: A hierarchical approach to generating precedence graphs for assembly planning. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 43 (2003), no. 14, pp. 1473-1486.
- [PET05] Petersen, T.: Organisationsformen der Montage. Theoretische Grundlagen, Organisationsprinzipien und Gestaltungsansatz. 1. Aufl. Aachen: Shaker, 2005.
- [POT11] Potthast J., Baumgarten, S.: Lean-Production-Methods for XXL-Products. Logistics Journal: Not reviewed publication, Vol. 2011.
- [REI10] Reisig, W.: Petrinetze. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.
- [RIT03] Ritter, A.: Ein Multi-Agenten-System für mobile Einrichtungen in Produktionssystemen; Dissertation, IPA Stuttgart, 2003
- [SCH10] Schenk, M.; Haasis, D.: Verbesserung der Planungsgrundlagen für kampagnegeprägte Supply Chains (SC) am Beispiel von Offshore- Windenergieanlagen (OWEA)
http://www.bvl.de/files/441/481/522/578/Abschlussbericht_LOGOWEA-Veroeffentlichung.pdf, 4.7.2011.
- [SCK02] Schmidt, K.: Methodik zur integrierten Grobplanung von Abläufen und Strukturen mit digitalen Fabrikmodellen, Dissertation RWTH Aachen, 2002.
- [SCM11] Schmidt, M.: Modellierung logistischer Prozesse der Montage. Hannover: Tewiss 2011.
- [SEN00] Senin, A.; Groppetti, R.; Wallace, D. R.: Concurrent assembly planning with genetic algorithms. In: Robotics and Computer Integrated Manufacturing, vol. 16 (2000), no. 4, pp. 65-72.
- [SFB637] SFB 637: Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. URL: <http://www.sfb637.uni-bremen.de/home.html>

(Stand: November 2011)

- [SHA09] Shan, H.; Zhou, S.; Sun, Z.: Research on assembly planning based on genetic simulated annealing algorithm and ant colony optimization algorithm. In: Assembly Automation, vol. 29 (2009), no.3, pp. 249-256.
- [SHÖ11] Schönsleben, P.: Integrales Logistikmanagement. Springer-Verlag, Berlin u.a., 2011.
- [SHR05] Scholz-Reiter, B.; Höhns, H.; Kolditz, J.; Hildebrandt, T.: Autonomous Supply Net Coordination. In: Proceedings of the 38th CIRP Seminar Manufacturing on Systems, Florianopolis Brazil, 2005.
- [SHU06] Schuh, G.; Kampker, A.; Höhne, T.: Adaptive Logistik - Selbststeuerung in: Fertigung und Montage. in: WT online Vol. 96 (2006) Heft 5, S. 321-324.
- [SHU07] Schuh, G.,Gottschalk, S.,Höhne, T.: High Resolution Production Management In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007), 1, ISSN 0007-8506, S. 430- 442.
- [SHU08] Schuh, G.,Gottschalk, S.,Gulden, A.,Hilchner, R.,Pyschny, N.,Buchner, T.,Haubrich, T.: Strategien und Trends in der Montagetechnik und -organisation, Lösungsansätze aus der Praxis zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der Montage am Standort Deutschland. In: wt Werkstattstechnik online 98, 2008.
- [SHU09] Schuh, G.; Kampker, A.; Narr, C.; Jasinski, T.; Sander, S.; Vogel, C.: Beschaffungslogistik im Maschinen- und Anlagenbau. Apprimus Verlag, Aachen, 2009.
- [SHU11] Schuh, G.; Stich, V.: Produktion am Standort Deutschland. Aachen, 2011.
- [SHU13] Schuh, G.; Stich, V. et al.: Produktion am Standort Deutschland. Ergebnisse der Untersuchung 2013. Aachen, 2013.
- [TEN08] Ten Hompel, M.: „Logistics by Design“ – ein Ansatz für zukunftsfähige Intra-logistik, Serviceorientierte Architektur als Grundlage. Hebezeuge Fördermittel, Berlin 48 (2008) 5, S. 236-240.
- [TÖN97] Tönshoff, H.K., Winkler, M., Ehrmann, M.: Holonic Manufacturing: The Route to Autonomous and Cooperative Manufacturing Systems. Proc. 9th IFAC-Symposium “Information Control in Manufacturing”, 1997.
- [VAL94] Valckenaers, P., Van Brussel, H., Bonneville, F., Bongaerts, L., Wyns, J.: Holonic Manufacturing Systems. IFAC Workshop, IMS'94, Wien, 1994.
- [VDMA07] VDMA: Kennzahlenkompass. VDMA-Verlag, 2007.
- [VOI91] Voigts, A.: Planung und Steuerung variabel nutzbarer Montagebereiche. Diss. Universität Hannover, 1991, S. 20.
- [WAR92] Warnecke, H.-J.: Die fraktale Fabrik. Springer, Berlin, 1992.
- [WEI08] Weigert, G.; Henlich, T.; Klemmt, A.: Methoden zur Modellierung und Optimierung von Montageprozessen. In: Rabe, M. (Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2008.
- [WEI09] Weigert, G.; Henlich, T.: Simulation-based scheduling of assembly operations. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 22 (2009), no. 4, pp. 325-333.
- [WEI11] Weigert, G.; Henlich, T.; Klemmt, A.: Modelling and optimisation of assembly processes. In: International Journal of Production Research, vol. 49 (2011),

no. 14, pp. 4317-4333.

- [WIE14] Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. Hanser, München, 2014.
- [WIN02] Windt, K.; Höhns, H.; Scholz-Reiter, B.: Szenarien für die Reorganisation, Optimierung von Lager- und Distributionsstrukturen durch IT in Logistiknetzen. DVZ Deutsche Logistik-Zeitung. 2002, Nr 56, S.10.
- [WIR01] Wirth, S.; Enderlein, H.; Hildebrand, T.: PLUG+PRODUCE. Ein Modularkonzept zur effizienten Gestaltung wandelbarer Produktions- und Organisationsstrukturen durch Vernetzung. In: Industrie Management * Band 17 (2001) Heft 5, Seite 67-70
- [WYN99] Wyns, J., Van Brussel, H., Valckenaers, P.: Application Framework for Holonic Manufacturing Systems. Proc. 32nd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 1999, pp. 589-594.

11 Abbildungsverzeichnis

Bild 2-1: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Kosten und Planungsaufwand	3
Bild 3-1: Angestrebte Teilziele des vorliegenden Forschungsprojekts	4
Bild 4-1: Zuordnung von Arbeitspaketen zu Teilzielen	7
Bild 4-2: Ablauf für die Identifikation von alternativen Montageprozessen	8
Bild 4-3: Betrachtungsbereich des Forschungsprojekts	8
Bild 4-4: Darstellung u. Klassifizierung von Selektionskriterien in Anlehnung an [KOL99]	10
Bild 4-5: Darstellung von Klassifizierungsparameter einer Prioritätsregel	11
Bild 4-66: Aufbau des Datenmodells	30
Bild 4-78: Auftragsanlegung im Softwaredemonstrator	32
Bild 4-89: Parameterfestlegung im Softwaredemonstrator	32
Bild 4-9: Planungssicht des Softwaredemonstrators	33
Bild 4-10: Prozessablauf für die Verwendung des Demonstrators	34
Bild 13-1: Beispielhafter Montagevorrangfolgegraph einer Anlage (anonymisiert).....	54
Bild 13-2: Beispielhafter Montagevorrangfolgegraph eines Aggregates (anonymisiert) ...	55
Bild 13-3: Beispielhafter Montagevorrangfolgegraph einer Maschine (anonymisiert)	56
Bild 13-4: Vergrößerte Darstellung Bild 4-	57
Bild 13-5: Vergrößerte Darstellung Bild 4-	58
Bild 13-6: Vergrößerte Darstellung Bild 4-6	59
Bild 13-7: Vergrößerte Darstellung Bild 4-7	60
Bild 13-8: Vergrößerte Darstellung Bild 4-8	61
Bild 13-9: Vergrößerte Darstellung Bild 4-9	62

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Ausschnitt der Analyseergebnisse zu den Prioritätsregeln	12
Tabelle 4-2: Anwendbarkeitsanalyse von Prioritätsregeln für die Forschungsfrage	14
Tabelle 7-1: Nach dem Berichtszeitraum geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer ..	43

13 Anhang

13.1 Anhang A1: Montagevorrangfolgegraphen

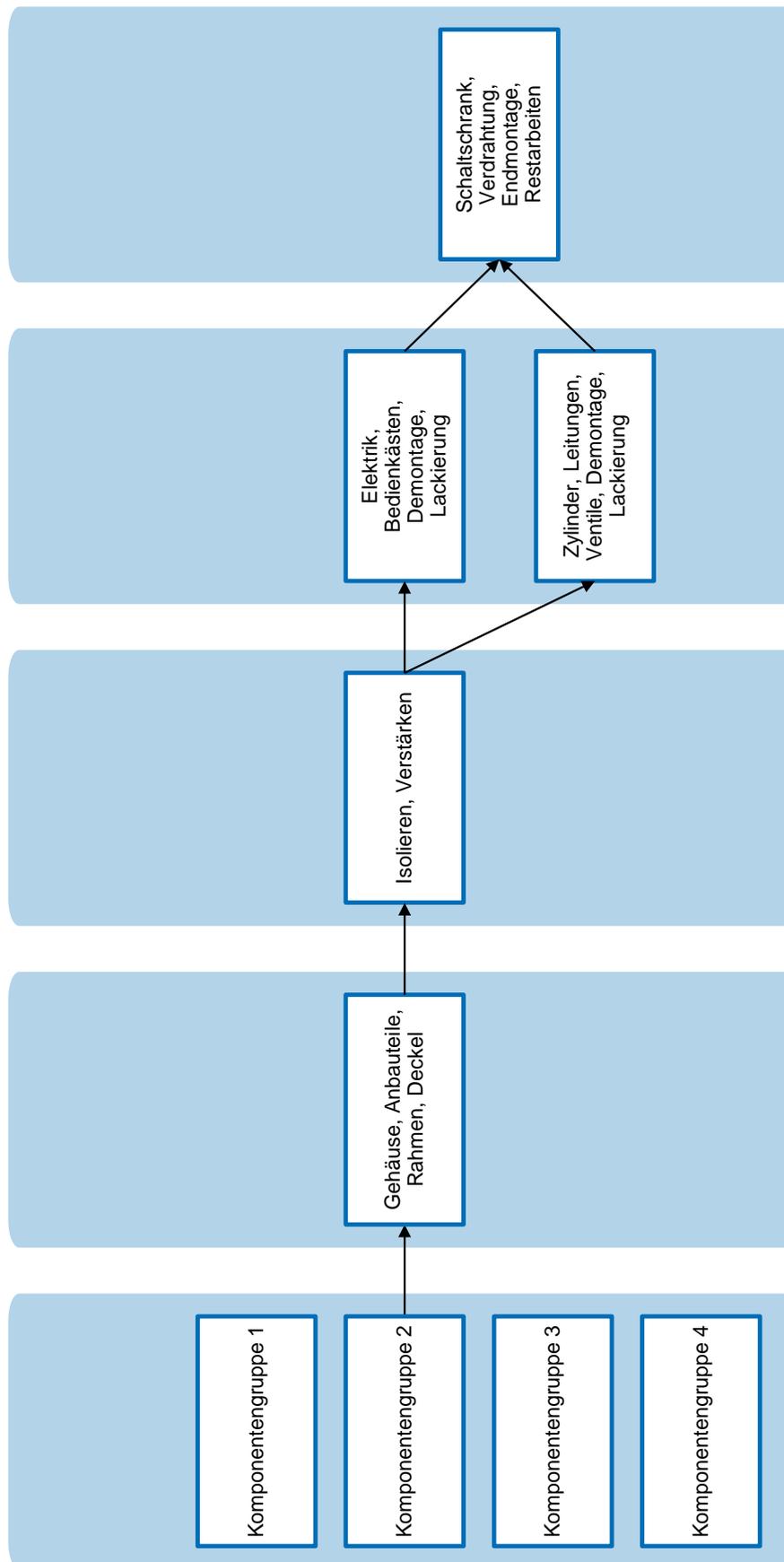


Bild 13-1: Beispielhafter Montagevorrangfolgegraph einer Anlage (anonymisiert)

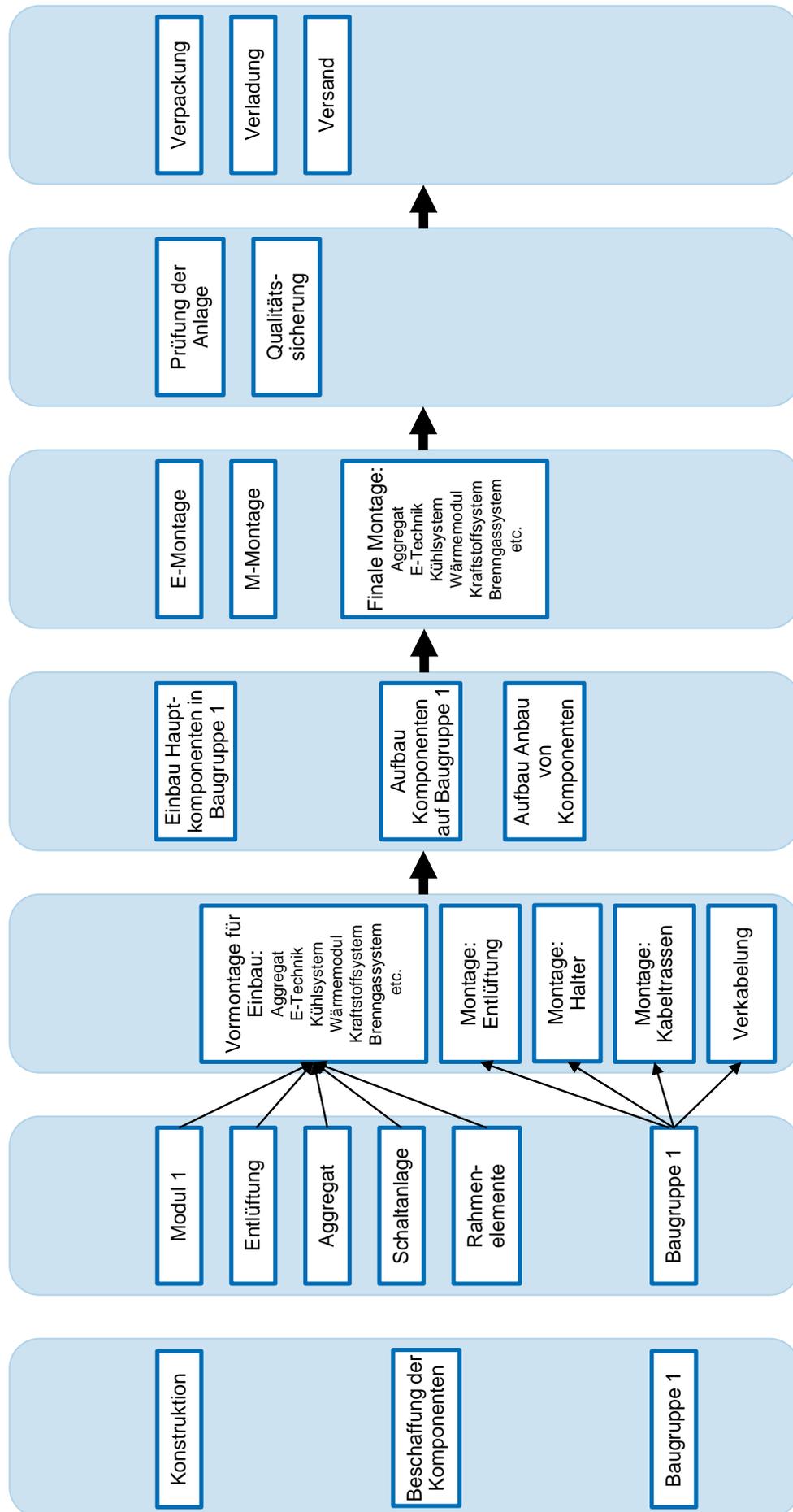


Bild 13-2: Beispielhafter Montagevorrangfolgegraph eines Aggregates (anonymisiert)

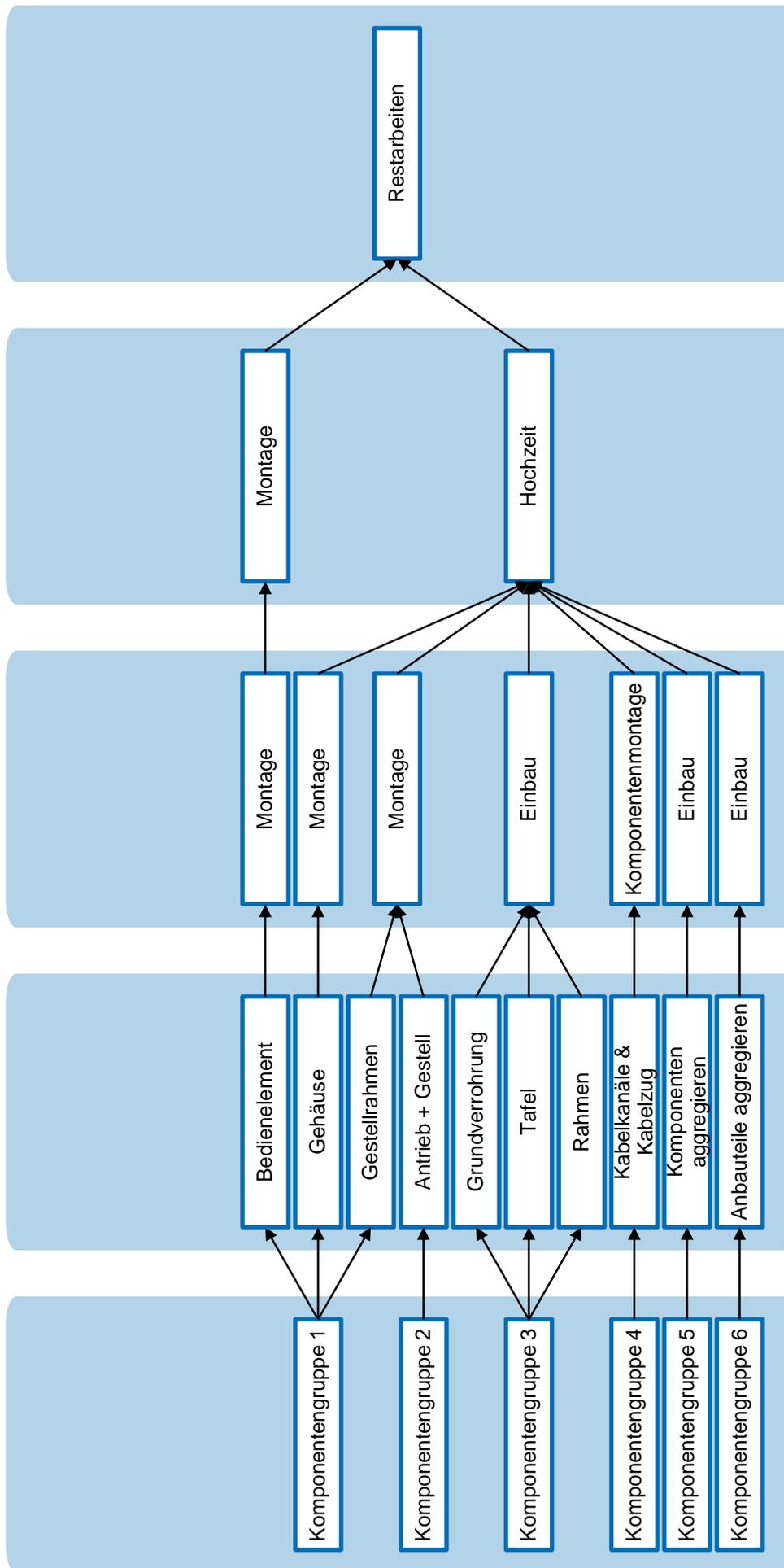


Bild 13-3: Beispielhafter Montagevorrangfolgegraph einer Maschine (anonymisiert)

13.2 Anhang A2: Vergrößerte Abbildungen

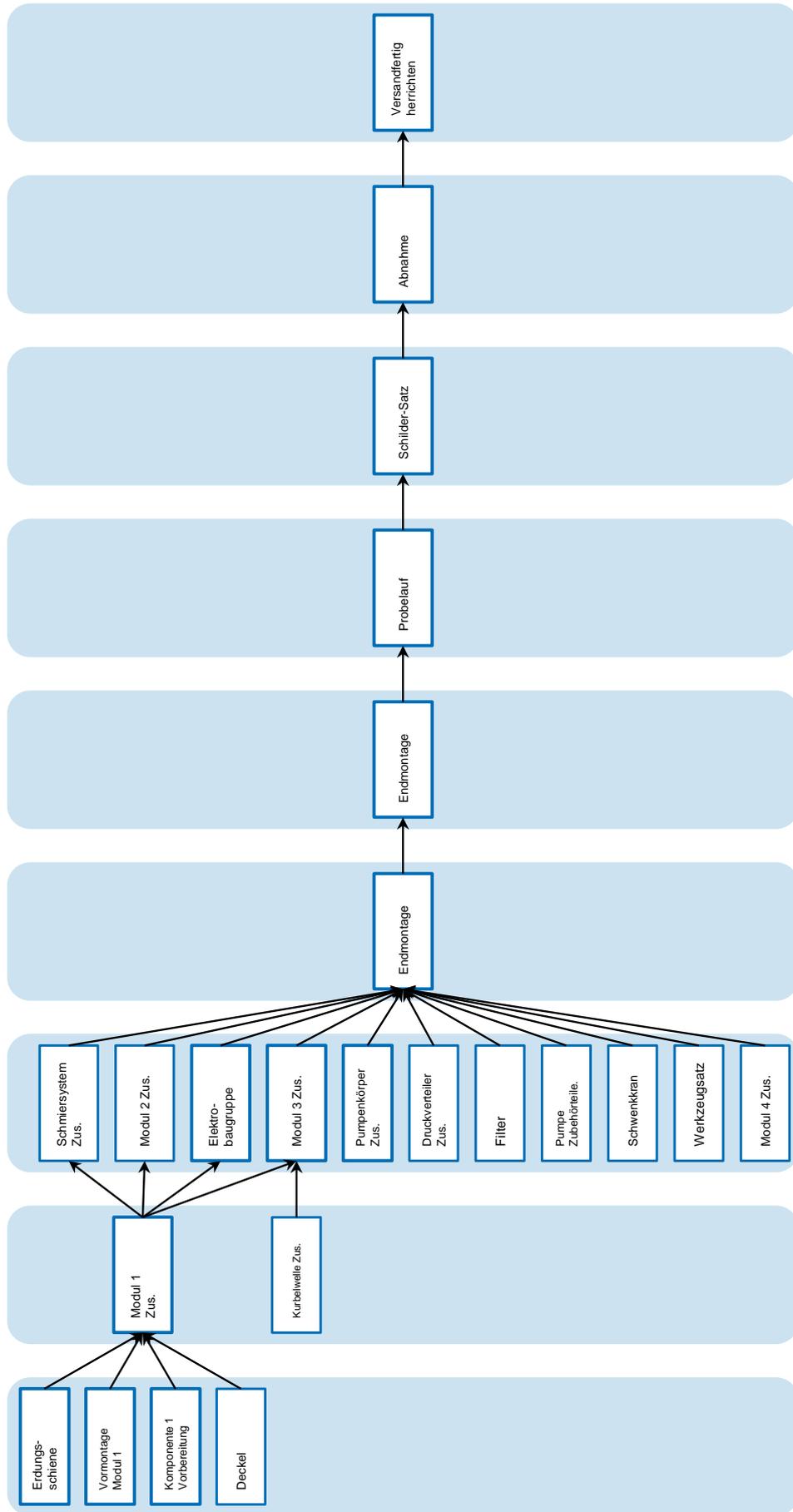


Bild 13-4: Vergrößerte Darstellung Bild 4-

Darstellung der Montageprozesse
(abhängig von Alternativen)

Wählbare Alternativen

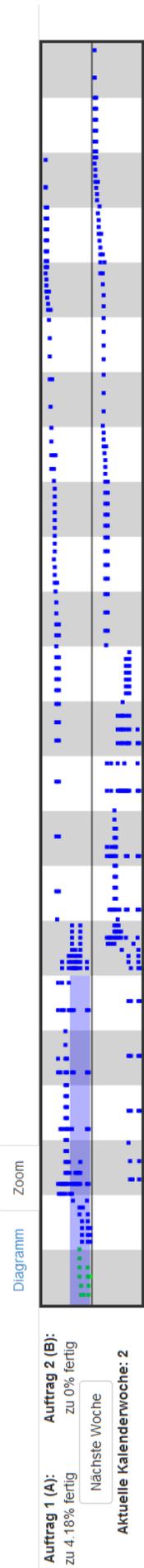
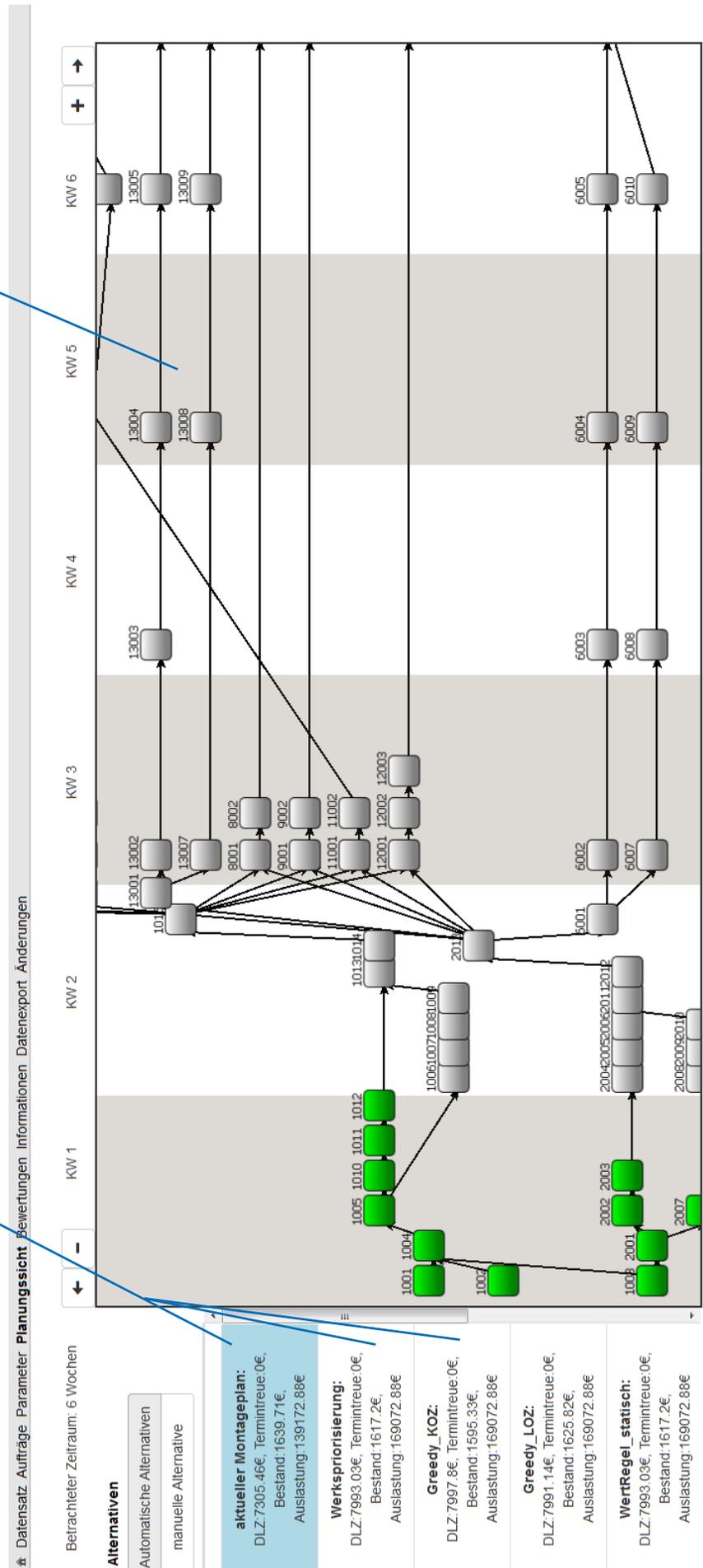


Bild 13-5: Vergrößerte Darstellung Bild 4-

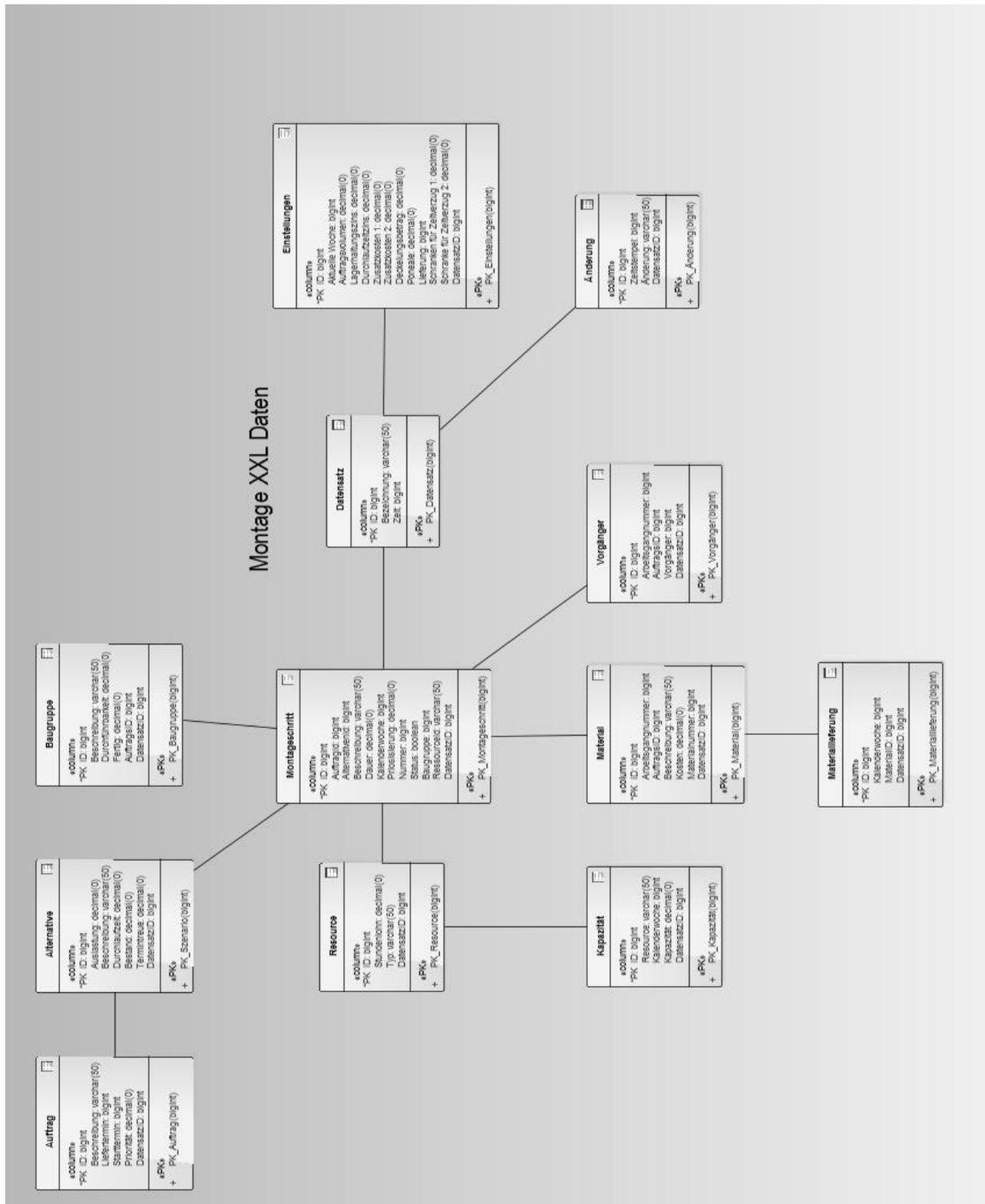


Bild 13-6: Vergrößerte Darstellung Bild 4-6

▲ Datensatz **Aufträge** Parameter Planungssicht Bewertungen Informationen Datenexport Änderungen neuer Auftrag

Laufende Montagen

Kundenauftragsnummer	Produkt	Starttermin [KW]	Endtermin [KW]
1	A	1	30
2	B	3	31

Bild 13-7: Vergrößerte Darstellung Bild 4-7

Parameter

Lieferzeitpunkt vor Einbau [KW]	<input type="text" value="2"/>	Lagerhaltungskostensatz [%]	<input type="text" value="30"/>
Aktuelle Woche [KW]	<input type="text" value="1"/>	Kalkulatorischer Zinssatz pro Jahr [%]	<input type="text" value="6"/>
Liefertermin von A [KW]	<input type="text" value="30"/>	Liefertermin von B [KW]	<input type="text" value="31"/>
Überstundenkosten Montage [€]	<input type="text" value="92.2"/>	Überstundenkosten Lackieren [€]	<input type="text" value="65.2"/>
		Überstundenkosten Elektromontage [€]	<input type="text" value="75.4"/>

Terminabweichungskosten

1.Stufe: Ein Zeitverzug von bis zu KW kann durch Maßnahmen im Versand/Lieferung kompensiert werden. Dafür fallen Kosten in Höhe von € an.

2.Stufe: Ein Zeitverzug von bis zu KW kann durch zusätzliche Maßnahmen in der Inbetriebnahme kompensiert werden. Dafür fallen zusätzliche Kosten in Höhe von € an.

3.Stufe: Ein Zeitverzug von ab KW kann durch keine zusätzlichen betriebsinternen Maßnahmen kompensiert werden. Pro weiterer Verzugswoche fallen daher Pönalen mit einem Pönale-Satz von % des Auftragsvolumens (€) an. Der Deckelungsbetrag beträgt €.

Resourcendaten hochladen

✓

Kapazitätsanteil Auftrag 1 [%]

Kapazitätsanteil Auftrag 2 [%]

Bild 13-8: Vergrößerte Darstellung Bild 4-8

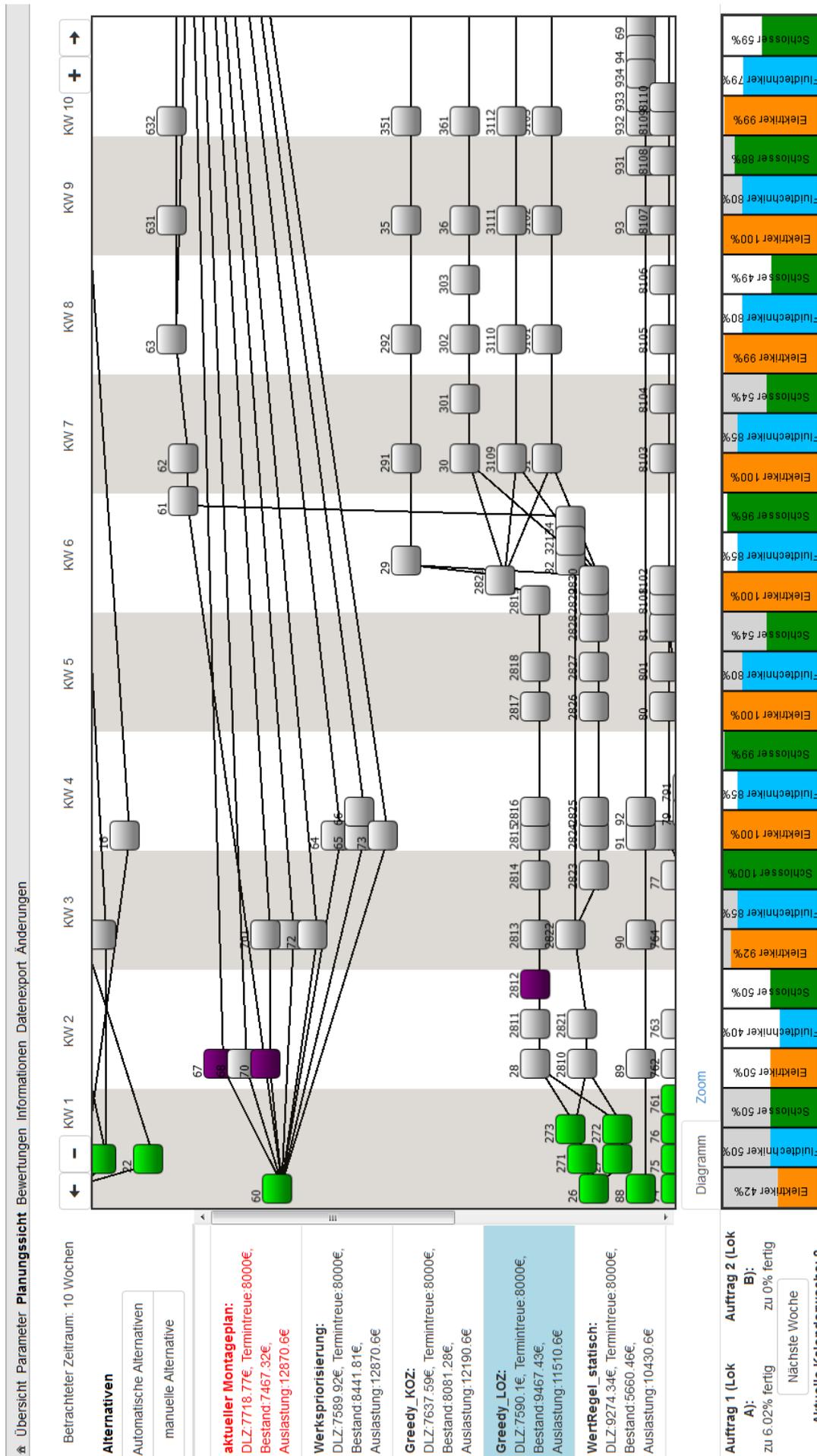


Bild 13-9: Vergrößerte Darstellung Bild 4-9