

Losbildung bei einem Engpass an Lagerfläche im Presswerk eines Automobilzulieferers

Professor Dr.-Ing. Frank Herrmann
Christian Reiter MA

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Innovationszentrum für Produktionslogistik und Fabrikplanung
Postfach 120327, 93025 Regensburg, E-Mail: Frank.Herrmann@OTH-Regensburg.de

Schlüsselwörter

Engpass an Lagerfläche, signifikant beschränkter Lagerplatz, ERP-System, SAP System, Losgrößenverfahren, Silver Meal-Verfahren, Feste Losgröße, Wagner-Whitin-Verfahren, Optimierungsmodell mit beschränktem Lagerplatz.

Abstract

Die im Presswerk eines Automobilzulieferers benötigte Lagerfläche stieg in den letzten Jahren so gewaltig an, dass die bisher verwendeten Produktionslose manuell reduziert werden mussten, um überhaupt einlagern zu können. Die dadurch sich ergebenden höheren Kosten werden quantifiziert. Zur Verbesserung werden die strukturellen Unterschiede zwischen den neuen Losen und den durch ein Standardverfahren in ERP-Systemen gelieferten Losen analysiert. Diese Unterschiede zeigen, dass die 2. Stufe in diesem 2-stufigen Vorgehen – 1. Los berechnen und dann 2. dieses geeignet reduzieren – die Entscheidungen der ersten Stufe in der Regel vollständig revidiert. Ein integrativer Ansatz ist erforderlich. Dies erfolgt durch ein lineares Optimierungsmodell mit beschränkter Lagerfläche. Das ILOG-Tool, ein Standardwerkzeug zur Lösung linearer Optimierungsmodelle, löst dieses Modell innerhalb von Minuten. Dass mit diesem optimalen Verfahren die Kosten substantiell verringert werden, wird simulativ nachgewiesen. Seit einigen Monaten wird dieses Verfahren im Rahmen einer rollenden Planung im Presswerk eingesetzt. Eine rollende Planung bewirkt in der Regel einen Verlust in der Lösungsgüte. In diesem Fall wurden nahezu optimale Lösungen erreicht, mit denen die Kosten substantiell verringert wurden. Die Werksleitung und die Mitarbeiter sind mit diesem neuen Verfahren sehr zufrieden.

1. Einleitung mit Problemverallgemeinerung

Seit geraumer Zeit befindet sich die Automobilbranche im Wandel. Die Hersteller reagieren auf neue Markttrends und wollen möglichst alle Kundenwünsche abdecken. Dies führte zu einer enormen Steigerung der Variantenzahl der PKW-Modellreihen, die am Markt erhältlich sind. Wie das Center Automotive Research der Universität Duisburg-Essen bereits 2012 untersuchte, s.

[Statistika19], stiegen die verfügbaren Modellreihen in Deutschland von 227 Modellen im Jahr 1995 auf 415 im Jahr 2015, s. Abbildung 1.

Diese Entwicklung setzte sich in den folgenden Jahren fort, da die Hersteller immer neue Fahrzeuge entwickeln, um auf dem stark umkämpften Markt möglichst jeden Anspruch der Kunden erfüllen zu können und die Lücken im Produktportfolio schließen zu können. Sehr deutlich zeigt sich die am Beispiel der Audi AG. Ende der 1980er Jahre produzierte Audi nur 3 Baureihen mit 10 Modellen. 2015 wurden bereits 12 verschiedene Baureihen mit 59 Modellen angeboten.

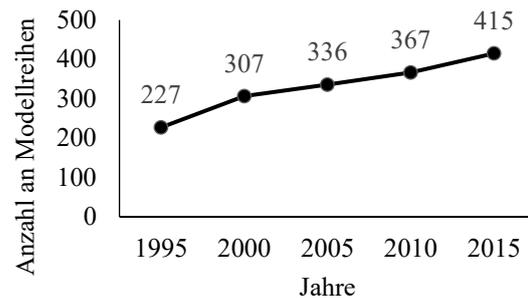


Abbildung 1: Anzahl an PKW-Modellreihen in Deutschland

Seitens der Zulieferer verursacht diese Entwicklung sogar eine noch viel stärker ansteigende Anzahl an Produkten. Dem wurde in den vergangenen Jahren durch ein geschicktes Komplexitätsmanagement, s. [Hirs15], begegnet. Dazu wurde vermehrt auf modulare Baugruppen gesetzt, so dass Teile in möglichst vielen Fahrzeugen verbaut werden können. Obwohl dadurch die Produktanzahl signifikant reduziert werden konnte, s. [Hirs15], gelang nur eine teilweise Kompensation. Deswegen ist trotzdem ein sehr signifikanter Anstieg des Bedarfs an Lagerplatz zu beobachten. Bei dem betrachteten Zulieferer – und dies ist unserer Erfahrung nach repräsentativ – wird dies durch eine Reduktion von Losen gelöst, die durch eine Heuristik bestimmt werden, die in ERP-Systemen typischerweise implementiert ist. Die Reduktion selbst basiert beim betrachteten Zulieferer – und auch dies ist unserer Erfahrung nach ebenfalls repräsentativ – auf Erfahrungswerten beziehungsweise Intuition. Durch die Lösung eines linearen Optimierungsmodells innerhalb von Minuten konnte eine substantielle Kostenreduktion erzielt werden.

Der Artikel ist wie folgt strukturiert: Zuerst wird dieses Problem präzisiert. Danach wird eine Simulation der bisherigen Lösung und der Anwendung von Standardverfahren in ERP-Systemen vorgestellt. Dazu werden die Verfahren beschrieben, die verwendeten Testdaten aus dem realen Unternehmensproblem werden angegeben und die Simulationsergebnisse werden analysiert. Ein lineares Optimierungsmodell mit beschränktem Lagerplatz wird vorgeschlagen. Die Ergebnisse seiner Anwendung auf das Unternehmensproblem – über die gerade genannten Testdaten – werden angegeben und analysiert. Die erzielten Resultate werden zusammengefasst und ihre Anwendbarkeit in anderen Unternehmen wird begründet.

2. Problemstellung beim Beispielunternehmen

Bei dem betrachteten Zulieferer handelt es sich um einen führenden Hersteller im Karosseriebau. Die Untersuchung beschränkt sich auf sein Presswerk. In den letzten fünf Jahren stieg die Zunahme der Anzahl an LKWs pro Jahr zunehmend stärker an, und zwar von ca. 11% auf ca. 26%. Die dadurch verursachte Zunahme an Lagerplatzbedarf wurde noch dadurch verschärft, da, neben Struktur und Verstärkungsteilen, auch viele großvolumige Teile, wie Außenhautkomponenten, die, um Beschädigungen zu vermeiden, in Spezialladungsträgern gelagert (und versendet) werden müssen, produziert werden. Dadurch mussten bereits vor vier Jahren zusätzliche Lagerflächen angemietet werden, wodurch Kosten entstanden, die in den ursprünglichen Preiskalkulationen nicht vorgesehen waren. Durch die bisherige Reduktion der Losgrößen konnte der ansteigende Lagerplatzbedarf lediglich vermindert, aber nicht vermieden werden.

Das Ziel ist ein Verfahren zur Losbildung, welches mit dem existierenden Lagerplatzbedarf auskommt und zugleich möglichst geringe Kosten (i.e. Lager- und Rüstkosten) bewirkt.

3. Aktuelles Verfahren und Standardverfahren

Neben dem bisher in dem realen Anwendungsfall verwendeten Verfahren werden auch Losgrößenverfahren verwendet, die in der Regel in kommerziell verfügbaren ERP-Systemen implementiert sind.

(a) *Verwendetes Verfahren*

Die bisherigen Losgrößen basieren vorwiegend auf dem Verfahren der festen Losgröße von Harris und Andler, die anschließend im laufenden Betrieb durch Erfahrungswerte an die gewachsenen Strukturen und Gegebenheiten angepasst wurden. Dabei wurde bei Überschreitungen der Lagerbeschränkungen reagiert und die Lose entsprechend reduziert. Dadurch erfolgt eine Reduktion ausschließlich aufgrund einer vom Werker noch maximal zu vertretenden Losgröße. Für solche Produkte wurde diese Losgröße immer verwendet – i.e. selbst dann, wenn keine Reduktion von dem berechneten Los nötig ist.

(b) *Ausgewählte Standardverfahren in ERP-Systemen*

Die in kommerziell verfügbaren ERP-Systemen verwendeten Losgrößenverfahren lassen sich in statische und dynamische Verfahren unterscheiden. Statische Verfahren, die in der Regel auf dem von Harris und Andler vorgeschlagenen Vorgehen basieren, berücksichtigen nicht, dass Kundenbedarfe für Perioden wie Tage oder Wochen zu erfüllen sind. Daher werden dynamische Verfahren analysiert. Hiervon sind in kommerziell verfügbaren ERP-Systemen mehrere Verfahren implementiert. Seitens der Forschung werden von diesen die Silver-Meal-Heuristik und die Groff-Heuristik am besten bewertet. Um in dieser Arbeit eine kostenseitige Verbesserung zu betrachten, wird das Wagner-Whitin-Verfahren analysiert, welches die Gesamtkosten über einen Planungszeitraum minimiert. Da die Silver-Meal-Heuristik ebenfalls die Gesamtkosten verwendet (i.e. die Gesamtkosten pro Perioden sind das Entscheidungskriterium) wird sich auf dieses Verfahren beschränkt; nach den Aussagen in der Literatur dürften unsere Ergebnisse sinngemäß auch für die Groff-Heuristik gelten.

Silver-Meal-Heuristik

Nach Wemmerlöv in [Wemm81] und [Wemm82] liefert die 1973 veröffentlichte Silver-Meal-Heuristik, vor allem bei festen Planungshorizonten, sehr gute Ergebnisse. Für eine detaillierte formale Darstellung und Erläuterung anhand eines Beispiels sei auf [Herr11] verwiesen.

Die Silver-Meal-Heuristik, wie auch die meisten anderen dynamischen Verfahren, vergrößern ein bisher gebildetes Los um den Bedarf der nächsten Periode so lange, bis eine Abbruchbedingung erfüllt ist. Nach [Temp08], [Knol87] und [Herr11] bewirkt diese Abbruchbedingung zu kleine Lose, wenn stark volatile Nachfragemengen vorliegen, da dann die durchschnittlichen Gesamtkosten pro Periode oftmals mehrere lokale Minima besitzen. Ebenfalls nach [Temp08], [Knol87] und [Herr11] berechnet die Silver-Meal-Heuristik bei Bedarfen mit einem fallender Trend ungünstige Lose im Vergleich zum Groff-Verfahren. Es sei betont, dass charakteristische Periodenbedarfe existieren, bei denen das Groff-Verfahren schlechtere Lose als die Silver-Meal-Heuristik berechnet. Nach [Temp08], [Knol87] und [Herr11] sind beide Verfahren im Mittel nahezu gleich gut.

Wagner-Whitin (SLULSP)

Von Wagner und Whitin wurde bereits 1958 in [WaWi58] ein lineares Optimierungsproblem formuliert, welches in der Literatur als Single-Level Uncapacitated Lot Sizing Problem (SLULSP) bezeichnet wird, und zur Lösung ein effizientes Verfahren angegeben, welches im Folgenden als Wagner-Whitin-Verfahren bezeichnet wird. Für eine Herleitung und detaillierte Beschreibung sei wiederum auf [Herr09] verwiesen.

Für Bedarfsfolgen mit einem festen Planungshorizont (T) wurde in [Wemm81] und [Wemm82] gezeigt, dass die Gesamtkosten beim Anwenden des Silver-Meal- und des Groff-Verfahrens im Mittel nur um etwa 1% über den durch eine optimale Lösung verursachten Gesamtkosten

liegen, und dass die in der Praxis favorisierten Verfahren der gleitenden wirtschaftlichen Losgröße und das Stückperiodenausgleichsverfahren erheblich schlechtere Lösungen ergeben; diese Zusammenfassung ist auch in [Temp08] angegeben und in [Kno85] wurden ähnliche Ergebnisse publiziert.

Die mittlere Rechenzeit von dem Wagner-Whitin-Verfahren ist für eine Periodenanzahl von T proportional zu T^2 und für Silver-Meal-Heuristik – wie auch für jede andere in der Literatur diskutierte Heuristik, s. [Herr11], ist die Rechenzeit proportional zu $T \cdot \log_2 T$, wodurch aus Sicht des Rechenzeitbedarfs ein optimales Verfahren in der industriellen Praxis einsetzbar sein dürfte.

In der industriellen Praxis ändern sich die Bedarfe im Zeitablauf, wodurch eine erneute Planung in der Regel zu einer geänderten Folge von Losen führt. Um eine Stabilität in der Einlastung von Aufträgen in der Produktion zu erreichen, wird nur eine Bedarfsänderung in (zeitlich) späteren Perioden zugelassen, die durch eine rollende Planung berücksichtigt wird. Durch die schrittweise Fixierung der Lose bei den in der Literatur diskutierten Losgrößenheuristiken, ergibt sich eine Anzahl an Periodenbedarfen, die bekannt sein müssen, so dass Bedarfsänderungen in späteren Perioden zu keiner Änderung von dem ersten Los führen, sofern die jeweilige Losgrößenheuristik erneut angewendet wird. Ein solcher Entscheidungs-Horizont existiert auch bei einer optimalen Lösung, allerdings ist dieser deutlich länger. Stadler beschreibt in [Stadt00] Modifikationen, mit denen dieser Entscheidungs-Horizont soweit reduziert werden kann, dass er mit dem von Losgrößenheuristiken vergleichbar ist. Damit dürfte ein optimales Verfahren in der industriellen Praxis in der Regel einsetzbar sein.

4. Testdaten

Aus Datenschutzgründen wurde von den realen Unternehmensdaten abstrahiert. Die Ergebnisse entsprechen jedoch denen bei den tatsächlich vorliegenden Daten.

Statt alle Produkte im Unternehmen zu berücksichtigen, wird sich auf eine repräsentative Teilmenge beschränkt. Schließlich werden der Planungshorizont sowie die Rüst- und Lagerkosten festgelegt. Durch die geeignete Wahl der Bedarfe werden die im zeitlichen Verlauf im Unternehmen sich ändernden Auftragsituationen, wie hohe und niedrige Auftragslast, abgebildet.

(a) Repräsentative Teilmenge

Es werden Artikel, die in Eigenfertigung hergestellt werden, berücksichtigt. Diese werden aufgrund der Lagerplatzbeanspruchung und dem Verbrauch klassifiziert. Der Betrachtungszeitraum ging von Mai 2018 bis Mai 2019.

Im einzelnen werden die Artikel im Betrachtungszeitraum nach hohen, mittleren oder niedrigem Lagerflächenbedarf je Mengeneinheit (ME) unterteilt. Dabei schwankt der Lagerflächenbedarf zwischen 0.0001 Flächeneinheiten (FE) je ME bis 1.36 FE je ME. Um Klassen mit ähnlich vielen Elementen zu

erhalten, enthält die Klasse niedrig alle Artikel mit einem Lagerflächenbedarf von 0.0001 FE je ME bis 0.0013 FE je ME, die Klasse mittel enthält alle Artikel mit einem Lagerflächenbedarf von 0.00133 FE je ME bis 0.012 FE je ME und schließlich haben die Artikel in der Klasse hoch einen Lagerflächenbedarf, der zwischen 0.0122 FE je ME und 1.36 FE je ME liegt.

Die Verbräuche werden ebenfalls in hoch, mittel und niedrig unterteilt. Dazu wird für jeden auftretenden Verbrauch der prozentuale Anteil errechnet. Entsprechend der klassischen ABC-Analyse, s. z.B. [Herr11], befinden sich in der Klasse hoch alle Artikel, bei denen der prozentuale Anteil vom Verbrauch zwischen 91% und 100% liegt. Die Klasse mittel enthält alle Artikel, bei denen der prozentuale Anteil vom Verbrauch zwischen 71% und 90% liegt. Und schließlich enthält die Klasse niedrig alle Artikel, bei denen der prozentuale Anteil vom Verbrauch zwischen 0% und 70% liegt. Bei den Artikeln in der Klasse hoch liegen die Bedarfsmengen zwischen 5200 ME bis 72380 ME und in der Klasse mittel bewegen sich die Bedarfsmengen der Artikel zwischen 447 ME und 5142 ME.

Anschließend wurden aus den so klassifizierten Artikeln durch ein Leitungsgremium repräsentative Artikel ausgewählt. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 1 eingeteilten Produkte mit ihrer entsprechenden Klasseneinteilung.

		Verbrauch		
		niedrig	mittel	hoch
Lagerplatzbedarf je Artikel	niedrig	Verstärkung links	Stütze Heck	Scharnier rechts A
		Verstärkung rechts		Scharnier links A
				Stütze quer
				Schließblech Mitte
				Schließblech rechts
				Schließblech links
				Scharnier rechts B
				Scharnier links B

Tabelle 1: Klassifizierung relevanter Artikel (wird fortgesetzt)

mittel	Tür vorne rechts B	Verkleidung Heck	Frontklappe innen
	Innenteil Heckklappe	Tür hinten links B	Tür innen vorne links
		Tür vorne links B	Tür innen vorne rechts
		Tür hinten rechts B	Verstärkung Mitte
		Dach A	Heckklappe innen
		Dach B	Frontklappe innen vorne
		Verstärkung Tür	Außenhaut Heck unten
hoch	Tür vorne links A	Tür vorne rechts A	Außenhaut Heck oben A
		Tür hinten rechts A	Außenhaut Heck oben B
		Tür hinten links A	Außenhaut Frontklappe

Tabelle 1: Klassifizierung relevanter Artikel

In der Gruppe der Produkte mit einer hohen Lagerflächenbeanspruchung sind vor allem Außenhautkomponenten zu finden, in der Gruppe mit einer mittlerer Lagerflächenbeanspruchung befinden sich primär Strukturteile und in der mit niedrigem Lagerplatzbedarf sind hauptsächlich Verstärkungsteile.

Bei den Produkten „Tür vorne links A“ und den „Tür vorne rechts A“ handelt es sich um Kuppelprodukte, weswegen ein gleich hoher Verbrauch zu erwarten ist. Verantwortlich für die in Tabelle 1 angegebenen Verbrauchsunterschiede ist beispielsweise eine Verwendung als Ersatzteil. Da im Unternehmen eine mengenmäßig unterschiedliche Produktion nicht möglich ist, ist der Bedarf von solchen Kuppelprodukten das Maximum aus den Einzelbedarfen seiner Endprodukte. Diese zusätzlichen Artikel werden eingelagert und im späteren Verlauf nach Prüfung eventuell entsorgt.

(b) Planungshorizont

Lose werden für die nächsten 50 Wochen berechnet. Allerdings wird bei Verwendung der festen Losgrößen bei Artikeln mit hohen Periodenbedarfen eine mehrfache Produktion pro Woche nötig. Diese Lose decken stets mindestens einen Tagesbedarf ab. Daher besteht für diese Produkte der Planungshorizont aus 350 Tagen.

(c) Rüstkosten

Anhand des Kuppelprodukts „Tür innen vorne links“ und „Tür innen vorne rechts“ werden die zu berücksichtigen Kostenarten zunächst erläutert und

anschließend für alle Unternehmensprodukte verallgemeinert.

Das Kuppelprodukt „Tür innen vorne links“ und „Tür innen vorne rechts“ wird mit 7 Werker und einer Rüstzeit von 0.4 Zeiteinheiten (ZE) auf der Presse 6 gefertigt. Zusätzliches Vorrüsten der Werkzeuge erledigt ein Werker mit einem Hallenkran innerhalb von 1.5 ZE. Ein Werker bereitet mit einem Gabelstapler Ladungsträger an der Anlage innerhalb von 0.25 ZE vor. Diese Aktivitäten verursachen, aufgrund der jeweiligen Stundensätze, Einzelkosten von

- 113.08 Geldeinheiten (GE) für die Presse 6 und 36.24 GE für die dabei eingesetzten Werker,
- 46.46 GE für Vorrüstarbeiten (mit dem Hallenkran),
- 3.67 GE für die Vorbereitung der Ladungsträger, wodurch insgesamt 199.45 GE an Rüstkosten anfallen.

Bei den Artikeln „Verstärkung links“, „Verstärkung rechts“ treten Kosten auf, weil Werkzeuge wegen dem geringen Platz im Presswerk nicht ebendort direkt gelagert werden können. Zum Antransport werden Kranzeiten von 0.5 ZE und Transportzeiten (mit einem Unimog) von 0.25 ZE je Werkzeugsatz benötigt. Wegen der hohen Rüstfrequenz ist eine weitere Schicht für diese Transporte notwendig. Dadurch ergeben sich Kosten von 19.16 GE. Zusätzlich fallen 113.08 GE für eine Presse und 36.24 GE für die dabei eingesetzten Werker an. Damit betragen die Gesamtstückkosten 218.61 GE.

Im Allgemeinen können folgende Einflussfaktoren auftreten:

- Rüstzeit an einer Presse mit empirischer Berücksichtigung der Störzeiten: zwischen 0.4 ZE und 1.7 ZE.
- Anzahl an benötigten Werkern für einen Rüstvorgang: je nach Größe der verwendeten Presse und dem jeweiligen Auftrag zwischen 2 und 7 Workern.
- Vorrüstzeit der Werkzeuge je nach Anzahl der benötigten Werkzeugsätze. Bei zwei Pressen muss ein Vorrüsten während einem Anlagenstillstand stattfinden, wodurch eine um bis zu 1.5 ZE höhere Rüstzeit an der Anlage verursacht wird.
- Ladungsträgervorbereitung für zum Produktionsstart benötigte Ladungsträger von 0.25 ZE.
- Werkzeugtransport bei Ersatzteilaufträgen über Kranzeiten von 0.5 ZE und Transportzeiten (mit einem Unimog) von 0.25 ZE: also 0.75 ZE.
- Anzahl der benötigten Werkzeugsätze: zwischen 1 und 5.

Für alle Produkte wurden diese Berechnungen durchgeführt; Details sind in [Reit19] angegeben. Ihre Ergebnisse befinden sich in den Tabellen 2 und 3.

(d) Lagerkosten

Wie bei den Rüstkosten wird das Vorgehen anhand dem Kuppelprodukt „Außenhaut Frontklappe“, „Frontklappe innen“ und „Frontklappe innen vorne“ zunächst erläutert und anschließend für alle Unternehmensprodukte verallgemeinert.

Zur Handhabung befinden sich die einzelnen Teile in Ladungsträgern. In einem Ladungsträger für Innenteile

befinden sich 250 ME und in einem Ladungsträger für Außenhäute 40 ME. Aufgrund der Abmessungen der Innenteile und der Berücksichtigung von nicht nutzbarer Fläche, die nahezu zwangsläufig zwischen zwei direkt nebeneinanderliegenden Produkten auftritt – denken Sie beispielsweise an zwei Kugeln – beträgt der Flächenbedarf eines Ladungsträgers für Innenteile 3.12 Flächeneinheiten (FE). Im Fall von Außenhäuten benötigt ein Ladungsträger 5.2 FE an Fläche. Ladungsträger für Innenteile sind dreifach stapelbar und solche für Außenhäute sind zweifach stapelbar. Verantwortlich für solche unterschiedliche Anzahlen an Stapelungen sind die Belastbarkeit der Ladungsträger und deren Beschaffenheit sowie die baulichen Gegebenheiten in den Lagerhallen; letztere bewirkt im Unternehmen eine Reduzierung der umsetzbaren Stapelhöhe um 20 Prozent. Dadurch reduziert sich ihr Flächenbedarf bei Innenteilen auf $\frac{1}{3}$ und bei Außenhäuten auf $\frac{1}{2}$; also auf 1.04 FE für einen Ladungsträger für Innenteile und auf 2.6 FE für einen Ladungsträger für Außenhäute. Bei einer monatlichen Flächenmiete von 0.22 GE je FE und Woche betragen die Lagerkosten 0.23 GE je Woche für einen Ladungsträger für Innenteile sowie 0.57 GE je Woche für einen Ladungsträger für Außenhäute. Benötigt werden Lagerkosten je ME – also GE je ME und Woche – weswegen diese Kosten durch die Füllmenge des jeweiligen Ladungsträgers zu dividieren ist.

Zusätzlich wird die Kapitalbindung der Artikel dadurch berücksichtigt, in dem für ein Innenteil 0.003 GE je Woche und für eine Außenhaut 0.022 GE je Woche an Kosten anfallen.

Schließlich werden noch das Handling und die Administration des Lagers berücksichtigt, in dem für jeden Ladungsträger Kosten von 1.10 GE berechnet werden. Wegen der durchschnittlichen Lagerdauer von 21 Tagen, also 3 Wochen (Perioden), und der Anzahl an Produkten in einem Ladungsträger, werden dadurch Kosten von 0.001467 GE je Woche für ein Innenteil und 0.009167 GE je Woche für ein Außenteil verursacht.

Dadurch betragen die gesamten Lagerkosten 0.0053867 GE je Woche für eine „Frontklappe innen“ und für eine „Frontklappe innen vorne“ sowie 0.0454167 GE je Woche für eine „Außenhaut Frontklappe“. Ihre Summe ergibt die gesamten Lagerkosten für das Kuppelprodukt und betragen 0.0562 GE je Woche und ME. Da dieses Kuppelprodukt hohe Periodenbedarfe besitzt, werden Tage als Periodengröße behandelt und die gesamten Lagerkosten betragen letztlich 0.008 GE je Tag und ME.

Folgende Einflussfaktoren wirken sich dabei im Allgemeinen auf die unterschiedliche Ermittlung der Lagerkosten aus:

- Grundflächen der Ladungsträger zwischen 0.96 FE und 4.00 FE: sie ergeben sich aus den jeweiligen Behältermaßen und der nicht nutzbaren Fläche.
- Stapelhöhen der Ladungsträger zwischen 2 und 6: sie sind durch Belastbarkeit und Beschaffenheit der

Ladungsträger sowie durch die baulichen Gegebenheiten in den Lagerhallen bestimmt.

- Kapitalbindungskosten der Artikel zwischen 0.045 GE und 0.5 GE: sie ergeben sich durch die Komplexität und der Größe der Produkte.
- Füllmenge der Ladungsträger zwischen 14 und 2200 Produkte: sind durch die Art der Ladungsträger und Größe der Produkte bestimmt.

Für alle Produkte wurden diese Berechnungen durchgeführt; Details sind in [Reit19] angegeben. Ihre Ergebnisse sind in den beiden Tabellen 2, im Fall von Tagen als Periodengrößen, und 3, bei Wochen als Periodengröße, angegeben.

Artikel	Rüstkosten in GE	Lagerkosten pro Woche in GE
Innenteil Heckklappe	712.54	0.0097
Tür vorne/hinten links/rechts B 4 Kuppelprodukte	295.23	0.0444
Verstärkung links/rechts 2 Kuppelprodukte	168.04	0.0055
Außenhaut Heck oben B	356.42	0.0407
Tür A vorne/hinten links/rechts 4 Kuppelprodukte	295.23	0.0664
Verkleidung/ Stütze Heck 2 Kuppelprodukte	604.43	0.0097
Tür innen links/rechts 2 Kuppelprodukte	199.45	0.0191
Verstärkung Tür	712.54	0.0161
Scharnier links/rechts A 2 Kuppelprodukte	616.76	0.0090
Dach B	527.81	0.0156
Dach A	527.81	0.0152
Stütze quer	98.26	0.0020

Tabelle 2: Rüst- und Lagerkostenübersicht Artikel mit einem Betrachtungshorizont von 50 Perioden.

	Rüstkosten in GE	Lagerkosten pro Tag in GE
Frontklappe innen/vorne/außen 3 Kuppelprodukte	199.45	0.008
Außenhaut Heck oben/unten A 2 Kuppelprodukte	271.77	0.0603
Heckklappe innen	616.76	0.0011
Scharnier links/rechts B 2 Kuppelprodukte	98.26	0.0015
Verstärkung Mitte	271.77	0.0018
Schließblech links/rechts 2 Kuppelprodukte	98.26	0.0018
Schließblech Mitte	98.26	0.0002

Tabelle 3: Rüst- und Lagerkostenübersicht Artikel mit einem Betrachtungshorizont von 350 Perioden.

(e) Lagerplatzbeschränkungen

Die hergestellten Artikel müssen zu einem Teil in durch den Hersteller bereitgestellten Sonderladungsträgern gelagert und transportiert werden. Diese speziell für diese Produkte entwickelten Behälter stehen nur in einer begrenzter Stückzahl zur Verfügung. Die restlichen Produkte werden auf der verbleibenden Fläche gelagert. Damit kein Produkt unverhältnismässig viel Lagerfläche belegt, wurde für jedes Produkt eine maximal verwendbare Fläche festgelegt.

Die folgende Tabelle 4 enthält alle Produkte, die in Sonderladungsträger zu lagern sind mit ihrer Anzahl und ihrer erlaubten Füllmenge. Das Produkt aus Anzahl und Füllmenge ist folglich die maximale Losgröße.

Bei Kuppelprodukten ist die maximale Losgröße das Minimum der maximalen Losgröße seiner Bestandteile. So ist beispielsweise die maximale Losgröße von dem Kuppelprodukt „Tür vorne links B“, „Tür vorne rechts B“, „Tür hinten links B“ und „Tür hinten rechts B“ das Minimum aus 2660 Mengeneinheiten (ME), 2520 ME, 1960 ME und 840 ME, also 840 ME. Eine Bereinigung einer solchen Situation durch Beschaffung von zusätzlichen Ladungsträgern, aber auch durch Abbau von überschüssigen Ladungsträgern, die in dieser Fallstudie auftreten, ist beabsichtigt; es ändert nichts am grundsätzlichen Problem.

Für die restlichen Produkte wurde die produktspezifische verfügbare Fläche, auf welcher ein Artikel gelagert werden darf, durch den Flächenbedarf dieses Artikel dividiert. Der resultierenden maximale Lagerbestand befindet sich in der folgenden Tabelle 5.

Artikel	Anzahl Ladung- sträger	Füllmenge Ladungsträger in ME	maximale Losgröße in ME
Außenhaut Frontklappe	112	40	4480
Tür vorne links B	38	70	2660
Tür vorne rechts B	36	70	2520
Tür hinten links B	28	70	1960
Tür hinten rechts B	12	70	840
Dach A	6	140	840
Tür vorne links A	17	50	850
Tür vorne rechts A	17	50	850
Tür hinten links A	17	50	850
Tür hinten rechts A	17	50	850
Tür innen vorne links	23	200	4600
Tür innen vorne rechts	23	200	4600

Tabelle 4: Maximale Losgrößen in Mengeneinheiten (ME) für Artikel mit Spezialladungsträgern.

Artikel	Maximaler Lagerbe- stand in ME	Artikel	Maximaler Lagerbe- stand in ME
Dach B	1540	Außenhaut Heck oben B	3240
Innenteil Heckklappe	1400	Scharnier links B	30000
Verkleidung Heck	1500	Scharnier rechts B	30000
Stütze Heck	1500	Verstärkung Mitte	3500
Außenhaut Heck oben A	3780	Schließblec h links	110000
Heckklappe außen unten	3780	Schließblec h rechts	110000
Heckklappe innen	3300	Schließblec h Mitte	60000
Verstärkung Tür	600	Stütze quer	22500
Scharnier links A	13000	Verstärkung rechts	40000
Scharnier rechts A	13000	Verstärkung links	40000

Tabelle 5: Maximale Lagerbestände in Mengeneinheiten (ME) für Artikel mit Lagerplatzbeschränkungen.

(f) Bedarfe

Da der betrachtete Zulieferer sowohl einzelne Pressteile wie auch zusammengesetzte Baugruppen liefert, besteht das Produktportfolio des Presswerks aus Artikeln, die direkt zum Kunden geliefert werden und aus Bauteilen, die zuerst im Rohbau zusammengefügt werden müssen, wobei eine einstufige Produktion vorliegt.

Für Produkte, die direkt für den Versand zum Kunden bestimmt sind, treffen die Bedarfe via „Electronic Data Interchange“ (EDI) nach [KeLS10] und liegen für diese Untersuchung vor.

Bei allen anderen Produkten, die als Komponenten direkt in ein Endprodukt eingehen, entstehen aufgrund der Materialbedarfsplanung (MRP) wie folgt Bedarfe. Es liegen keine Lagerzugänge vor. Alle betrachteten Artikel haben einen Direktbedarfskoeffizienten von 1. Deshalb sind die Endprodukt-Bedarfe zugleich die Nettobedarfe für die einstufigen Losgrößenprobleme. Der Bedarfszeitpunkt ist der Produktionsstart des Endproduktes minus einer Periode für die Vorlaufzeit. Aus den bekannten Bedarfen für die Endprodukte, s.o., wird durch ein am Innovationszentrum für Produktionslogistik und Fabrikplanung vorhandenes Tool zur Materialbedarfsplanung die terminierten Bedarfe für die Komponenten auf die gerade beschriebene Art und Weise ermittelt.

Um allgemeingültige Kennzahlen zu erreichen, wird diese Bestimmung von Periodenbedarfen für die einzelnen Produkte 15-mal wiederholt – zur Anzahl an Wiederholungen s. den nächsten Abschnitt.

In den Tabellen zu den Bedarfen für jedes Produkt im Anhang sind, wegen den 15 Wiederholungen, die mittleren minimalen und maximalen Bedarfe in den Betrachtungszeiträumen sowie deren Mittelwerte und Standardabweichungen angegeben. Daraus lassen sich die Wertebereiche für die zur Berechnung der Losgrößen verwendeten Bedarfe der einzelnen Artikel und Baugruppen sowie deren Schwankungen gut erkennen. Dabei treten zum Teil sehr niedrige Bedarfe auf, bei denen die Mittelwerte im zweistelligen Bereich liegen und auch die Streuungen gering ausfallen, bis zu relativ hohen Bedarfen mit mittleren Bedarfen von über 3000 ME und Streuungen, die mehr als das doppelte des Mittelwertes betragen.

5. Analyse des aktuellen Verfahrens und der Standardverfahren in ERP-Systemen

Gegenstand dieses Abschnitts ist die Analyse der Wirkung der Losgrößenreduktion im betrachteten Unternehmen zur Einhaltung des beschränkten Lagerplatzes. Daher werden, wie im Abschnitt 3 begründet, die drei Verfahren Silver-Meal, Wagner-Whitin sowie das aktuell im Unternehmen verwendete Verfahren gegenübergestellt. Eine Voruntersuchung ergab, dass eine 15-malige Durchführung der Losgrößenberechnung zu statistisch signifikanten Ergebnissen führt.

Gleiche Reichweiten der durch die drei Verfahren bestimmten Losbildungen (i.e. Folge von Losen über den (gleichen) Planungszeitraum) bedeuten identische Lose (es ist eine notwendige und hinreichende Bedingung für identische Lose). Daher werden die auftretenden Reichweiten zunächst untersucht. Solche Unterschiede bewirken oftmals unterschiedliche Kosten sowie verursachte Lagerbestände und vor allem Verletzungen des beschränkten Lagerplatzes. Diese werden daher anschließend untersucht.

Wegen der hohen Anzahl an Messergebnissen, sind ihre einzelnen Kennzahlen zu den Losen in Tabellen je Artikel im Anhang angegeben.

(a) Reichweite der Lose

Da die Reichweite für diese Untersuchung hinreichend genau mit der Anzahl an Losen korreliert und es sich bei der Anzahl an Losen nur um eine Kennzahl handelt, wird nur diese untersucht.

Generell ist die Anzahl der Lose des aktuell verwendeten Verfahrens bei fast jedem betrachteten Artikel deutlich höher als bei den beiden alternativen Standardverfahren. Zwischen dem Silver-Meal-Verfahren und aktuell verwendeten Verfahren ist die prozentuale Erhöhung der Anzahl an Losen aufgeführt, wobei hier und im Weiteren die prozentualen Abweichungen immer bezogen auf den höheren Wert berechnet werden. Diese prozentuale Erhöhung schwankt zwischen 20% und 72%, liegt im Mittel bei 48.7% und hat eine Streuung von 16.3. Die Kennzahlen zeigen ferner bereits eine substantielle Erhöhung (der Anzahl an Losen) vom Wagner-Whitin- zum Silver-Meal-Verfahren. Diese schwankt zwischen 0% und 64.7%, liegt im Mittel bei 35% und hat eine Streuung von 20.1. Daher werden im Unternehmen gegenüber der kostenminimalen Lösung die Anzahl der Lose noch sehr viel höher erhöht (gegenüber dem obigen Vergleich zum Silver-Meal-Verfahren). Sie schanken zwischen 42.9% und 86.4%, haben einen Mittelwert von 67.2% und eine Streuung von 12.4.

(b) Kosten

Da die Anzahl an Losen mit der Anzahl an Rüstvorgängen korreliert, ist nach dem aufgezeigten Anstieg an verwendeten Losen zu erwarten, dass die Rüstkosten entsprechend ansteigen. Im Folgenden wird die prozentuale Erhöhung der Kosten gegenüber dem Verfahren angegeben, das als zweites genannt wird. Die Erhöhung von dem Wagner-Whitin- zum Silver-Meal-Verfahren schwankt zwischen 0% und 64.7%, liegt im Mittel bei 34.1% und hat eine Streuung von 18.9. Von dem Silver-Meal-Verfahren zum aktuellen Verfahren im Unternehmen dominieren die Erhöhungen, es treten auch substantielle Verringerungen auf. Im Einzelnen schwanken diese (auch negativen) Erhöhungen zwischen -42.3% und 72%, liegen im Mittel bei 40.35% und haben eine Streuung von 31.8. Wie aus diesen Werten bereits zu vermuten ist, werden gegenüber der kostenminimalen Lösung die Rüstkosten im Unternehmen noch deutlicher erhöht. Konkret schanken diese zwischen 0% und 86.35%, haben einen Mittelwert von 61.42% und eine Streuung von 21.49. Hohe Rüstkosten implizieren in der Regel geringere Lagerkosten. So sind diese Lagerkosten gegenüber dem optimalen Verfahren im Mittel sowohl beim Silver-Meal-Verfahren als auch bei dem aktuellen Verfahren im Unternehmen deutlich geringer. Gegenüber dem optimalen Verfahren schwanken diese (auch negativen) Erhöhungen durch das Silver-Meal-Verfahren zwischen -64% und 5.9%, liegen im Mittel bei -34% und haben eine Streuung von 21.7. Von dem Silver-Meal-Verfahren zum aktuellen Verfahren im Unternehmen schwanken diese (negativen) Erhöhungen

zwischen -65.3% und 218.17%, liegen im Mittel bei -6.17% und haben eine Streuung von 70.2. Und schließlich schwanken diese (negativen) Erhöhungen vom optimalen Verfahren zum Verfahren im Unternehmen zwischen -82.9% und 38.56%, liegen im Mittel bei -43.64% und haben eine Streuung von 32.86. In Summe schanken dadurch die Erhöhungen der Gesamtkosten vom Wagner-Whitin-Verfahren zum Silver-Meal-Verfahren zwischen 0.4% und 37.55%, liegen im Mittel bei 14.98% und haben eine Streuung von 12.82. Vom Silver-Meal-Verfahren zum Verfahren im Unternehmen dominieren Erhöhung, es treten auch Verringerungen auf. Sie schwanken zwischen -3.3% und 59.62%, liegen im Mittel bei 36.7% und haben eine Streuung von 18.26. Bei allen Produkten liegt ein Gesamtverlust an Kosten vor und die Gesamtkostenerhöhungen schwanken zwischen 10.72% und 72.81%, liegen im Mittel bei 46.09% und haben eine Streuung von 17.3.

(c) *Lagerbestände und Lagerbestandsüberschreitungen*
 Nach der obigen Analyse der Lagerkosten ist klar, dass bereits das Silver-Meal-Verfahren geringere Bestände als das Wagner-Whitin-Verfahren aufweist und für das Verfahren im Unternehmen gilt dies umso mehr. Da die Lagerkostensätze produktspezifisch sind, liegt keine Proportionalität zwischen diesen Beständen und den Lagerkosten vor. Daher sind die prozentualen Verringerungen des Gesamtlagerbestand im folgenden genannt; die prozentualen Abweichungen werden, auch im Weiteren, mit Bezug zu dem Verfahren angegeben, das als zweites genannt ist. Es sei angemerkt, dass die Tabellen im Anhang zusätzlich für die Lagerbestände von jedem Produkt sein Minimum, sein Maximum, seinen Mittelwert und seine Streuung enthalten. Vom Wagner-Whitin-Verfahren zum Silver-Meal-Verfahren schwanken die Verringerungen des Gesamtlagerbestand zwischen 174.92% und -77.11%, liegen im Mittel bei 50.56% und haben eine Streuung von 72.41. Vom Silver-Meal-Verfahren zum Verfahren im Unternehmen schwanken die Verringerungen zwischen 65.31% und -217.99%, liegen im Mittel bei 4.7978% und haben eine Streuung von 71.74. Die deutlichen Verbesserungen der Gesamtkosten (beim Wagner-Whitin-Verfahren) werden somit durch sehr viel höhere Lagerbestände erreicht. Konkret schwankt die substantielle Reduktion der Lagerbestände durch das Verfahren im Unternehmen gegenüber dem Wagner-Whitin-Verfahren zwischen 82.91% und -38.54 %, liegen im Mittel bei 44.43% und haben eine Streuung von 33.69.

Diese deutlichen Verringerungen der Lagerbestände durch das Verfahren im Unternehmen gegenüber dem Silver-Meal- und dem Wagner-Whitin-Verfahren bedeuten nahezu zwangsläufig, dass die vorliegenden Kostensätze zu große Lose präferieren. Die folgende Tabelle 6 enthält für jedes Losgrößenverfahren die über alle Produkte kumulierte Anzahl an Perioden mit einer Überschreitung der Lagerbestandsbeschränkung. Die durch diese Verfahren nicht lagerbaren Mengeneinheiten sind, kumuliert über alle Produkte und Perioden, ebenfalls in dieser Tabelle 6 angegeben und zwar

aufgeschlüsselt nach Minimum, Maximum, Mittelwert und Streuung.

	Anzahl an Perioden mit Überschreitung	min	max	μ	σ
WW	675	0	38646	14403	8375
SM	313	0	24574	1937	3660
Fest	0	0	0	0	0

Tabelle 6: Überschreitungen der Lagerbestandsbeschränkungen, kumuliert nach Produkten und (teilweise) nach Perioden; 3050 ist die Gesamtanzahl an Perioden.

Tabelle 6 zeigt, dass sowohl durch das Wagner-Whitin- als auch durch das Silver-Meal-Verfahren die mögliche Lagermenge substantiell überschritten wird. So tritt beim Wagner-Whitin-Verfahren in 22.13% der Perioden eine Überschreitung der Lagerbestandsbeschränkung auf. Deutlich geringer sind die Überschreitungen durch das Silver-Meal-Verfahren, nämlich in nur 10.26% der Perioden und die mittlerer Anzahl an zu viel zu lagernden Produkte ist nur etwa 13% von der aufgrund des Wagner-Whitin-Verfahrens. Andererseits verursacht das Verfahren im Unternehmen signifikant höhere Gesamtkosten als das Wagner-Whitin-Verfahren und auch als das Silver-Meal-Verfahren. Diese mögliche Kosteneinsparung erfordert eine Erweiterung der Lagerfläche, die nicht wirtschaftlich ist, auch deswegen, weil angenommen wurde, dass durch eine bessere Planung der beschränkten Lagerfläche deutlich geringere Gesamtkosten als durch das aktuell im Unternehmen verwendeten Verfahren realisiert werden können.

Eine weitere Analyse des aktuellen Verfahrens zeigt, dass die „Reduktion aufgrund einer vom Werker noch maximal zu vertretenden Losgröße“, s. Abschnitt 3, das Auftreten von Lagerbestandsüberschreitungen nicht immer verhindert. Zur Vermeidung wird ein Tool (in Excel) eingesetzt, das die zu planenden Perioden kennzeichnet, in denen eine Überschreitung der Lagerkapazität auftritt, und zu verschiebende oder reduzierende Lose anhand der geringsten Rüstkosten vorschlägt. Dieser Fall tritt bei 2 von 39 untersuchten Artikeln auf. So beträgt beispielsweise bei dem Produkt „Heckklappe innen“ die feste Losgröße nach dem Verfahren im Unternehmen 3200 Mengeneinheiten (ME) und der maximal mögliche Lagerendbestand beträgt 3300 ME. In einer Periode liegt jedoch ein Bedarf über 3640 ME vor. Da der Lagerendbestand in der Vorperiode nur 275 ME beträgt, kann der Bedarf nicht durch ein einziges Los gedeckt werden, weswegen zusätzlich in der Vorperiode produziert werden muss. Da eine Produktion der festen Losgröße zu einer Überschreitung des maximalen Lagerendbestands führen würde, schlägt das (genannte) Tool vor, das Los soweit zu reduzieren, so dass der maximale Lagerendbestand komplett genutzt wird. Die grundsätzliche Bedienung von solchen hohen Abrufen ist dabei aber nicht problematisch, da die Artikel im Versandprozess bereits einer Fläche zur

Vorkommissionierung im Versandbereich zugeführt werden und dadurch eine solche Lagerplatzüberschreitung behoben wird. Sowohl das aktuell im Unternehmen verwendete Verfahren als auch das Silver-Meal-Verfahren berechnen so große Lose, so dass keine Fehlmengen auftreten. Fehlmengen sind bei dem Optimierungsmodell ohne beschränkter Kapazität (i.e. dem Wagner-Whitin-Verfahren) und mit beschränkter Kapazität, s. den nächsten Abschnitt, generell ausgeschlossen.

Die analysierten Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen den Losen der drei Verfahren belegen, dass die beschränkte Lagerkapazität und die durch Kostensatz präferierten Losgrößen simultan berücksichtigt werden müssen. Folglich dürfte sich das Vorgehen im Unternehmen nur mit hohem Aufwand, in Form von Rechenzeit und Zeit für die Entwicklung einer (besseren) Losgrößenreduktion, entscheidend verbessern lassen. Diesen Aufwand in ein simulatives Verfahren zu investieren, dürfte zu deutlich geringeren (Gesamt-) Kosten führen.

6. Verbesserung durch eine optimale Lösung

Das Wagner-Whitin-Verfahren löst das lineare Optimierungsmodell SLULSP effizient. In ein SLULSP lassen sich beschränkte Kapazitäten, wie einem maximalen Lagerbestand oder einer maximalen Losgröße, durch Restriktionen integrieren. Leider ist das resultierende Problem NP-vollständig. Dies bedeutet, dass es kein Verfahren mit einer polynomial beschränkten Laufzeit gibt. Jede Ausprägung von diesem linearen Optimierungsmodell mit beschränkter Lagerfläche wurde in IBM ILOG CPLEX Optimization Studio in der Version 12.9.0.0 implementiert. Sowohl für diese hohe Anzahl an Perioden als auch für alle Produkte im Presswerk – und nicht nur für die Testdaten – berechnet ILOG innerhalb von Minuten eine optimale Lösung. Damit ist diese Alternative im Presswerk einsetzbar und deswegen wird sie nun genauer analysiert.

Zunächst wird die Erweiterung des SLULSP um eine Beschränkung der Lagerkapazität angegeben. In [Herr09] ist dies unter der Bezeichnung Inventory Capacitated Single-Level Lot Sizing Problem (ICSLSP) erläutert und analysiert. Ebendort, i.e. in [Herr09], finden sich weitere Erweiterungen um verschiedene Ausprägungen von beschränkter Kapazität.

(a) Optimierungsmodell

Das Optimierungsproblem (OPT-I) wird nun vorgestellt. Um das Modell einfach zu halten, ist lediglich eine Version für ein Produkt k angegeben:

Parameter:

T : Länge des Planungszeitraums.

$d_{k,t}$: Nettobedarfsmenge in Periode $t \forall 1 \leq t \leq T$.

h_k : Lagerkostensatz.

M : große Zahl.

s_k : Rüstkostensatz.

y_k^{max} : maximaler Lagerbestand.

Variablen:

$q_{k,t}$: Losgröße in Periode $t \forall 1 \leq t \leq T$.

$y_{k,t}$: Lagerbestand am Ende der Periode $t \forall 0 \leq t \leq T$.

$\gamma_{k,t}$: binäre Rüstkostenvariable mit

$$\gamma_{k,t} = \begin{cases} 1, & \text{falls } q_t > 0 \\ 0, & \text{falls } q_t = 0 \end{cases} \quad \forall 1 \leq t \leq T.$$

Zielfunktion:

$$Z = \sum_{t=1}^T (s_k \cdot \gamma_{k,t} + h_k \cdot y_{k,t}).$$

Restriktionen:

$$y_{k,t-1} + q_{k,t} - d_{k,t} = y_{k,t} \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad \text{Lagerbilanzgleichung.}$$

$$q_{k,t} - M \cdot \gamma_{k,t} \leq 0 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad \text{Rüstbedingung.}$$

$$y_{k,0} = 0 \text{ und } y_{k,T} = 0 \quad \text{Lageranfangs- und Endbestand.}$$

$$q_{k,t} \geq 0 \text{ und } y_{k,t} \geq 0 \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad \text{Nichtnegativität.}$$

$$\gamma_{k,t} \in \{0,1\} \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad \text{binäre Rüstvariable.}$$

$$y_{k,t} \leq y_k^{max} \quad \forall 1 \leq t \leq T \quad \text{maximaler Lagerbestand.}$$

Minimiere Z .

Für alle Produkte kann ein einheitlicher Wert für M gewählt werden, nämlich 100000 und T ist 50 oder 350.

Zur Anwendung von OPT-I auf ein Produkt, sind die Parameter mit konkreten Werten zu belegen. Z.B. lauten die konkreten Belegungen für das Produkt $k = \text{„Tür innen vorne links und rechts“}$: $h_k = 0.0191$, $s_k = 199.45$, $y_k^{max} = 4600$ und die in der folgenden Tabelle 8 angegebenen Bedarfe ($d_{k,t}$).

Periode	1	2	3	4	5
Bedarf	2600	4000	3000	2800	3200
Periode	6	7	8	9	10
Bedarf	4200	3000	3000	3200	2600
Periode	11	12	13	14	15
Bedarf	4400	0	3600	4600	3600
Periode	16	17	18	19	20
Bedarf	4400	2600	3600	3800	4400
Periode	21	22	23	24	25
Bedarf	3800	3400	2600	2800	4200
Periode	26	27	28	29	30
Bedarf	3760	3640	3760	3440	3680
Periode	31	32	33	34	35
Bedarf	4440	2520	2160	0	4000

Tabelle 7: Darstellung der Periodenbedarfe ($d_{k,t}$) zum Beispiel: Tür innen vorne links und rechts. (wird fortgesetzt)

Periode	36	37	38	39	40
Bedarf	2000	4000	5000	4320	2160
Periode	41	42	43	44	45
Bedarf	2160	2160	1550	1549	3098
Periode	46	47	48	49	50
Bedarf	1549	3400	3400	3800	2800

Tabelle 8: Darstellung der Periodenbedarfe ($d_{k,t}$) zum Beispiel: Tür innen vorne links und rechts.

Im tatsächlich verwendeten Modell (OPT-I) werden alle Produkte verwendet; es enthält für jedes Produkt k_i obige Restriktionen (durch Ersetzen von k durch k_i) und die Summe aller einzelnen Zielfunktionen ist die neue Zielfunktion.

(b) Analyse der optimalen Lösung

Grund für diese Untersuchung war die Vermutung, dass das aktuelle Verfahren die beschränkten Lagerbestände einhält, aber zu lasten zu hoher Gesamtkosten geht. Dies wird durch die einzelnen Gesamtkosten zu den Losen in den Tabellen je Artikel im Anhang belegt. Bei 7 von 18 (i.e. in 38.89%) Produkten bewirkt OPT-I die gleichen Gesamtkosten wie SLULSP; auch die Rüst- und Lagerkosten sind gleich. Hierfür verantwortlich ist, dass bei diesen Produkten der Platzbedarf gegenüber der verfügbaren, produktspezifischen Fläche klein ist. Bei allen Produkten sind die Gesamtkosten geringer als durch das aktuelle Verfahren im Unternehmen. Konkret schwanken die substantiellen Reduktionen der Gesamtkosten durch OPT-I gegenüber dem aktuellen Verfahren zwischen 2.65% und 72.81%, liegen im Mittel bei 34.57% und haben eine Streuung von 18.59 – hier und im Folgenden werden die prozentualen Werte mit Bezug zu dem Verfahren angegeben, das als zweites genannt ist. Die kumulierten Kosten sind bei dem aktuellen Verfahren um 49895 Geldeinheiten (GE) höher als bei OPT-I; konkret steigen sie von 96924 GE auf 146819 GE – SLULSP hat gegenüber OPT-I um 26,96 % geringere kumulierte Kosten.

Das aktuelle Verfahren reduziert in 8 von 18 Fällen den Lagerbestand stärker als das optimale Verfahren OPT-I. Über alle 18 Fälle betrachtet, schwanken die Reduktionen des Lagerbestands durch das aktuelle Verfahren gegenüber OPT-I zwischen zwischen 5751.5 und einer Erhöhung von 44.26, liegen im Mittel bei 346.31% und haben eine Streuung von 1350.8.

OPT-I verbraucht den Lagerplatz komplett und das aktuelle Verfahren verwendet ca. 75.48% des Lagerplatzes. Durch OPT-I werden 37164266 Produkte gelagert, während durch das aktuelle Verfahren lediglich 4617853 Produkte gelagert werden; also 2546413 Produkte weniger. Diese Werte korrelieren mit den Anzahlen an Losen bei diesen beiden Verfahren.

Folgende Zahlen demonstrieren die sehr starke Einschränkung der begrenzten Lagerfläche für eine kostenminimale Losbildung. Durch SLULSP müssten 11437024 Produkte eingelagert werden, wodurch die vorhandene Fläche um 73% erhöht werden müsste.

Gegenüber OPT-I würde SLULSP 4272758 Produkte mehr lagern - also vermindert OPT-I die Anzahl an eingelagerten Produkte um 37.36 %.

(c) Rollende Planung

Wie im Abschnitt 3 bereits erläutert wurde, führt im Allgemeinen die Verwendung von SLULSP in einer rollenden Planung zu nicht optimalen Ergebnissen. In [Stadt00] gab Stadtler eine Korrektur an. Daher wurde untersucht, ob OPT-I in einer rollenden Planung nicht kostenminimale Lose liefert und wie hoch etwaige Kostenerhöhungen sind.

Wie im Abschnitt 3 erläutert wurde, ist der sogenannte Entscheidungshorizont relevant. Nach der Literatur, s. [Herr09] und [Stadt00], ist seine Länge entscheidend und diese ist sensitiv gegenüber Parameteränderungen. Daher wurde der bisherige Planungszeitraum T – für alle Produkte – verdreifacht und die Bedarfe der zusätzlichen Perioden haben den gleichen Mittelwert und die gleiche Streuung wie die Bedarfe in den bisherigen Perioden; es sei daran erinnert, dass T entweder 50 oder 350 ist. Jedes solche Planungsproblem wird sowohl komplett geplant wie auch rollend geplant, und zwar mit drei direkt aufeinanderfolgenden Planungszeiträumen über jeweils T Perioden. Identische Ergebnisse ergaben sich für alle Produkte.

50 bzw. 350 Perioden ohne Bedarfsänderungen im Zeitablauf sind für die meisten Produkte zu viel. Untersucht wurde eine rollende Planung über 25 Perioden statt 50 Perioden und der Möglichkeit vor der zweiten Planung Bedarfe ab der 26. Periode zu ändern. Dies führte zu einer Verschlechterung der Gesamtkosten um 0.94% – es sei angemerkt, dass die Verschlechterung der Gesamtkosten beim SLULSP lediglich 0.66 % beträgt.

Im Unternehmen besteht der Planungshorizont einer solchen rollenden Planung stets aus wenigstens 5 Perioden. Die Idee von dem Verfahren von Stadtler, s. [Stadt00], wurde auf OPT-I übertragen. Dadurch konnte erreicht werden, dass für jedes Produkt die Verschlechterung der Gesamtkosten gegenüber der Betrachtung von 50 (bzw. 350) Perioden stets höchstens 0.55% beträgt.

Analog zum aktuellen Vorgehen im Unternehmen steht für jedes Produkt eine feste Lagerfläche (eben die sogenannten Kanäle) zur Verfügung. Wird auf diese Zuordnung verzichtet, so darf die Summe der benötigten Lagerflächen lediglich die Gesamtfläche nicht überschreiten. Diese beiden Änderungen führen zum Optimierungsmodell OPT-II. Seine optimale Lösung hat folgende strukturelle Unterschiede gegenüber der optimalen Lösung durch OPT-I:

- Viele Produkte schöpfen die bisher zugeteilte feste Lagerfläche zugunsten von anderen Produkten nicht aus.
- Deutlich weniger Lose haben die gleichen Produktionszeitpunkte – m.a.W. die Produktionszeitpunkte sind zeitlich versetzt.

Diese flexiblere Nutzung der Lagerfläche (durch OPT-II) bewirkt eine Reduktion der Gesamtkosten um weitere 26% (gegenüber OPT-I). Diese Kostenreduktion wird

durch andere Lose erreicht. Der komplette Lagerplatz wird weiterhin genutzt. Dürfen in OPT-II die Gesamtkosten von OPT-I maximal verwendet werden, so wird nur 73% der Gesamtfläche verbraucht. Es sei betont, dass für diese Lösung wie auch für die anderen keine Fehlmengen auftreten.

7. Zusammenfassung

Durch die substantiell zunehmende Variantenvielfalt bei den PKW-Herstellern und die dadurch noch viel stärker ansteigende Anzahl an zu lagernden Produkten bei den Zulieferern der Automobilindustrie reichen bei vielen Unternehmen die vorhandene Lagerkapazität nicht aus, um kostengünstige Lose zu produzieren. Oftmals, wie bei dem hier betrachteten Presswerk eines Automobilzulieferers, erfolgt die Losreduktion ohne Berücksichtigung der ökonomischen Implikationen. Konkret liegt eine mittlere Erhöhung der Gesamtkosten um 46.09% vor. Eine optimale Lösung ist bei dem hier betrachteten Presswerk innerhalb von Minuten durch ein kommerziell verfügbares Tool, wie ILOG, lösbar. Bei anderen Unternehmen dürften ähnliche Rechenzeiten ausreichen. Beim Presswerk können für die Testdaten dadurch die Gesamtkosten im Mittel um 34.57% reduziert werden. Ist die Lagerfläche beliebig nutzbar, so beträgt die mittlere Reduktion der Gesamtkosten sogar 43.31%. Der Einsatz von diesem Verfahren im realen Betrieb seit einigen Monaten bestätigt eine Kosteneinsparung in dieser Größenordnung; wie analysiert sind die Lose aufgrund einer notwendigen rollenden Planung nur nahezu kostenminimal. Damit belegt diese Arbeit, dass durch die Nutzung von Verfahren des Operations Research substantiell bessere Ergebnisse erzielt werden und sie häufig einen so geringeren Rechenzeitbedarf haben, dass sie auch unter industriellen Randbedingungen anwendbar sind.

Literatur

[Herr09] Herrmann, Frank: Logik der Produktionslogistik Oldenbourg Verlag, Regensburg, 2009.

[Herr11] Herrmann, Frank: Operative Planung in IT-Systemen für die Produktionsplanung und -steuerung, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.

[Herr18] Herrmann, Frank, Übungsbuch Losbildung und Fertigungssteuerung Aufgaben zur operativen Produktionsplanung und -steuerung, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2018.

[Hirs15] Hirschberg, Carsten; Variantenvielfalt; IPL Magazin; Ausgabe 30, Januar 2015; <https://ipl-mag.de/ipl-magazin-rubriken/scm-daten/390-variantenvielfalt>; Zugriff: 17.06.2019.

[KeLS10] Kenning, Peter; Lackes, Richard; Siepermann Markus: Electronic Data Interchange, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/electronic-data-interchange-edi-33656>, Zugriff: 29.05.19.

[Knol87] Knolmayer, Gerhard: The performance of lot sizing heuristics in the case of sparse demand patterns,

In: A. Kusiak (Hrsg.), Modern Production Management Systems (1987), S. 265-279. New York: North-Holland.

[LaSi18] Lackes, Richard; Siepermann, Markus; Definition MRP; <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/mrp-39273/version-262686>; Zugriff: 11.07.19

[Reit19] Reiter, Christian: Interne Berechnungen, 2019.

[Stadt00] Stadler, Hartmut: Improved rolling schedules for the dynamic single-level-lot-sizing problem. In: Management Science 46 (2000), S.318-326.

[Statistika19] Anzahl der Modellreihen im deutschen Pkw-Markt in den Jahren 1995 bis 2015 aus <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/224036/umfrage/pkw-modellreihen-in-deutschland/>, Zugriff: 23.04.2019.

[Temp08] Tempelmeier, Horst: Materiallogistik, Springer Verlag, 7. Auflage, Köln 2008.

[WaWi58] Wagner, H. M.; Whitin, T. M.: Dynamic version of the economic lot size model. In: Management Science 5, 1958, S. 89-96.

[Wemm81] Wemmerlöf, U.: The ubiquitous EOQ – its relation to discrete lot sizing heuristics. In: Journal of Operations & Production Management 1 (1981), S.161-179.

[Wemm82] Wemmerlöf, U.: A comparison of discrete single stage lot-sizing heuristics with special emphasis on rules based in the marginal cost principle. In: Engineering Costs and Production Economics 7 (1982), S.45-53.

Anhang

Die folgenden Tabellen enthalten Kennzahlen im Mittel, wegen den 15 Wiederholungen, zu den verwendeten Bedarfen und den (möglichen) Unterschieden in den Losen.

Bedarfe:

Legende	
min:	Minimaler Periodenbedarf im Mittel.
max:	Maximaler Periodenbedarf im Mittel.
μ :	Mittelwert der Periodenbedarfe im Mittel.
σ :	Standardabweichung der Periodenbedarfe im Mittel.

Komponente Innenteil Heckklappe			
Periodenbedarfe			
Min	Max	μ	Σ
0	563	67	76

Komponente Verstärkung links/rechts Kuppelprodukte			
Periodenbedarfe			
Min	max	μ	σ
0	272	84	68

Komponente Außenhaut Heck oben B			
Periodenbedarfe			
Min	max	μ	σ
0	822	515	207

Komponente Frontklappe innen/vorne/außen 3 Kuppelprodukte			
Periodenbedarfe			
Min	Max	μ	σ
0	3121	468	541

Komponente Außenhaut Heck oben/unten 2 Kuppelprodukte			
Periodenbedarfe			
min	Max	μ	σ
0	3656	366	767

Komponente Heckklappe innen			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	3656	366	767

Komponente Scharnier links/rechts 2 Kuppelprodukte			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	Σ
0	3656	366	767

Komponente Verstärkung Mitte			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	3656	366	767

Komponente Schließblech links/rechts 2 Kuppelprodukte			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	3656	366	767

Endprodukt Tür A vorne/hinten links/rechts 4 Kuppelprodukte			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	48	34	14

Endprodukt Verkleidung/ Stütze Heck 2 Kuppelprodukte			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	286	132	30

Endprodukt Tür innen links/rechts 2 Kuppelprodukte			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	5000	3155	1057

Endprodukt Verstärkung Tür			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	71	20	18

Komponente Scharnier links/rechts 2 Kuppelprodukte			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	4080	1763	861

Endprodukt Dach B			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	432	192	123

Endprodukt Dach A			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	691	175	128

Endprodukt Stütze quer			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
540	11610	2679	2339

Komponente Schließblech Mitte			
Periodenbedarfe			
min	max	μ	σ
0	3656	366	767

Reichweite der Lose:

Legende	
WW:	Wagner-Whitin-Verfahren.
SM:	Silver-Meal-Verfahren im Mittel.
Fest:	Bisherige feste Losgrößen im Mittel.
OM:	Optimierungsmodell im Mittel.
min:	Minimale Reichweite im Mittel.
max:	Maximale Reichweite im Mittel.
μ :	Mittelwert der Reichweiten im Mittel.
σ :	Standardabweichung der Reichweiten im Mittel.

Komponente Innenteil Heckklappe					
	Reichweite				
Verfahren	min	max	μ	σ	Anzahl Lose
WW	50	50	50	0	1
SM	18	32	25	7	2
Fest	2	17	13	6	4
OM	50	50	50	0	1

Komponente Heckklappe innen					
	Reichweite				
Verfahren	min	max	μ	σ	Anzahl Lose
WW	51	68	58	6	6
SM	13	42	21	8	17
Fest	1	28	9	4	41
OM	7	33	11	5	31

Komponente Verstärkung links/rechts 2 Kuppelprodukte					
	Reichweite				
Verfahren	min	max	μ	σ	Anzahl Lose
WW	24	26	25	1	2
SM	10	20	17	5	3
Fest	3	11	8	3	6
OM	24	26	25	1	2

Komponente Scharnier links/rechts 2 Kuppelprodukte					
	Reichweite				
Verfahren	min	max	μ	σ	Anzahl Lose
WW	10	35	19	6	18
SM	5	28	10	5	36
Fest	1	28	8	4	45
OM	10	35	19	6	18

Komponente Außenhaut Heck oben B					
	Reichweite				
Verfahren	min	max	μ	σ	Anzahl Lose
WW	5	11	7	2	7
SM	3	11	6	2	8
Fest	2	6	3	1	19
OM	4	8	6	1	9

Komponente Verstärkung Mitte					
	Reichweite				
Verfahren	min	max	μ	σ	Anzahl Lose
WW	21	42	29	6	12
SM	7	28	13	6	26
Fest	1	24	7	4	49
OM	7	33	12	5	30

Komponente Frontklappe innen/vorne/außen 3 Kuppelprodukte					
	Reichweite				
Verfahren	min	max	μ	σ	Anzahl Lose
WW	7	29	13	6	26
SM	4	18	9	3	38
Fest	2	26	7	5	51
OM	4	28	9	6	39

Komponente Schließblech links/rechts 2 Kuppelprodukte					
	Reichweite				
Verfahren	min	max	μ	σ	Anzahl Lose
WW	10	35	18	6	20
SM	5	23	9	4	37
Fest	4	33	13	6	26
OM	10	35	18	6	20

Komponente Außenhaut Heck oben/unten 2 Kuppelprodukte					
	Reichweite				
Verfahren	min	max	μ	σ	Anzahl Lose
WW	7	35	15	5	23
SM	4	23	8	4	42
Fest	1	28	6	4	56
OM	7	28	12	4	30

Endprodukt Tür A vorne/hinten links/rechts 4 Kuppelprodukte					
	Reichweite				
Verfahren	min	max	μ	σ	Anzahl Lose
WW	14	19	17	2	3
SM	3	18	13	6	4
Fest	15	19	17	2	3
OM	14	19	17	2	3

Endprodukt Verkleidung/ Stütze Heck 2 Kuppelprodukte					
Verfahren	Reichweite				Anzahl Lose
	min	max	μ	σ	
WW	25	25	25	0	2
SM	19	31	25	6	2
Fest	7	11	10	2	5
OM	10	10	10	0	5

Endprodukt Tür innen links/rechts 2 Kuppelprodukte					
Verfahren	Reichweite				Anzahl Lose
	min	max	μ	σ	
WW	2	4	3	1	18
SM	2	5	3	1	20
Fest	1	2	1	0	42
OM	1	3	1	1	36

Endprodukt Verstärkung Tür					
Verfahren	Reichweite				Anzahl Lose
	min	max	μ	σ	
WW	50	50	50	0	1
SM	17	33	25	8	2
Fest	11	24	17	5	3
OM	25	25	25	0	2

Komponente Scharnier links/rechts 2 Kuppelprodukte					
Verfahren	Reichweite				Anzahl Lose
	min	max	μ	σ	
WW	6	13	8	2	6
SM	6	8	7	1	7
Fest	1	5	2	1	25
OM	6	8	7	1	7

Endprodukt Dach B					
Verfahren	Reichweite				Anzahl Lose
	min	max	μ	σ	
WW	13	22	17	4	3
SM	9	14	13	2	4
Fest	2	8	4	2	12
OM	6	12	8	2	6

Endprodukt Dach A					
Verfahren	Reichweite				Anzahl Lose
	min	max	μ	σ	
WW	25	25	25	0	2
SM	1	18	13	7	4
Fest	1	8	4	2	12
OM	1	8	5	2	11

Endprodukt Stütze quer					
Verfahren	Reichweite				Anzahl Lose
	min	max	μ	σ	
WW	4	9	6	2	8
SM	2	7	5	1	10
Fest	1	4	2	1	21
OM	4	9	6	2	8

Komponente Schließblech Mitte					
Verfahren	Reichweite				Anzahl Lose
	min	max	μ	σ	
WW	51	68	58	6	6
SM	14	42	21	8	17
Fest	1	32	8	5	44
OM	51	68	58	6	6

Kosten der einzelnen Losbildungen:

Legende	
WW:	Wagner-Whitin-Verfahren.
SM:	Silver-Meal-Verfahren.
Fest:	Bisherige feste Losgrößen.
OM:	Optimierungsmodell.
Rüstkosten:	Gesamte Rüstkosten.
Lagerkosten:	Gesamte Lagerkosten.
Gesamtkosten:	Summe aus Rüst- und Lagerkosten.

Komponente Innenteil Heckklappe			
Verfahren	Kosten		
	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	296	283	579
SM	433	184	617
Fest	1234	100	1334
OM	296	283	579

Komponente Verstärkung links/rechts 2 Kuppelprodukte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	336	250	586
SM	504	173	677
Fest	1008	107	1116
OM	336	250	586

Komponente Außenhaut Heck oben B			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	2495	2697	5192
SM	2851	2364	5215
Fest	6772	1307	8079
OM	3208	2044	5252

Komponente Frontklappe innen/vorne/außen 3 Kuppelprodukte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	5186	4139	9325
SM	7579	2754	10333
Fest	10172	3230	13402
OM	7779	2848	10627

Komponente Außenhaut Heck oben/unten 2 Kuppelprodukte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	6251	4837	11087
SM	11414	1850	13264
Fest	15219	3452	18672
OM	8153	3320	11473

Komponente Heckklappe innen			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	3701	3685	7385
SM	10485	1340	11825
Fest	25287	641	25928
OM	19120	488	19608

Komponente Scharnier links/rechts 2 Kuppelprodukte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	1769	1281	3049
SM	3537	486	4023
Fest	4422	890	5312
OM	1769	1281	3049

Komponente Verstärkung Mitte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	3261	2243	5505
SM	7066	1044	8110
Fest	13317	889	14206
OM	8153	743	8896

Komponente Schließblech links/rechts 2 Kuppelprodukte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	1965	1302	3267
SM	3636	567	4203
Fest	2555	1804	4359
OM	1965	1302	3267

Endprodukt Tür A vorne/hinten links/rechts 4 Kuppelprodukte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	886	839	1724
SM	1181	814	1995
Fest	886	1045	1931
OM	886	839	1724

Endprodukt Verkleidung/ Stütze Heck 2 Kuppelprodukte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	1209	755	1964
SM	1209	800	2009
Fest	3022	372	3394
OM	3022	282	3304

Endprodukt Tür innen links/rechts 2 Kuppelprodukte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	3590	2444	6034
SM	3989	2151	6140
Fest	8377	1962	10339
OM	7180	1094	8274

Endprodukt Verstärkung Tür			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	713	417	1129
SM	1425	247	1672
Fest	2138	188	2326
OM	1425	176	1601

Komponente Scharnier links/rechts 2 Kuppelprodukte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	3701	2605	6306
SM	4317	2243	6560
Fest	15419	825	16244
OM	4317	2090	6407

Endprodukt Dach B			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	1583	1119	2702
SM	2111	736	2847
Fest	6334	361	6695
OM	3167	483	3650

Endprodukt Dach A			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	1056	1303	2359
SM	2111	920	3031
Fest	6334	319	6653
OM	5806	218	6024

Endprodukt Stütze quer			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	786	613	1399
SM	983	441	1423
Fest	2063	338	2401
OM	786	613	1399

Komponente Schließblech Mitte			
	Kosten		
Verfahren	Rüst-kosten	Lager-kosten	Gesamt-kosten
WW	590	614	1204
SM	1670	221	1891
Fest	4323	105	4428
OM	590	614	1204

Lagerbestände durch die einzelnen Losbildungen:

Legende	
WW:	Wagner-Whitin-Verfahren.
SM:	Silver-Meal-Verfahren.
Fest:	Bisherige feste Losgrößen.
OM:	Optimierungsmodell.
min:	Minimaler Lagerbestand pro Periode im Mittel.
max:	Maximaler Lagerbestand pro Periode im Mittel.
μ :	Mittelwert der Lagerbestände pro Periode im Mittel.
σ :	Standardabweichung der Lagerbestände pro Periode im Mittel.
Σ :	Summe aller Lagerbestände pro Periode im Mittel.

Komponente Innenteil Heckklappe					
	Lagerbestand pro Periode				
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	3248	1596	875	79776
SM	0	1958	770	468	38496
Fest	8	1130	550	349	27481
OM	0	3248	1596	875	79776

Komponente Verstärkung links/rechts 2 Kuppelprodukte					
	Lagerbestand pro Periode				
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	2136	911	596	45528
SM	0	1664	630	480	31512
Fest	16	760	390	226	19512
OM	0	2136	911	596	45528

Komponente Außenhaut Heck oben B					
	Lagerbestand pro Periode				
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	3520	1325	1076	66268
SM	0	3520	1162	1028	58084
Fest	1	1353	642	419	32119
OM	0	2952	1004	854	50224

Komponente Frontklappe innen/vorne/außen 3 Kuppelprodukte					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	7921	2124	1930	739180
SM	0	5208	1413	1344	491832
Fest	25	3240	1647	904	576715
OM	0	4328	1462	1156	508649

Komponente Schließblech links/rechts 2 Kuppelprodukte					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	7752	1958	1918	685343
SM	0	5080	853	1267	298580
Fest	26	5027	2713	1415	949444
OM	0	7752	1958	1918	685343

Komponente Außenhaut Heck oben/unten 2 Kuppelprodukte					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	5866	1607	1676	562386
SM	0	4836	615	1054	215096
Fest	1	3260	1147	698	401452
OM	0	3760	1103	1208	386026

Endprodukt Tür A vorne/hinten links/rechts 4 Kuppelprodukte					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	632	253	171	12632
SM	0	616	245	172	12264
Fest	5	605	315	167	15745
OM	0	632	253	171	12632

Komponente Heckklappe innen					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	21078	8773	6415	3070476
SM	0	13618	3191	3346	1116872
Fest	4	3300	1526	942	534060
OM	0	3165	1163	1149	407004

Endprodukt Verkleidung/ Stütze Heck 2 Kuppelprodukte					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	3120	1556	932	77805
SM	0	3835	1650	1076	82485
Fest	59	1439	766	401	38305
OM	0	1170	581	369	29055

Komponente Scharnier links/rechts 2 Kuppelprodukte					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	8320	2287	2226	800395
SM	0	5624	868	1375	303692
Fest	8	2897	1589	808	556135
OM	0	8320	2287	2226	800395

Endprodukt Tür innen links/rechts 2 Kuppelprodukte					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	7000	2559	2388	127936
SM	0	9120	2253	2500	112637
Fest	83	3600	2055	1018	102744
OM	0	4000	1145	1229	57268

Komponente Verstärkung Mitte					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	11848	3770	3272	1319630
SM	0	9424	1754	2270	614041
Fest	22	3500	1495	811	523130
OM	0	3448	1249	1164	437100

Endprodukt Verstärkung Tür					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	994	518	342	25881
SM	0	675	307	223	15354
Fest	12	387	234	97	11708
OM	0	538	218	144	10906

Komponente Scharnier links/rechts 2 Kuppelprodukte					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	19200	5789	4946	289440
SM	0	13840	4985	4014	249240
Fest	60	3580	1832	1034	91620
OM	0	11880	4644	3733	232200

Endprodukt Dach B					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	3564	1435	1010	71730
SM	0	2664	943	753	47160
Fest	43	869	463	245	23159
OM	0	1530	619	450	30942

Endprodukt Dach A					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	4188	1715	1223	85752
SM	0	3060	1210	791	60516
Fest	49	785	420	219	20994
OM	0	720	287	211	14352

Endprodukt Stütze quer					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	17100	6128	4894	306390
SM	0	14220	4408	4034	220420
Fest	22	8894	3376	2030	168798
OM	0	17100	6128	4894	306390

Komponente Schließblech Mitte					
Lagerbestand pro Periode					
Verfahren	min	max	μ	σ	Σ
WW	0	21078	8773	6415	3070476
SM	0	13618	3151	3298	1102754
Fest	0	3523	1499	841	524732
OM	0	21078	8773	6415	3070476