

Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen
Grades
Diplom-Ingenieur

Durchführung einer umfassenden Materialflusssimulation für die ITL-Lernfabrik mit der Software Plant Simulation

Bstieler André

Studienrichtung: Produktionstechnik

Technische Universität Graz

Fakultät Maschinenbau

Institut für Technische Logistik
Inffeldgasse 25E, 8010 Graz

Betreuer: Dipl.-Ing. Trummer Wolfgang
Beurteiler: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jodin Dirk

Graz, März 2014

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt an Herrn Dipl.-Ing. Trummer Wolfgang, der mich bei meiner Diplomarbeit unterstützt und sich immer Zeit für meine Fragen genommen hat.

Weiters möchte ich mich bei meinen Eltern, meiner Schwester mit Nichten, und bei meiner Großmutter bedanken, die mich während meiner Studienzeit unterstützt haben.

Ich möchte mich ebenfalls bei meiner Freundin und meinen Freunden und Kollegen bedanken, die immer für mich da waren.

Ich danke auch den Radiosendern Soundportal und Antenne Steiermark, die immer gute Musik gespielt haben, als ich eine Lernpause nötig hatte.

Großer Dank gilt der Firma Kremsmüller, bei der ich während den Semesterferien viel Erfahrung sammeln konnte und die beigetragen hat mein Studium zu finanzieren.

Zuletzt bedanke ich mich noch beim Österreichischen Staat, der es mir ermöglicht hat so eine tolle Ausbildung zu erlangen.

Kurzfassung

Die Diplomarbeit befasst sich mit der Aufgabenstellung „Durchführung einer umfassenden Materialflusssimulation für die ITL-Lernfabrik mit der Software Plant Simulation“. Die ITL-Lernfabrik ist am Institut für Technische Logistik entstanden und dient zu Illustrationszwecken. Bei dieser Fabrik handelt es sich um ein fiktives, realitätsnahes Motorenwerk, bei dem verschiedene Motorentypen gefertigt werden. Die Planungsdaten der Fabrik wurden mittels statischer Berechnung zur Auslegung notwendiger Ressourcenbedarfe ermittelt und müssen durch eine Materialflusssimulation validiert werden. Die Planungsdaten werden dabei in das Simulationsmodell übertragen, Simulationen durchgeführt und auf Richtigkeit überprüft. Nach der Entwicklung eines Simulationsmodells wurde der gesamte Fabrikprozess simuliert, die Ergebnisdaten ausgewertet und anschließend dokumentiert.

Im ersten Teil der Arbeit wird auf die Grundlagen und Herangehensweisen, die für eine erfolgreiche Simulation nötig sind, eingegangen. Dabei werden wichtige Begriffe definiert und erklärt. Folgend wird der prinzipielle Ablauf einer Materialflusssimulation erläutert und auf die logistischen Ziele eingegangen. Es wird die Rolle der Simulation und die darauffolgende Optimierung beschrieben. Als Grundlage diente dabei die zur Simulation in der Logistik relevante Literatur.

Aufbauend auf den Grundlagen erfolgt eine Ist-Analyse der vorhandenen Daten. Die Fabrik wird in Teilbereiche gegliedert und die für die Simulation relevanten Informationen werden zugeordnet. Die Ziele und Ergebnisse, welche die Simulation liefern soll, werden bestimmt.

Die Systemmodellierung der vorliegenden Lernfabrik in ein funktionstüchtiges Simulationsmodell wird erläutert und deren Ergebnisse werden dokumentiert.

Weiters erfolgt die Durchführung einer Simulationsexperimentreihe und die Ergebnisauswertung. Durch die Aufbereitung der Simulationsergebnisse werden die zur Optimierung der Kapazitätsauslastung relevanten Erkenntnisse aus dem Modell gewonnen und definierte Ansätze zur Optimierung spezifischer Auftragsdaten werden entwickelt und analysiert.

Abstract

The thesis deals with the task "material flow simulation of the ITL-learning factory with the software Plant Simulation". The ITL-Learning Factory was created at the Institute of Technical Logistics and used for illustrative purposes. This factory is a fictional, close to reality engine plant, which is building different types of engines. The planning data of the factory were determined by static calculation for necessary resources and will need to be validated by a material flow simulation. The planning data is transferred into the simulation model, simulations are being performed and the accuracy of the data analyzed. After the development of a simulation model, the entire factory process is simulated, the resulting data analyzed and then documented.

In the first part the basic principles and approaches, that are necessary for a successful simulation, are being defined. These important terms are defined and explained. Following this, the basic procedure of a material flow simulation is explained and the logistic goals are described. The need for the simulation and optimization is explained. This is based on the relevant literature for simulation used in logistics.

Based on these foundations, an analysis of the current state of the existing data is being carried out. In the process, the factory unit is subdivided into sections and the simulation-relevant information assigned. The aims and results that should be provided by this simulation are determined. The system modeling of the working simulation digital plant is described and the results documented.

Furthermore, the implementation of a simulation experiment series and evaluation is done. By processing the simulation results, the scientific findings relevant for the optimization of the production activity are generated from the model and defined preparations for the optimization of specific data of order are being developed and analyzed.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	9
2	Grundlagen.....	10
2.1	Einführung in die Fabriksimulation.....	10
2.2	Definitionen.....	10
2.2.1	Simulation.....	10
2.2.2	System.....	11
2.2.3	Modell.....	11
2.2.4	Simulationslauf	11
2.2.5	Experiment	11
2.2.6	Materialfluss.....	11
2.3	Ablauf und Nutzen einer Simulation.....	12
2.4	Logistische Zielgrößen	15
2.5	Rolle der Simulation	16
2.6	Rolle der Optimierung	17
2.7	Kapazitätsplanung.....	17
2.7.1	Ablauf und Terminplanung.....	18
2.7.1.1	Vorwärtsterminierung.....	18
2.7.1.2	Rückwärtsterminierung	19
2.8	Ereignisorientiertes Simulationsmodell.....	19
2.9	Simulationssoftware Tecnomatix Plant Simulation von Siemens.....	19
2.9.1	Plant Simulation Softwarefeatures	20
3	Problemanalyse.....	21
3.1	Ist-Analyse	21
3.1.1	Fabriklayout	22
3.1.1.1	Layout-Kürzel	24
3.1.1.2	Gliederung der Systembereiche	25
3.1.1.2.1	Mechanische Fertigung	25
3.1.1.2.2	Montage.....	27
3.1.1.3	Gesamtlayout	29
3.1.1.4	Materialfluss	30
3.1.1.5	Materialfluss im Wareneingang.....	30
3.1.1.6	Materialfluss der mechanischen Fertigung.....	30
3.1.1.7	Materialfluss der Montage	30
3.1.1.8	Materialfluss der Qualitätssicherung.....	30
3.1.1.9	Materialfluss im Warenausgang.....	30
3.1.1.10	Blockschaltbild	31
3.1.1.11	Transportmatrix.....	31
3.1.2	Produktdaten	33
3.1.2.1	Auftragskalender	33
3.1.2.2	Produkt und Produktvarianten.....	35
3.1.2.3	Stückliste.....	36
3.1.2.4	Arbeitsplan.....	37
3.2	Weitere Simulationsvorgaben	39
3.2.1	Erzeugung.....	39
3.2.2	Zielformulierung.....	39
3.2.3	Montage	39

4	Modellierung	40
4.1	Konzeptionelles Modell.....	40
4.1.1	Bestimmen der Systemgrenzen	41
4.1.1.1	Systemgrenze zur Umwelt.....	41
4.1.1.2	Interne Systemgrenzen.....	42
4.1.2	Ermittlung der Beziehungen des Systems zur Umwelt	43
4.1.3	Analyse der Systemeigenschaften auf Makroebene.....	43
4.1.4	Analyse der Systemelemente auf Mikroebene	44
4.1.5	Systembeziehungen auf Mikroebene	45
4.1.6	Modellauswertung	45
4.1.7	Datenschema des Modells	46
4.2	Implementierung des Modells	47
4.2.1	Standartklassen in Plant Simulation.....	47
4.2.1.1	Materialflussbausteine	47
4.2.1.2	Informationsflussbausteine	48
4.2.2	Bauteilerzeugung	54
4.2.2.1	Erzeugung der Lieferliste	54
4.2.2.1.1	Daten Auftragskalender.....	55
4.2.2.1.2	Berechnen der Lieferliste	56
4.2.2.2	Einzelteilerzeugung	58
4.2.2.3	Baugruppenerzeugung.....	58
4.2.3	Mechanische Fertigung	59
4.2.3.1	Umsetzung der Fertigungssimulation, am Beispiel mechanischen Fertigung ME01	59
4.2.3.2	Methoden der mechanischen Fertigung.....	61
4.2.4	Montage	63
4.2.4.1	Umsetzung der Montagesimulation.....	63
4.2.4.2	Methoden der Montage.....	63
4.2.5	Lagerhaltung	65
4.2.6	Überblick über das Simulationsmodell	66
4.2.7	Geschwindigkeitsoptimierung der Simulation.....	66
4.2.7.1	Profiler.....	67
4.2.7.2	Untersuchen des Speicherbedarfs	67
4.2.7.3	Reduzierung der beweglichen Elemente.....	67
4.2.7.4	Optimierung der Methodenprogrammierung	67
5	Durchführen der Simulationsläufe	69
5.1	Optimierungsziel	69
5.1.1	Stellgrößen	70
5.2	Experimentieren	71
5.2.1	Auswertemöglichkeiten	71
5.2.1.1	Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten	71
5.2.1.2	Produzierte Bauteile und Baugruppen	71
5.2.1.3	Auslastungsgrade	71
5.2.2	Simulationsversuchsplanung.....	72
5.2.3	Experiment Nummer 1	74
5.2.4	Experiment Nummer 2	75
5.2.5	Experiment Nummer 3	77
6	Zusammenfassung	80

7	Verzeichnisse.....	81
7.1	Literaturverzeichnis	81
7.2	Weitere Quellen	82
7.3	Abkürzungsverzeichnis	83
7.4	Abbildungsverzeichnis.....	84
7.5	Tabellenverzeichnis	87
8	Anhang	88
	Experiment Nummer 1 Ergebnisse	88

1 Aufgabenstellung

Am Institut für technische Logistik entsteht zu Illustrationszwecken eine Demo Fabrik eines Motorenwerkes (TUG Smart Factory). Sie soll die materialflusstechnischen Abläufe einer fiktiven, realitätsnahen Fabrik in Form von analytischen Modellen und Simulationsmodellen abbilden.

Im aktuellen Planungsstatus sind bereits detaillierte Produkt-, Prozess- und Anlagenbeschreibungen definiert, welche als Ausgangsbasis für die aktuelle Arbeit dienen.

Ziel der Arbeit ist die Durchführung definierter Teilaufgaben einer Simulationsstudie mittels Siemens PLM Plant Simulation. Die relevanten Eingangsdaten und die Simulationssoftware werden vom Institut für technische Logistik zur Verfügung gestellt.

Die Aufgabenstellung umfasst ein selbstständiges Einarbeiten in die Software Tecnomatix Plant Simulation, die Durchführung der Simulation, Ergebnisauswertung und anschließende Dokumentation der Ergebnisse.

2 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen, die für eine Materialflusssimulation nötig sind, behandelt. Dabei wird der prinzipielle Ablauf einer Simulation schrittweise erklärt und die Begriffe und Vorgehensweisen erläutert.

2.1 Einführung in die Fabriksimulation

Die Simulationstechnik ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Planung, Realisierung und dem Betrieb von komplexen Systemen.

Verschiedene Tendenzen in der Wirtschaft sind z.B.:

- Steigende Produktkomplexität
- Steigende Qualitätsanforderungen bei steigendem Kostendruck
- Steigende Anforderungen hinsichtlich Flexibilität
- Sinkende Produktlebensdauern
- Sinkende Losgrößen
- Steigender Konkurrenzdruck

Durch diese Tendenzen kommt es zu immer kürzer werdenden Planungszyklen und gleichzeitig zu immer komplexeren Systemen. Die Simulation wird dort verwendet, wo einfachere Methoden kein brauchbares Ergebnis liefern können (vgl. [BAN08], S.9).

Durch die Verwendung von Simulationssoftware können Änderungen im Produktsegment schon im Vorhinein simuliert werden und somit die Einflüsse auf das derzeitige System abgeschätzt werden. Bei komplexen Systemen können somit durch die Simulation von „was wäre wenn Szenarien“ Kosten eingespart werden und verschiedene Optimierungsvorschläge überprüft werden.

2.2 Definitionen

In diesem Abschnitt werden die Begriffe Simulation, System, Modell, Simulationslauf, Experiment und Materialfluss definiert.

2.2.1 Simulation

Beim Simulieren wird ein Modell erstellt das die Realität abbilden soll. Mit diesem Modell können Experimente durchgeführt werden um Erkenntnisse zu erlangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.

Nach VDI 3633 ist Simulation im weiteren Sinne das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell (vgl. [BAN08], S.10).

2.2.2 System

Ein System ist definiert als eine abgegrenzte Anordnung von Komponenten, die miteinander in Beziehung stehen. Die Systemgrenzen müssen im Vorhinein abgeklärt werden. Ein System kann somit eine gesamte Fabrik samt Zulieferfabriken oder nur ein Teilbereich dieser Fabrik sein (vgl. [BAN08], S. 10).

2.2.3 Modell

Unter einem Modell versteht man eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der Eigenschaften nur innerhalb eines vom Ziel abhängigen Toleranzrahmens vom Original (vgl. [BAN08], S.10).

2.2.4 Simulationslauf

Nach der VDI 3633 ist ein Simulationslauf eine Nachbildung des Verhaltens des Systems in einem ablauffähigen System über eine bestimmte Zeit hinweg. Die Nachbildung geschieht in einem Simulationsmodell. (vgl. [BAN08], S.10).

2.2.5 Experiment

Bei einem Experiment wird das Verhalten eines Modells durch systematische Parametervariation untersucht, die Ergebnisse werden analysiert und als Grundlage für weitere Experimente verwendet (vgl. [BAN08], S.10).

2.2.6 Materialfluss

Der Materialfluss ist die räumliche, zeitliche und organisatorische Verkettung aller Vorgänge die bei der Gewinnung, Bearbeitung und Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche stattfindet. Es ist zwischen einem externen Güterfluss und einem innerbetrieblichen Materialfluss (MF) zu unterscheiden.

Der Materialfluss umfasst alle Vorgänge in einem betrieblichen Objektfluss, die mit den Aufgaben der Beschaffung, der Produktion und der Distribution in Zusammenhang stehen. Seine Objekte sind Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, Halbfabrikate, Fertigprodukte und Werkzeuge. Der Materialfluss hat die Aufgabe, die Fertigungs- und Montageeinheiten zu verknüpfen sowie die Versorgung und Entsorgung zu gewährleisten (vgl. [HEI11], S. 22).

2.3 Ablauf und Nutzen einer Simulation

Nach VDI-Richtlinie 3633 ist zur Durchführung von Simulationsstudien folgendes Vorgehen zu empfehlen (Abb. 1) (vgl. [BAN08], S.10).

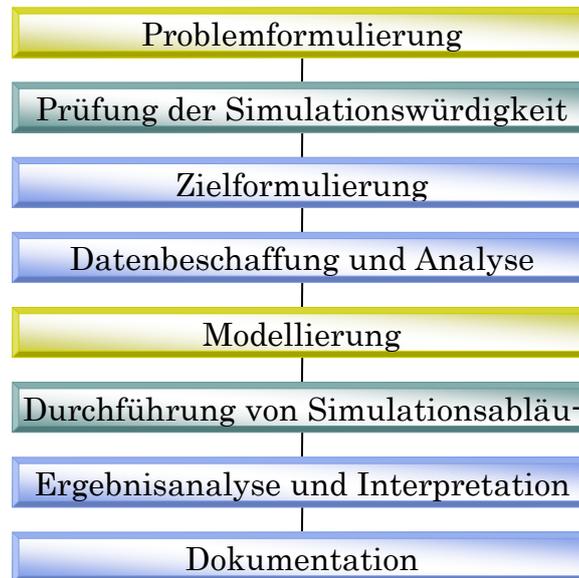


Abbildung 1: Ablauf einer Materialflussanalyse nach VDI 3633

Die einzelnen Stufen der Vorgehensweise werden folgend erklärt.

In der Problemformulierung werden die Anforderungen an die Simulation definiert. Dabei werden die Möglichkeiten der Simulationssoftware nicht in Betracht gezogen. Das Ergebnis der Problemformulierung sollte eine schriftliche Vereinbarung in Form eines Pflichtenheftes sein, in dem konkrete Problemstellungen definiert sind, die mithilfe der Simulation untersucht werden sollen. Beim Prüfen der Simulationswürdigkeit wird kontrolliert ob die Problemstellung überhaupt mit einer Simulationsstudie untersucht werden kann. Zur Einschätzung lassen sich die folgenden Gesichtspunkte heranziehen:

- Fehlen analytischer mathematischer Modelle
- Hohe Komplexität, viele zu berücksichtigende Einflüsse
- Datenunsicherheit
- Schrittweises Ausloten von Systemgrenzen
- Wiederholtes Verwenden des Simulationsmodells

In der darauffolgenden Zielformulierung werden Werte festgelegt die die Simulation liefern soll. Jedes Unternehmen folgt einem Gesamtziel (z.B. Rentabilität), welches in weitere kleinere Ziele zerlegt werden kann, die in Wechselwirkung zueinander stehen. Die Definition des Zieles ist ein wichtiger Vorbereitungsschritt.

Häufige Zielstellungen in der Wirtschaft sind z.B.:

- Durchlaufzeitminimierung
- Auslastungsmaximierung
- Bestandsminimierung
- Erhöhung der Termintreue

Alle definierten Zielgrößen müssen am Ende der Simulationsläufe statistisch erhoben und ausgewertet werden. Daraus ergibt sich der erforderliche Detaillierungsgrad für das Simulationsmodell wodurch der Umfang der Simulationsstudie und die Projektkosten bestimmt werden. Bei der Datenbeschaffung erfolgt eine Analyse der Ist-Daten, die sich wie folgt gliedern lassen:

- Technische Daten
- Organisationsdaten
- Systemdaten

Technische Daten	
Fabrikstrukturdaten	Layout Fertigungsmittel Transportfunktionen Verkehrswege Flächen Restriktionen
Fertigungsdaten	Nutzungszeit Leistungsdaten Kapazität
Materialflussdaten	Topologie Fördermittel Kapazitäten
Stördaten	funktionale Störungen Verfügbarkeiten
Organisationsdaten	
Arbeitszeitorganisation	Pausenregelung Schichtmodell
Ressourcenzuordnung	Werker Maschinen Fördermittel
Ablauforganisation	Strategien Restriktionen Störfallmanagement

Systemlastdaten	
Produktdaten	Arbeitspläne Stücklisten
Auftragsauslastung	Produktionsaufträge Transportaufträge Mengen Termine

Tabelle 1: Gliederung der für eine Simulation benötigten Daten (vgl. [BAN08], S.12).

Nach der erfolgreichen Datenbeschaffung kann mit der Modellierung begonnen werden. Die Phase der Modellierung beinhaltet den Aufbau und den Test des für die Untersuchung zu nutzenden Simulationsmodells. Die Modellierung erfolgt in zwei Stufen.

1. Ableitung eines symbolischen Modells aus einem gedanklichen Modell
2. Umsetzung dieses Modells in ein Softwaremodell

In der ersten Modellierungsstufe muss ein allgemeines Verständnis für das zu simulierende System erarbeitet werden. Ausgehend von den zu untersuchenden Zielstellungen muss man sich für einen Detailierungsgrad der Simulation entscheiden. Es müssen ausgehend von der notwendigen Genauigkeit der Simulation Entscheidungen getroffen werden, welche Aspekte vereinfacht oder gar nicht dargestellt werden sollen. Die erste Modellierungsstufe umfasst zwei Aktivitäten:

- Die Analyse (Aufgliederung) und
- Die Abstraktion (Verallgemeinerung)

Mithilfe der Systemanalyse wird die Komplexität der Originalsysteme entsprechend der Untersuchungsziele durch sinnvolle Zergliederung in seine Elemente aufgelöst. Durch Abstraktion werden die spezifischen Systemkennzeichen so weit vermindert, dass ein auf das Wesentliche beschränkte Abbild des Originalsystems entsteht. Es soll auf nicht relevante Einzelheiten verzichtet werden und unverzichtbare Einzelheiten sollen idealisiert werden.

In der zweiten Modellierungsstufe wird ein Simulationsmodell aufgebaut und getestet. Das Endergebnis der Modellierung ist in der Modelldokumentation zusammenzustellen, um später Änderungen am Simulationsmodell vornehmen zu können.

Nach der Erstellung eines Modells kann mit der Durchführung der Simulationsläufe begonnen werden. Die Simulationsläufe sind anhand eines aufzustellenden Versuchsplanes experimentell durchzuführen. Im Versuchsplan sind für die einzelnen Experimente Ausgangsdaten, Parameter des Modells und erwartete Ergebnisse bzw. Versuchsziele festzuhalten. Wichtig ist außerdem, aufgrund der Erkenntnisse aus den Testläufen, einen Zeitrahmen für die Simulationsexperimente abzustecken. Die Eingangs- und Ausgangsdaten sowie die zugrundelie-

gende Parametrierung des Simulationsmodells sind für jedes Experiment zu dokumentieren.

Aus den Simulationsergebnissen sollen die Maßnahmen abgeleitet werden, die das modellierte System verändern werden. Die richtige Interpretation der Simulationsergebnisse beeinflusst damit wesentlich den Erfolg einer Simulationsstudie.

Den Abschluss einer Simulationsstudie bildet ein Projektbericht. Dieser sollte einen Überblick über den zeitlichen Verlauf der Studie geben und die durchgeführten Arbeiten dokumentieren. Als Anhang zum Projektbericht sollte das Simulationsmodell in seinem Aufbau und seiner Funktionalität beschrieben werden. (vgl. [BAN08], S.10 ff.).

Im Punkt 3 „Zielformulierung“ werden die logistischen Zielgrößen bestimmt.

2.4 Logistische Zielgrößen

Ziel der Planung ist es, den anstehenden Aufträgen die vorhandenen Produktionsfaktoren (Betriebsmittel, Personal, Material, u. a.) so zuzuordnen, dass sie termingerecht fertiggestellt werden und dabei möglichst geringe Produktkosten entstehen. Die Planung bewegt sich hierbei in einem Spannungsfeld. Zu hohe Fertigungslosgrößen bedingen hohe Bestände und längere Durchlaufzeiten, was indirekt zu einer schlechteren Termintreue führt. Kleinere Losgrößen bedingen höhere Rüstaufwände und geringere Produktivität. Der grundlegende Zusammenhang der logistischen Größen ist in Abbildung 2 dargestellt.

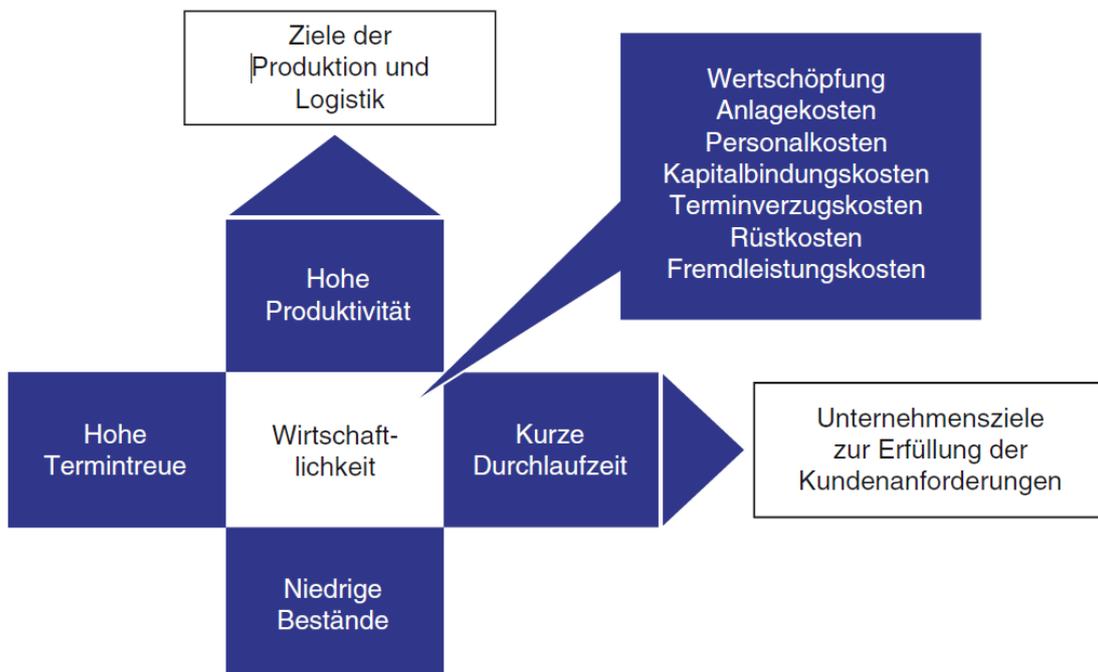


Abbildung 2: Zusammenhang der logistischen Zielgrößen ([MKR(+)]10], S. 9).

2.5 Rolle der Simulation

Eine Planungsunterstützung muss alle relevanten Einflussgrößen berücksichtigen sowie eine Gewichtung und Bewertung der Zielgrößen ermöglichen. Analytische Verfahren finden ihre Grenzen in einem solcherart komplexen Produktionsumfeld, wenn die Anzahl der Variablen und Gleichungen überhand nehmen. Eine bewährte Methodik zur Bewertung des dynamischen Verhaltens ist die Simulation. Sie ist die bevorzugte Methode, die es erlaubt dynamische Systeme schnell zu analysieren und die beste Lösung durch Variation der Einflussgrößen auf das Fertigungssystem zu ermitteln (vgl. [MKR(+)]10, S. 10).

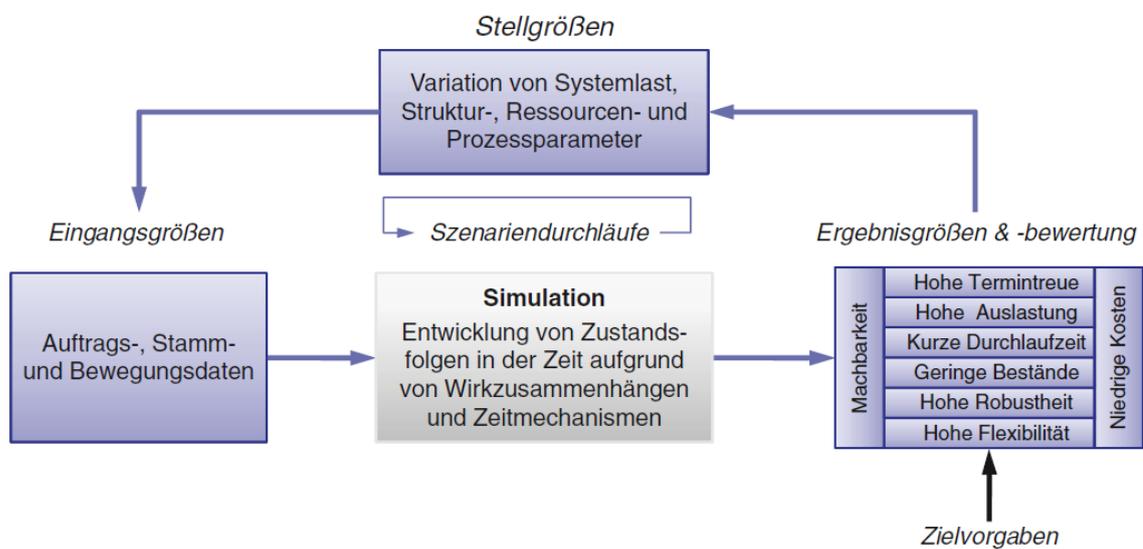


Abbildung 3: Ablauf einer Simulationsstudie ([MKR(+)]10, S. 11).

2.6 Rolle der Optimierung

Unter einem Optimum versteht man Parameter oder Eigenschaften, bei denen für einen Zielwert das beste Resultat bzw. für mehrere Ziele der beste Kompromiss erreicht wird. Die Suche nach dem Optimum unter gegebenen Voraus- und Zielsetzungen nennt man Optimierung. Da die logistischen Zielvorgaben, wie vorab aufgezeigt, oft antagonistischer Natur sind, sind die Zielerfüllungen der Einzelziele einander gegenüberzustellen und ggfs. zu gewichten. Die Auswahl einer Lösung stellt eine Entscheidung dar, die nur der Planer treffen kann (und kein System). Die Entscheidungsunterstützung durch Optimierung manifestiert sich durch das Aufzeigen von Kompromisslösungen. Dabei wird solange nach Alternativen gesucht, bis eine möglichst gute und ggf. die beste Lösung für ein Problem gefunden wird (vgl. [MKR(+)]10, S. 11).

2.7 Kapazitätsplanung

Bei der Kapazitätsplanung wird für die einzelnen Ressourcen die Kapazitätsbelastung dem Bedarf gegenübergestellt, Ziel ist es, eine möglichst vollständige Deckungsgleichheit zwischen Angebot und Nachfrage zu erreichen, dabei müssen nicht nur die Betriebsmittelkapazitäten sondern auch die Verfügbarkeit der Mitarbeiter in Form von Schichtmodellen, Feiertagen, Urlaub etc. berücksichtigt werden.

Jeder Kapazitätsabgleich muss auf die Einhaltung der Liefertermine kontrolliert werden. Es wird grundsätzlich zwischen der theoretischen Maximalkapazität und der unter normalen Bedingungen herrschenden Normalkapazität unterschieden. Kurzfristig kann die Normalkapazität auf die Maximalkapazität angehoben werden um z.B. dringende Aufträge abschließen zu können. (vgl. [KLU10], S. 382 fff)

Die Kapazitätsplanung erfolgt in zwei Schritten:

1. Kapazitätsterminierung ohne Belastungsausgleich
2. Kapazitätsabgleich

Die Rechnung ohne Belastungsausgleich weist Engpassstellen oder Belastungstäter aus, es liefert Anhaltspunkte wann und welche Maßnahmen des Kapazitätsabgleichs durchgeführt werden können.

Im zweiten Schritt folgt der Kapazitätsabgleich, indem Belastungsspitzen abgebaut und auf die Normalkapazität reduziert werden, die hierfür verwendeten Methoden werden in der folgenden Abbildung aufgelistet.

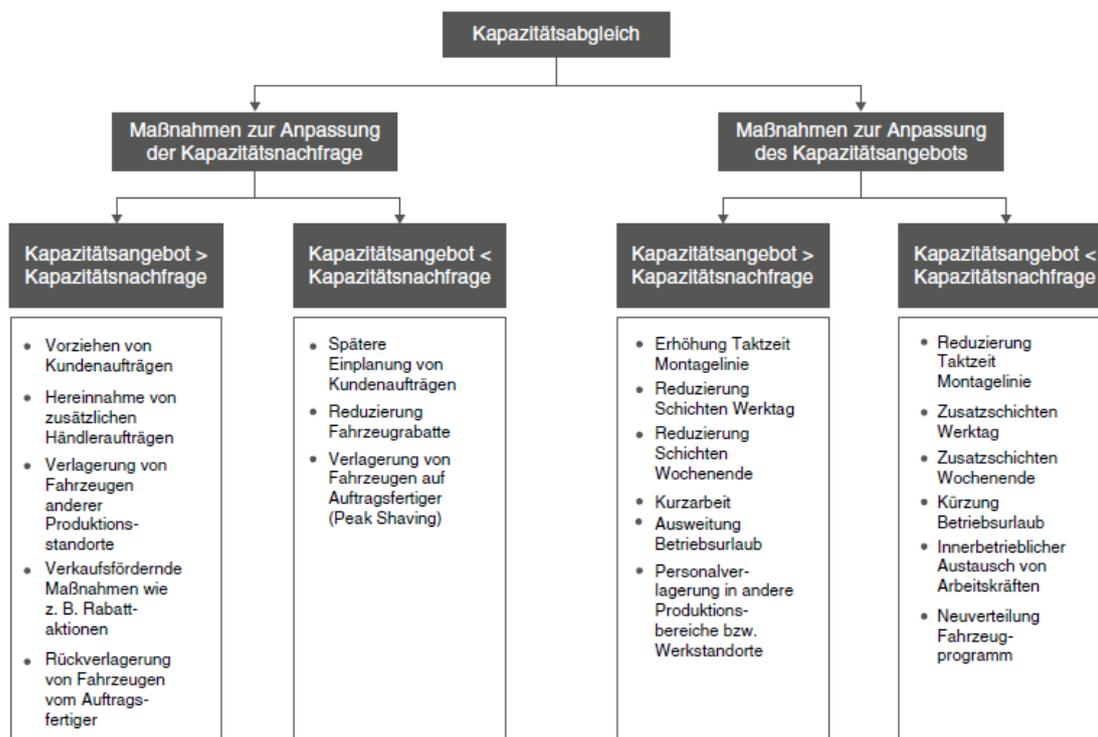


Abbildung 4: Methoden des Kapazitätsabgleichs ([KLU10], S. 384)

Handelt es sich um eine langfristige Kapazitätsüberbelastung bzw. Engpass so müssen durch Investitionen Fertigungskapazitäten kompensiert werden. (vgl. [HAC84], S.111 fff.)

2.7.1 Ablauf und Terminplanung

Eine wesentliche Voraussetzung für ein erfolgreiches Projekt ist die Einhaltung der Termine, insbesondere des Endtermins. Dazu müssen Meilensteintermine definiert und auch überwacht werden. Genauso wichtig ist es, den jeweils erreichten Stand, die Reife des Projekts und den bisher erarbeiteten „earned Value“ zu beurteilen. Dies ist nur zwischen eindeutigen Projektzwischenständen möglich, zu denen auch die Lösungsqualität definiert werden kann. Grundlage dafür sind die Verfahren für Termin- und Ablaufplanung (vgl. [FD00], S.79).

2.7.1.1 Vorwärtsterminierung

„Von einem Starttermin ausgehend werden die frühestmöglichen Zwischen- und Endtermine ermittelt“ ([FD00], S.79).

2.7.1.2 Rückwärtsterminierung

„Von einem vorgegebenen (Projekt-) Endtermin ausgehend werden spätest mögliche Zwischen- und Starttermine ermittelt

Bei der Rückwärtsterminierung wird vom Endtermin des letzten Vorgangs ausgehend über die dazwischen liegenden Vorgänge der Starttermin des ersten Vorganges ermittelt. Die Rückwärtsterminierung wird eingesetzt, wenn die Endtermine vorgegeben sind und diese als ein Ziel der Planung betrachtet werden müssen“ ([FD00], S.79).

2.8 Ereignisorientiertes Simulationsmodell

Im Bereich von Produktion und Logistik werden meist Anlagen (Fabriken, Baustellen, Lager, ...) oder Abläufe (Projekte, Prozesse, ...) mit Hilfe von Computermodellen simuliert, die das dynamische Verhalten des Systems unter Verwendung stochastischer Komponenten mit Zustandsänderungen an diskreten Zeitpunkten abbilden. Dabei werden fast ausschließlich Modelle eingesetzt, die ereignisorientiert sind, d. h. das Systemverhalten wird nachgebildet, in dem Zustandsänderungen beim Eintritt von Ereignissen beschrieben werden. Man spricht dabei von Discrete Event Simulation (DES). Typische Ereignisse in Produktions- und Logistiksystemen sind z. B. die Ankunft eines Auftrags an einer Maschine bzw. einem Bauplatz oder das Ende eines Prozessschrittes. (vgl. [MKR(+)]10, S. 14)

2.9 Simulationssoftware Tecnomatix Plant Simulation von Siemens

Plant Simulation von Tecnomatix ist ein diskretes Ereignissimulationswerkzeug, mit dem digitale Modelle logistischer Systeme (z.B. für die Produktion) erstellt werden können, damit werden die Eigenschaften des Systems untersucht und seine Leistung optimiert. Diese digitalen Modelle ermöglichen die Durchführung von Experimenten und „Was-wäre-wenn-Szenarien“, ohne vorhandene Produktionssysteme zu beeinträchtigen. Diese Modelle können auch bereits bei der Planung verwendet werden, also lange bevor die realen Produktionssysteme montiert werden. Umfangreiche Analysewerkzeuge zur Erkennung von Engpässen und zur Erstellung von Statistiken und Diagrammen ermöglichen die Auswertung unterschiedlicher Fertigungsszenarien. Die Ergebnisse liefern Daten, die für schnelle und zuverlässige Entscheidungen in der Frühphase der Produktionsplanung erforderlich sind. (Vgl. http://www.plm.automation.siemens.com/de_at/products/tecnomatix/plant_design/plant_simulation.shtml)

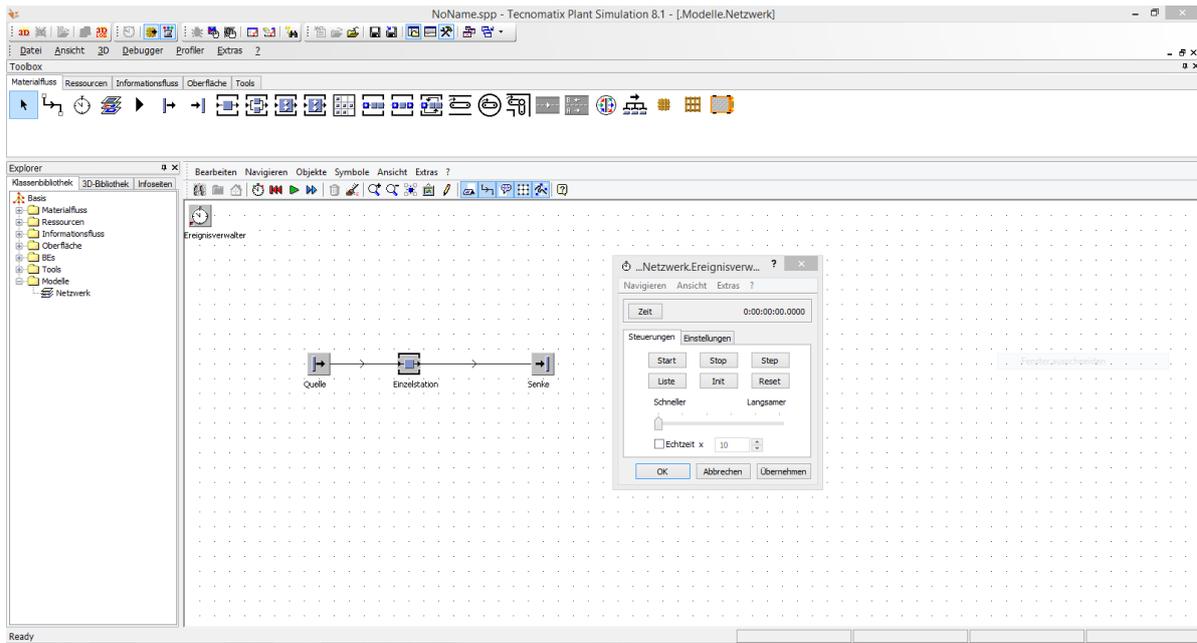


Abbildung 5: Plant Simulation 8.1

2.9.1 Plant Simulation Softwarefeatures

- Simulation komplexer Produktionssysteme und Steuerungsstrategien durch diskrete, ereignisorientierte Simulation
- Objektorientierte, hierarchische Fabrikmodelle, zur Abbildung von Geschäfts-, Logistik- und Produktionsprozessen
- Spezifische anwendungsbezogene Objektbibliotheken für rasche und effiziente Modellierung typischer Szenarien
- Graphen und Tabellen für die Analyse von Durchsatz, Ressourcenauslastung und Bottlenecks
- Umfassende Analysewerkzeuge, inklusive Automatic Bottleneck Analyzer, Sankey Diagramme und Gantt charts
- 3D-Online Visualisierung und Animation
- Genetische Algorithmen für automatisierte Optimierung von Systemparametern
- Offene Systemarchitektur unterstützt zahlreiche Schnittstellen und Integrationsmöglichkeiten (ActiveX, CAD, Oracle SQL, ODBC, XML, etc.)

[ITL14]

3 Problemanalyse

In diesem Kapitel werden die Ist-Daten Schritt für Schritt zerlegt, strukturiert und gegliedert, um einen besseren Überblick über die Bestandsdaten zu erhalten. Die Ist-Analyse wurde aufgrund der Vorgehensweise der Literatur Kühn, W. (2006) „Digitale Fabrik, Fabriksimulation für Produktionsplaner“ durchgeführt. Durch die Erstellung eines Lastenheftes und eines Pflichtenheftes wurde systematisch an die Problemlösung herangegangen. Diesem Schritt muss dabei viel Aufmerksamkeit geschenkt werden, da eine falsche Analyse im späteren Projektverlauf falsche Simulationsergebnisse zur Folge hat.

3.1 Ist-Analyse

„Simulation ist die Durchführung von Experimenten an einem Modell. Dabei ist das Modell eine abstrahierte Abbildung eines zu untersuchenden Systems, das entweder bereits existiert oder zukünftig entstehen soll. Abstraktion heißt bei der Modellierung, dass ein Modell die Struktur oder das Verhalten des Systems mit einem geringeren Detailierungsgrad beschrieben werden als beim „Original“-System. Simulation wird zur Leistungsbewertung eines Systems eingesetzt. Dabei geht man davon aus, dass die Schlüsse, die durch Leistungsmessungen am Modell gewonnen werden, auf das modellierte System übertragbar sind. Meistens wird durch die Simulation ein Entscheidungsprozess unterstützt, bei dem mehrere Systemvarianten analysiert werden, die sich in Struktur oder Verhalten unterscheiden. (VDI Richtlinie 3633 Blatt 1 2008)“ ([MKR(+)]10], S. 13).

Durch die Einhaltung der VDI Richtlinie 3633 besteht die erste Aufgabe in der Analyse der Eingangsdaten, die detailliert untersucht werden müssen. Für die gegenwärtige Erfassung der Ist-Daten wurde die vom Institut zur Verfügung gestellte Excel Datei, die alle Fabrik-Daten beinhaltet, herangezogen.

Die digitale Fabrik ist in mehrere Teilbereiche gegliedert. Diese werden ausgehend vom Groben zum Feinen in den nächsten Punkten detailliert beschrieben.

3.1.1 Fabriklayout

Das folgende Übersichtslayout gibt einen groben Überblick über die Motorenfabrik und dient zum besseren Verständnis des Gesamtsystems. Die Pfeile zwischen den Abteilungen deuten dabei den Materialfluss, der Fabrik an, auf den später genauer eingegangen wird. Grundsätzlich besteht die Fabrik aus dem Wareneingang, der mechanischen Fertigung, der Montage, der Qualitätssicherung und dem Wareneingang.

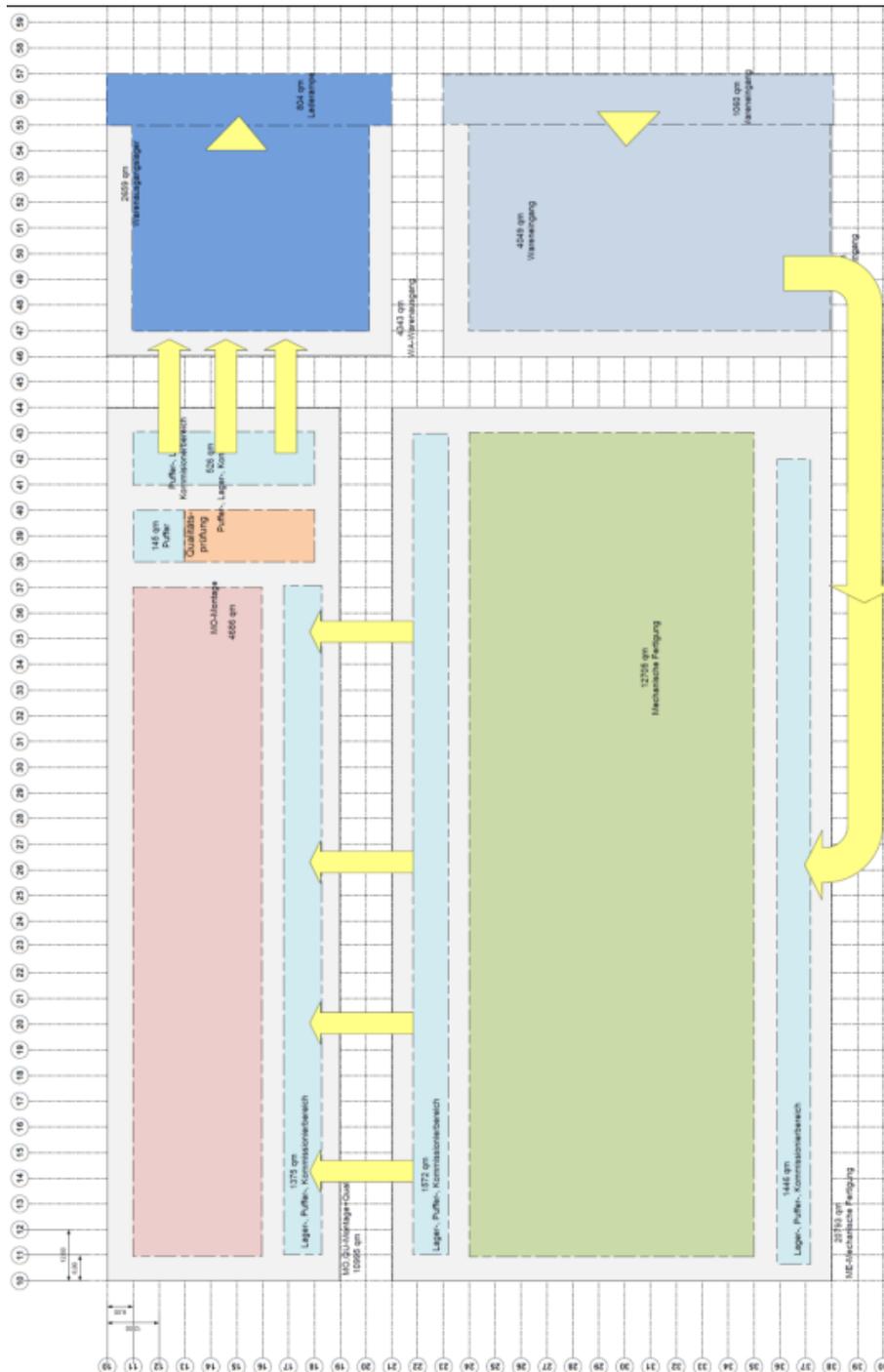


Abbildung 6: Fabriklayout [ITL]

Die verschiedenen Bereiche und deren Aufgaben und Funktionen im Gesamtsystem sind in der folgenden Tabelle beschrieben.

	Systembereich	Beschreibung/Funktion
1	Wareneingang	Warenübernahme, Kommissionierung, Lagerung, Verteilung und Weitergabe der Einzelteile
2	Mechanische Fertigung	Bearbeitung/Vorbereitung der Einzelteile
3	Montage	Zusammenbau der Einzelteile zu Baugruppen/Endprodukte
4	Qualitätssicherung	Bewertung und Kontrolle fertiger Produkte
5	Warenausgang	Lagern und auslagern der fertigen Produkte

Tabelle 2: Gliederung der Systembereiche

In den folgenden Layouts erkennt man die einzelnen Stufen der Detaillierungsgrade „Vom Groben zum Feinen“.

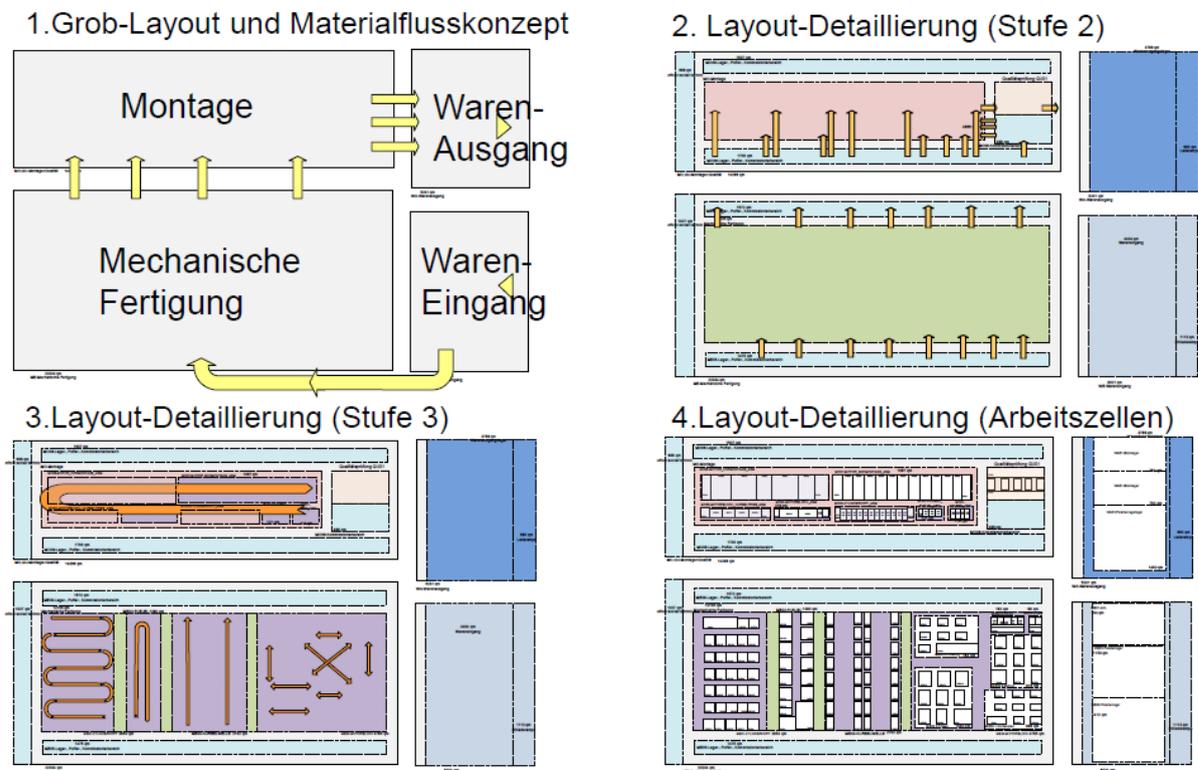


Abbildung 7: Layout Detaillierung [ITL]

3.1.1.1 Layout-Kürzel

Die jeweiligen Bereiche besitzen Kürzel, um die Layout Grafiken übersichtlicher zu gestalten. Folgend werden diese Kürzel erläutert.

- ME...Mechanische Fertigung
- MO...Montage
- QU...Qualitätssicherung
- LO...Lager

Die einzelnen Bereiche (Lager, Mechanische Fertigung, Montage und Qualitätssicherung) bestehen aus einem oder mehreren Teilbereichen, die wiederum aus Arbeitszellen, Lagern und Puffern bestehen.

Die Systembereiche mit Bezeichnungen (Kürzel) im Layout sind

- Wareneingang (Lager):
LO01-WE (Wareneingang)
- Mechanische Fertigung (parallele Fertigung):
ME01 (Zylinderkopf)
ME02 (Pleuel)
ME03 (Kurbelwelle)
ME04 (Motorblock)
LO03 (Lager, Puffer-, Kommissionierbereich)
LO04 (Lager, Puffer-, Kommissionierbereich)
- Montage (serielle/parallele Montage):
MO1 (Kolben)
MO2 (Kolben & Pleuel)
MO3 (Zylinderkopf)
MO4 (Motorblock)
MO5 (Motorblock-Kurbeltrieb)
MO6 (Motor-Vormontage)
MO7 (Motor-Endmontage)
LO5 (Lager, Puffer-, Kommissionierbereich)
LO6 (Lager, Puffer-, Kommissionierbereich)
LO7 (Lager, Puffer-, Kommissionierbereich)
- Qualitätssicherung:
QU01 (Qualitätsprüfung)
QU02 (Qualitätsprüfung)
- Warenausgang (Lager):
LO03-WA (Warenausgang)

3.1.1.2 Gliederung der Systembereiche

Die Systembereiche bestehen aus mehreren Arbeitsplätzen, in denen Maschinen oder manuelle Tätigkeiten ausgeführt werden. In den folgenden Grafiken werden die einzelnen Systembereiche mit ihren Arbeitsplätzen und deren Anzahl beschrieben.

3.1.1.2.1 Mechanische Fertigung

In der mechanischen Fertigung werden die Rohteile zu einbaufertigen Bauteilen weiterverarbeitet.

In der mechanischen Fertigung ME01 wird der Zylinderkopf gefertigt.

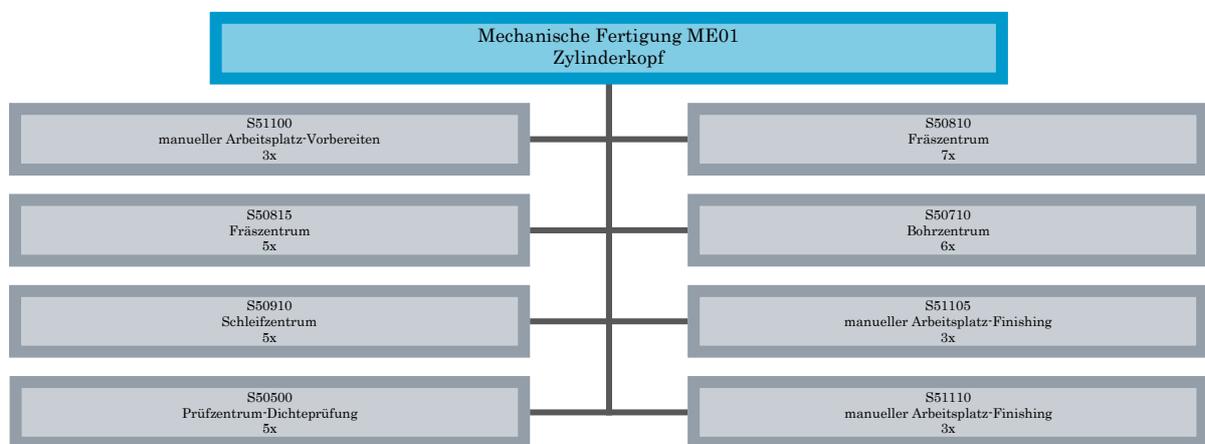


Abbildung 8: Anzahl Arbeitsplätze mechanische Fertigung ME01

In der mechanischen Fertigung ME02 wird die Pleuelstange hergestellt.

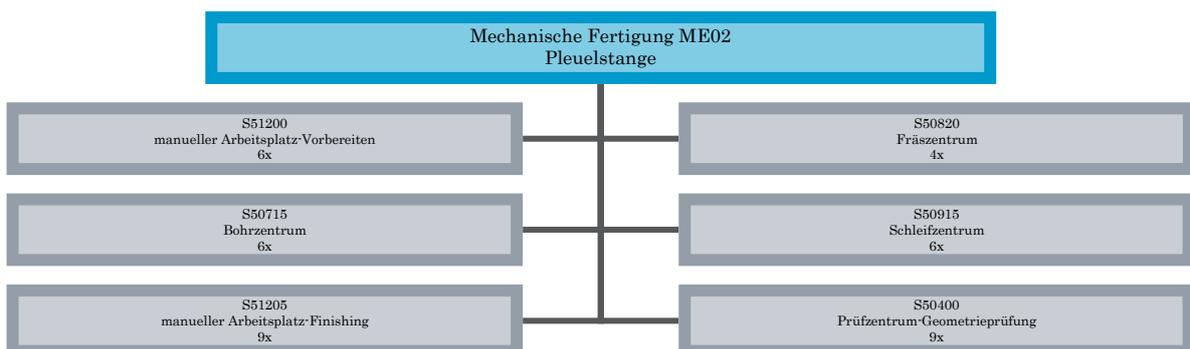


Abbildung 9: Anzahl Arbeitsplätze mechanische Fertigung ME02

In der mechanischen Fertigung ME03 wird die Kurbelwelle erzeugt.

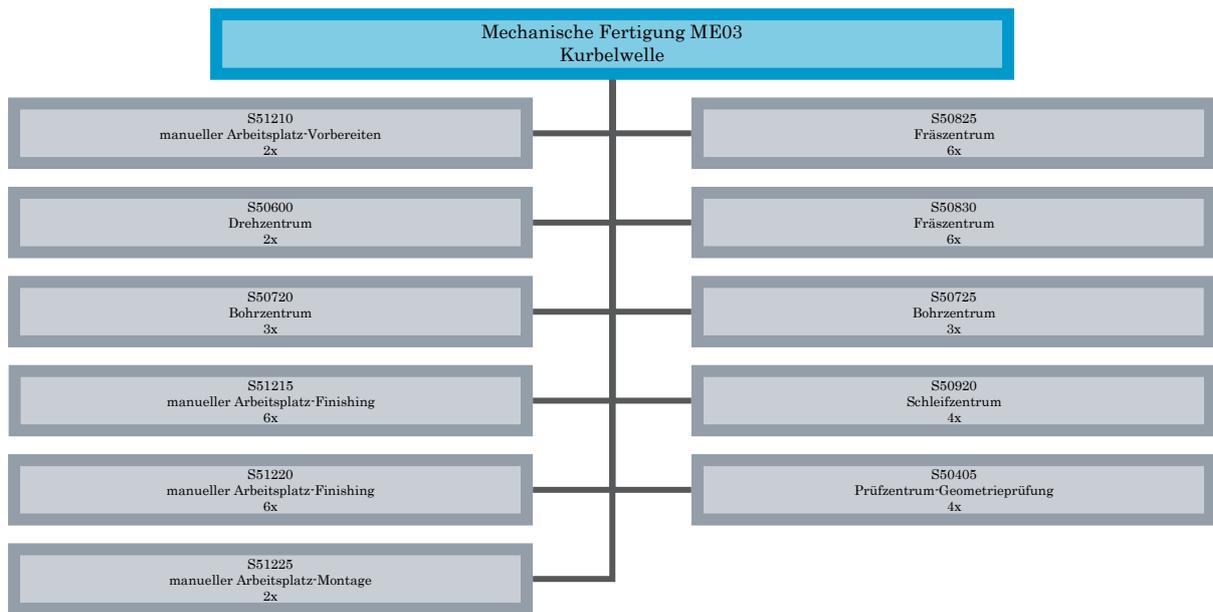


Abbildung 10: Anzahl Arbeitsplätze mechanische Fertigung ME03

In der mechanischen Fertigung ME04 erfolgt die Fertigung des Motorblocks.

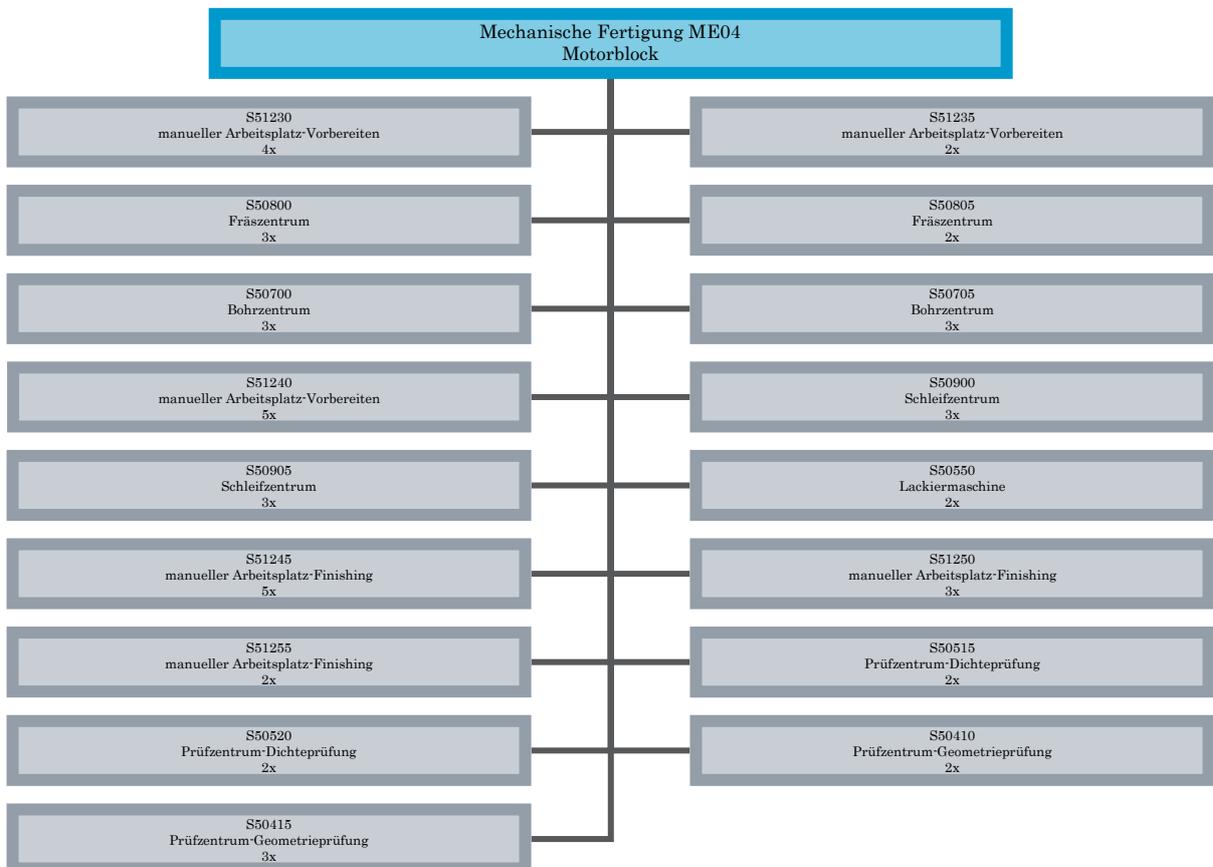


Abbildung 11: Anzahl Arbeitsplätze mechanische Fertigung ME04

3.1.1.2.2 Montage

Bei der Montage werden Baugruppen bis zum fertigen Motor zusammengebaut.

In der Montage MO01 werden beim Kolben die Kolbenringe eingesetzt.

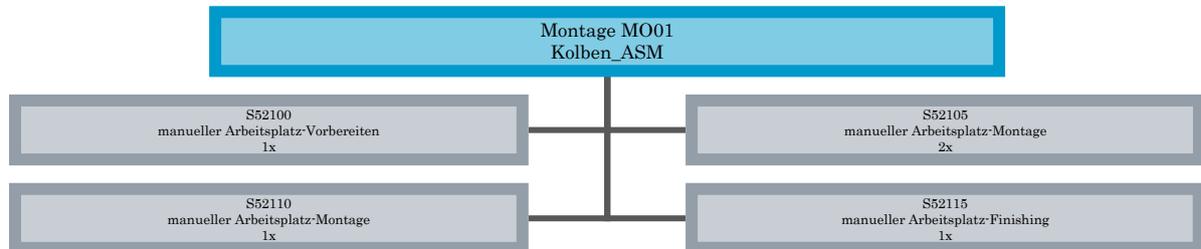


Abbildung 12: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO01

In der Montage MO02 erfolgt der Zusammenbau der Kolben mit dem Pleuel.

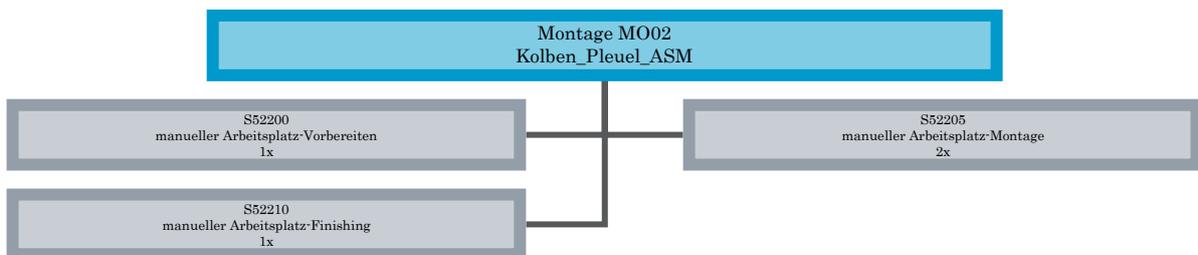


Abbildung 13: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO02

In der Montage MO03 werden die Ventile mit Nockenwelle in den Zylinderkopf eingebaut.

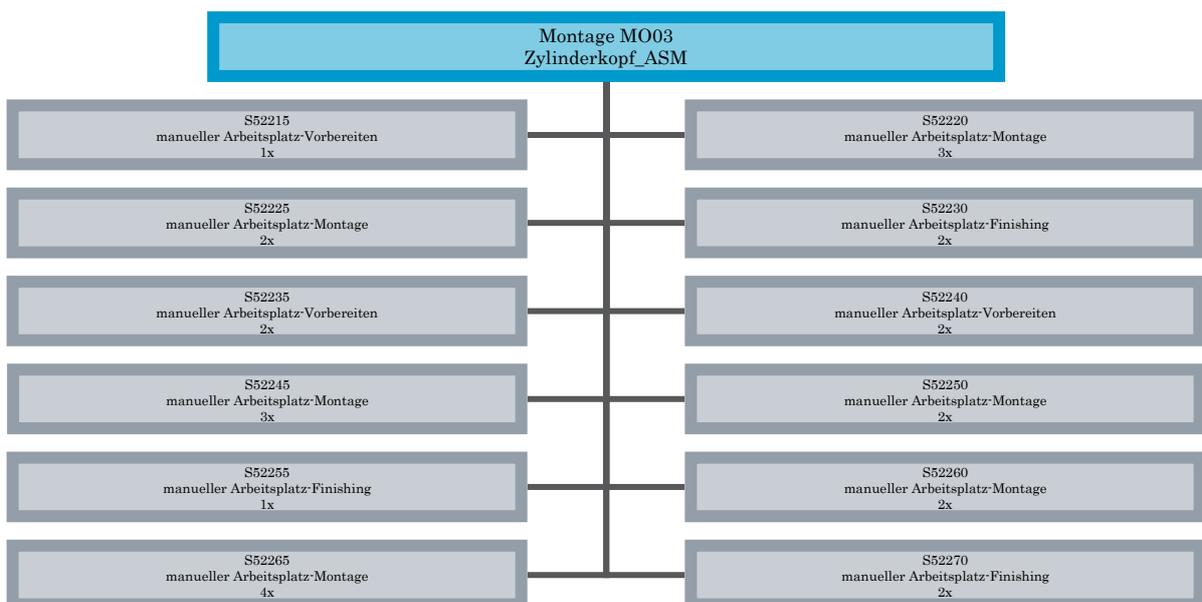


Abbildung 14: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO03

In der Montage MO04 wird die Kurbelwelle mit samt Lager in den Motorblock verbaut.

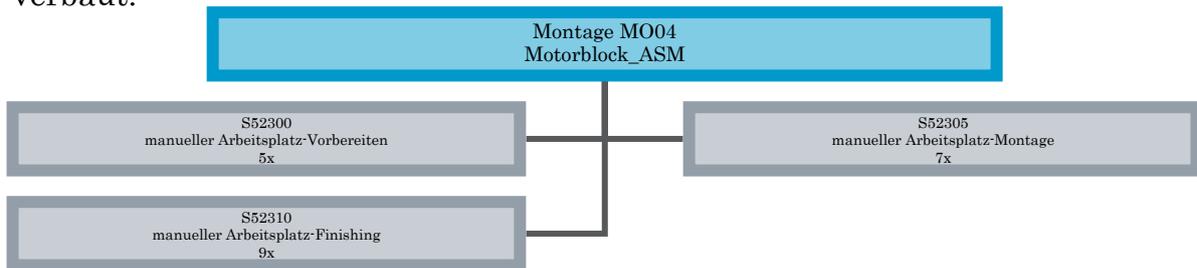


Abbildung 15: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO04

Bei der Montage MO05 werden die Kolben aus MO02 mit dem Motorblock aus MO04 zusammengesetzt.

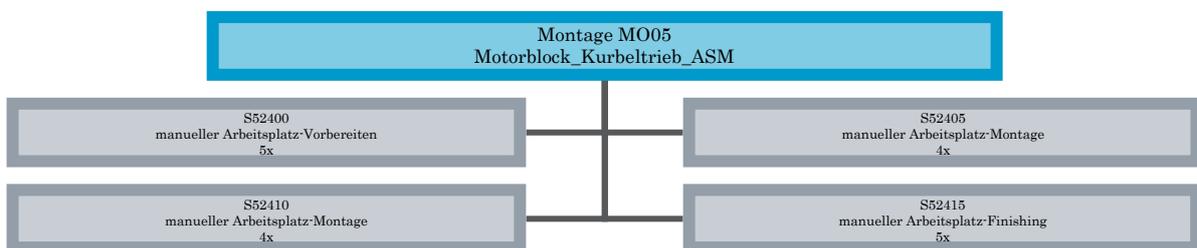


Abbildung 16: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO05

In der Montage MO06 erfolgt die Montage des Zylinderkopfs auf den Motorblock.

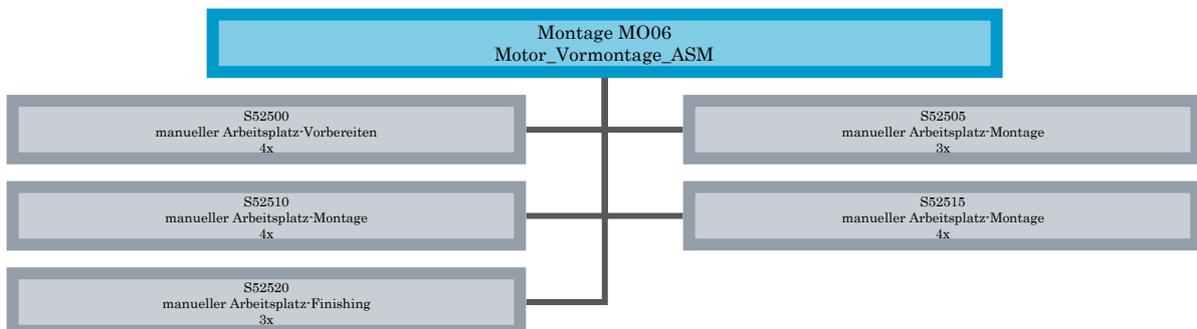


Abbildung 17: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO06

In der Montage MO07 erfolgt die Endmontage des Motors inklusive aller Zusatzaggregate.

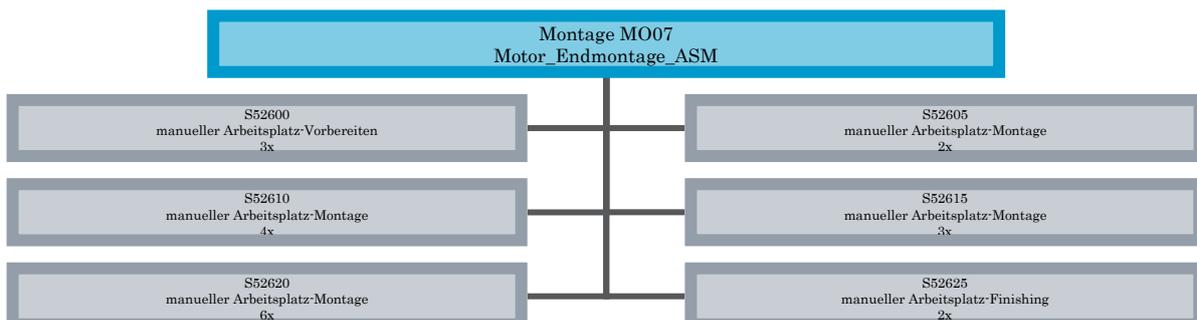


Abbildung 18: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO07

3.1.1.4 Materialfluss

Der Materialfluss des zu modellierenden Systems wird in einer kurzen Zusammenfassung in der folgenden Auflistung erklärt und anschließend durch eine Grafik ergänzt. Der Materialfluss innerhalb der Fabrik wird durch den Arbeitsplan bestimmt.

3.1.1.5 Materialfluss im Wareneingang

Der Wareneingang wird mit Fertigteilen und Halbzeugen von den Lieferanten beliefert. Diese Bauteile werden einlagelagert oder bei Bedarf direkt zur nächsten Arbeitsstation abtransportiert

3.1.1.6 Materialfluss der mechanischen Fertigung

Die mechanische Fertigung wird mit Halbzeugen vom Wareneingang beliefert. Die Halbzeuge (Rohteile) werden dort zu montagegerechten Einzelteilen weiterverarbeitet und gelangen anschließend zur Montage.

3.1.1.7 Materialfluss der Montage

Die Montage erhält die Baugruppenbestandteile direkt aus dem Wareneingang oder aus der mechanischen Fertigung. Die Baugruppen werden mittels Einzelteilen Stück für Stück aufgebaut d.h., an jedem Montageplatz werden, bis zum fertigen Produkt Einzelteile oder Baugruppen hinzugefügt. Nachdem alle Baugruppen für einen fertigen Motor die Montagestationen durchlaufen haben, werden die fertigen Motoren an die Qualitätssicherung weitergeleitet.

3.1.1.8 Materialfluss der Qualitätssicherung

Alle Motoren durchlaufen die Qualitätssicherung. Bei erfolgreicher Überprüfung gelangen sie in den Warenausgang.

3.1.1.9 Materialfluss im Warenausgang

Der Warenausgang erhält die fertigen und überprüften Motoren aus der Qualitätssicherung. Der Warenausgang dient zur Zwischenlagerung der Motoren bis zum Abtransport.

3.1.1.10 Blockschaltbild

Das folgende Blockschaltbild stellt eine übersichtliche Darstellung des Materialflusses dar. Der Materialfluss zwischen den einzelnen Bereichen wird mit Pfeilen dargestellt. Die Pfeilspitze gibt dabei die Richtung an.

Lager, mechanische Fertigung, Montage, Qualitätssicherung, Warenausgang

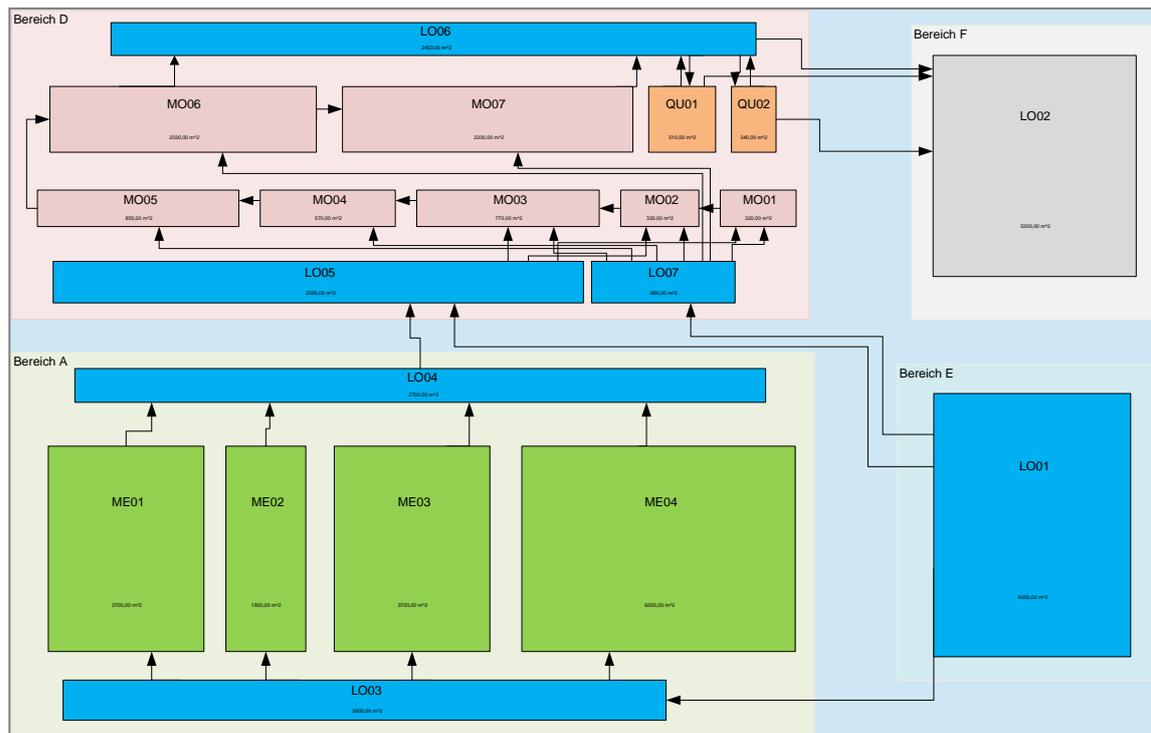


Abbildung 20: Blockschaltbild [ITL]

3.1.1.11 Transportmatrix

„Das Verkehrs- und Transportaufkommen in komplexen Systemen kann übersichtlich in Form einer Transportmatrix definiert werden. Diese Matrix zeigt deutlich, von wo nach wohin welcher Materialfluss stattfindet. Die Felder solch einer Matrix können das Transportaufkommen (Mengen, Fahrzeuge ...), die Transportstrecken oder die Transportzeiten für die jeweiligen Strecken enthalten“ ([KÜH06], S.321).

In der Transportmatrix wird verdeutlicht, wie groß die Materialflussintensität zwischen den einzelnen Bereichen ist. Die Felder der Transportmatrix zeigen das Transportaufkommen, also die Mengen, die zwischen den Bereichen transportiert werden.

In der Transportmatrix erkennt man die Verknüpfungen der einzelnen Module detaillierter. Die linke senkrechte Spalte beschreibt von wo die Teile angeliefert werden und die Oberste waagrechte Zeile beschreibt wohin die Lieferung erfolgt. Die Zahlenwerte in der Tabelle geben Auskunft über die zu Transportierende Menge an Bauteilen. In der folgenden Transportmatrix wird das Transportaufkommen der digitalen Fabrik verdeutlicht.

Von \ nach	WE	ME1	ME2	ME3	ME4	MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	MO7	WA
WE		58100	155200	403400	37800	612000	117200	2010200	174800	22800		322700	
ME1								58100					
ME2				85200			70000						
ME3									37800	134000			
ME4									37800				
MO1				134000			70000						
MO2										70000			
MO3											58100		
MO4										37800			
MO5											37800		
MO6												37800	
MO7													37800
WA													

Tabelle 3: Transportmatrix ITL Demofabrik [ITL]

3.1.2 Produktdaten

Die vom Institut zur Verfügung gestellte Excel Datei, die alle Produktdaten enthält, wird in diesem Punkt gegliedert und auf die Materialfluss-Simulation relevanten Daten reduziert. Die wichtigsten Eingangsdaten sind der Auftragskalender, die Stückliste und der Arbeitsplan.

3.1.2.1 Auftragskalender

Im Auftragskalender sind Informationen über die jeweiligen Aufträge und deren Umfang gespeichert. Die Aufträge sind nach Kalenderwochen (KW) aufgelistet. Die unterschiedlichen Farben geben den Zeitraum an in dem dieser Motortyp den Warenausgang verlassen soll. Der Tabellenwert gibt Auskunft über die Motorenstückzahlen.

Auftrag	A2011001- R4_1400	A2011002- R4_1600	A2011003- R4_2000	A2011004- V6_3000	A2011005- V6_3400	A2011006- V6_3600	A2011007- V8_4400	A2011008- V8_4700	A2011009- V8_5000
KW1	300			240			150		
KW2	300			240			150		
KW3	300			240			150		
KW4	300			240			150		
KW5	300			240			150		
KW6	300			240			150		
KW7	300			240			150		
KW8	300			240			150		
KW9	300			240			150		
KW10	300			240			150		
KW11	300			240			150		
KW12	300			240			150		
KW13	300			240			150		
KW14	300			240			150		
KW15	300			240			150		
KW16	300			240			150		
KW17	300			240				125	
KW18	300			240				125	
KW19	300			240				125	
KW20	300			140				125	
KW21		900			250			125	
KW22		900			250			125	
KW23		900			250			125	
KW24		900			250			125	
KW25		900			250			125	
KW26		900			250			125	
KW27		400	200		250			125	
KW28			200		250	150		125	
KW29			200		250	150		100	
KW30			200		250	150		100	
KW31			200		250	150		100	
KW32			200		250	150		100	
KW33			200		250	200			120
KW34			200		250	200			120
KW35			200		250	200			120
KW36			200		250	200			120
KW37			200		250	200			160
KW38			200		250	200			160
KW39			200		250	200			160
KW40			200		150	200			160
KW41			200			210			160
KW42			200			210			160
KW43			200			210			160
KW44			200			210			160
KW45			200			230			40
KW46			200			250			
KW47			400			130			
KW48			400			200			
KW49			400			200			
KW50			400			200			
KW51			370			200			

Tabelle 4: Auftragskalender

Wie im Auftragskalender ersichtlich werden pro Kalenderwoche 2-4 verschiedene Motorentypen gefertigt.

An den folgenden Feiertagen erfolgt keine Produktion von Motoren.

ID_	Datum	Feiertag
1	01.01.2013	Neujahrstag (Tue 01.01.2013)
2	06.01.2013	Dreikönigstag (Sun 06.01.2013)
3	01.04.2013	Ostermontag (Mon 01.04.2013)
4	01.05.2013	Staatsfeiertag (Wed 01.05.2013)
5	09.05.2013	Christi Himmelfahrtstag (Thu 09.05.2013)
6	20.05.2013	Pfingstmontag (Mon 20.05.2013)
7	30.05.2013	Fronleichnamstag (Thu 30.05.2013)
8	15.08.2013	Maria Himmelfahrtstag (Thu 15.08.2013)
9	26.10.2013	Nationalfeiertag (Sat 26.10.2013)
10	01.11.2013	Allerheiligen (Fri 01.11.2013)
11	08.12.2013	Maria Empfängnis (Sun 08.12.2013)
12	25.12.2013	1. Weihnachtsfeiertag (Wed 25.12.2013)
13	26.12.2013	2. Weihnachtsfeiertag (Thu 26.12.2013)

Tabelle 5: Feiertage

3.1.2.2 Produkt und Produktvarianten

Je nach Motorenart bestehen die Motoren aus einer verschiedenen Anzahl von Einzelteilen. Die verschiedenen Motorentypen unterscheiden sich hauptsächlich in der Hubraumgröße und besitzen abhängig vom Motorentyp ähnliche Bauteile wie z.B. die Servopumpe. In den folgenden Grafiken ist der prinzipielle Aufbau der Motoren ersichtlich.

- Produkt-Varianten
- Montage- und Mengen-Stücklisten

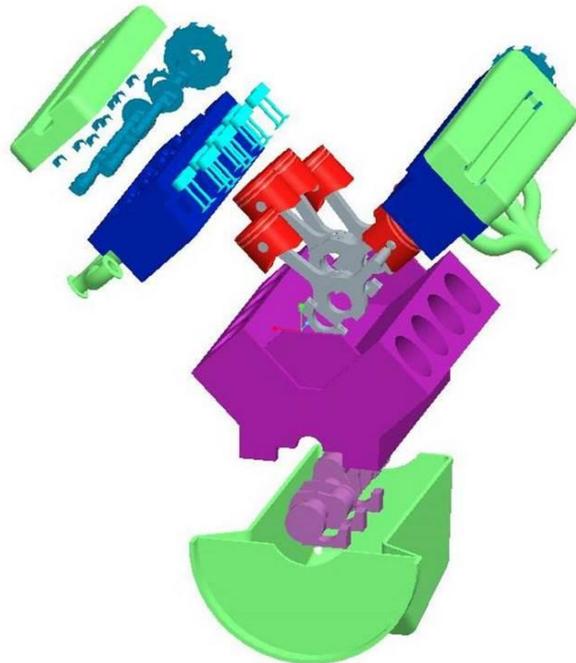


Abbildung 21: Aufbau eines 8 Zylinder Motors

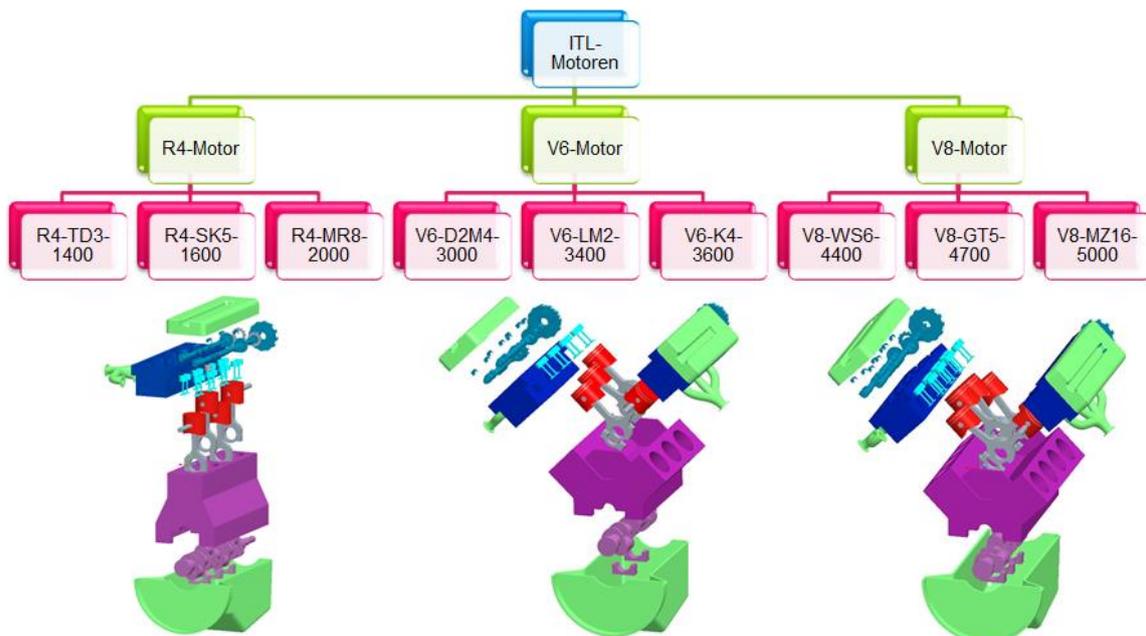


Abbildung 22: Produktreihe Motoren R4-V6-V8

3.1.2.3 Stückliste

In der Stückliste sind alle Informationen zu den Einzelteilen und Baugruppen hinterlegt. Wichtige Informationen aus der Stückliste sind die Fertigungsstufe, Materialnummer, Komponente, Menge, Menge kumuliert, Beschaffung, Art und die Arbeitsplannummer.

ID	STUFE	MATERIALNUMMER	KOMPONENTE	MENGE	MENGE_KUM	BESCHAFFUNG	BESCHAFFUNGSART	ART	ARBEITSPLANNUMMER	
1	0	401112	R4_MOTOR	1	1	E		20	BG	41112
2	1	401457	MOTOR_VORMONTAGE_ASM	1	1	E		20	BG	41457
3	2	401135	MOTORBLOCK_KURBELTRIEB_ASM	1	1	E		20	BG	41135
4	3	401128	MOTORBLOCK_ASM	1	1	E		20	BG	41128
5	4	401342	MOTORBLOCK	1	1	E		20	ET	41342
6	5	401343	MOTORBLOCK_ROH	1	1	F		10	ET	
7	4	401096	KURBELWELLE	1	1	E		20	ET	41096
8	5	401097	KURBELWELLE_ROH	1	1	F		10	ET	
9	4	401101	KURBELWELLEN_HAUPTLAGER_SCHALE	5	5	F		10	ET	
10	3	401980	KOLBEN_PLEUEL_ASM	4	4	E		20	BG	41980
11	4	401864	PLEUEL_STANGE	1	4	E		20	ET	41864
12	5	401864	PLEUEL_STANGE_ROH	1	4	F		10	ET	
13	4	401778	KOLBEN_ASM	1	4	E		20	BG	41778
14	5	401468	KOLBEN	1	4	F		10	ET	
15	5	401936	KOLBENRING_OBEN	1	4	F		10	ET	
16	5	401940	KOLBENRING_UNTEN	1	4	F		10	ET	

Tabelle 6: Stückliste

- Stufe: In der Stufe ist hinterlegt wie viele Systembereiche ein Bauteil bis zum fertigen Motor durchläuft. Stufe 0 bedeutet fertiger Motor, Stufe 5 Rohteil. Nach jedem Systembereich wird die Stufe um eins erniedrigt.
- Materialnummer: Jedes Bauteil hat eine einzigartige 6 stellige Materialnummer. Die ersten 3 Zahlen beschreiben zu welchem Motortyp das Bauteil gehört und die folgenden 3 Zahlen die Bauteilnummer des Motortyps. Materialnummer 401... (z.B. R4 Motor mit 1600ccm).
- Komponente: Der Name des Bauteils.
- Menge: Die Menge gibt an, wie oft dieses Bauteil für die nächste Fertigungsstufe benötigt werden.
- Menge_Kum: Ist die kumulierte Menge und gibt die Anzahl dieses Bauteiles an, die für einen fertigen Motor benötigt werden.
- Beschaffung: Die Beschaffungsart kann entweder eine Eigenfertigung (E) sein oder eine Fremdfertigung (F).
- Art: Die Art ist eine Information ob es sich bei diesem Bauteil um eine Baugruppe oder ein Einzelteil handelt.
- Arbeitsplannummer: Die Arbeitsplannummer ist ein Verweis auf die Nummer, die dieses Bauteil im Arbeitsplan besitzt.

3.1.2.4 Arbeitsplan

Der Arbeitsplan enthält sämtliche Informationen der Bearbeitungsschritte aller Komponenten. Durch den Arbeitsplan ist der Materialfluss innerhalb der Fabrik definiert, indem von jedem Arbeitsschritt die folgende Arbeitsstation hinterlegt ist.

Es wird beschrieben:

- auf welchem Arbeitsplatz das Bauteil bearbeitet wird
- auf welcher Arbeitsstation das Bauteil als nächstes bearbeitet wird
- und wie lange die erforderlichen Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten sind.

ID	ARBEITS-PLAN-NUMMER	MATERIAL-NUMMER	KOMPO-NENTE	VOR-GANG	BESCHREIBUNG	ARBEITS-PLATZ_NUMMER	BEARBEITUNGSZEIT	EIN-HEIT_BEARBEITUNGSZEIT	RUEST-ZEIT	EINH_RUESTZEIT
1	41096	401096	KURBEL-WELLE	10	Vorbereiten der Rohteile	S51210		8 MIN/STCK		30 MIN/LOS
2	41096	401096	KURBEL-WELLE	20	Ablaengen der Rohteile, zentrierbohren	S50825		8 MIN/STCK		30 MIN/LOS
3	41096	401096	KURBEL-WELLE	30	Drehen der Flansches und der Hauptlager-Sitze	S50600		8 MIN/STCK		45 MIN/LOS
4	41096	401096	KURBEL-WELLE	40	Fraesen der Hauptlager (ohne Halteträger)	S50830		10 MIN/STCK		30 MIN/LOS
5	41096	401096	KURBEL-WELLE	50	Fraesen des Pleuel-Lagers, Fraesen des Flansches	S50830		8 MIN/STCK		30 MIN/LOS
6	41096	401096	KURBEL-WELLE	60	Bohren der Ölbohrung Hauptlager (Querloch)	S50720		10 MIN/STCK		40 MIN/LOS
7	41096	401096	KURBEL-WELLE	70	Bohren der Ölbohrung Pleuellager (Senkrechtbohrung)	S50920		12 MIN/STCK		30 MIN/LOS
8	41096	401096	KURBEL-WELLE	80	Gegenseite der Ölbohrung, manuelles Entgraten	S51215		10 MIN/STCK		30 MIN/LOS

Tabelle 7: Arbeitsplan (Ausschnitt Kurbelwelle, Excel)

- **Arbeitsplannummer:** Jedes Bauteil oder Baugruppe, die bearbeitet wird besitzt einen Arbeitsplan. Die Arbeitsplannummer dient ebenfalls als Verweis zwischen Stückliste und Arbeitsplan.
- **Materialnummer:** Jedes Bauteil hat eine einzigartige 6 stellige Materialnummer. Die ersten 3 Zahlen beschreiben zu welchem Motor Typ das Bauteil gehört und die folgenden 3 Zahlen die Bauteilnummer des Motortyps.
- **Komponente:** Der Name des Bauteils.
- **Vorgang:** Der Vorgang beschreibt die Bearbeitungsschritte. Der erste Vorgang startet bei 10. Bei jedem folgenden Bearbeitungsschritt wird der Vorgang um 10 erhöht.
- **Beschreibung:** Die Beschreibung liefert Information über den Vorgang, zum Beispiel welche Arbeitsschritte bei diesem Vorgang ausgeführt werden.

- Arbeitsplatz Nummer: Jeder Arbeitsplatz besitzt eine eindeutige Arbeitsplatznummer, der Arbeitsplan enthält durch die Arbeitsplatznummer die Information wo dieser Bearbeitungsschritt ausgeführt werden soll.
- Bearbeitungszeit: Die Bearbeitungszeit stellt den Zeitaufwand für die Bearbeitung dar.
- Rüstzeit: Die Rüstzeit ist der Zeitaufwand, der benötigt wird, um eine Maschine auf diese Komponente umzurüsten.

Die folgende Abbildung zeigt z.B. einen Arbeitsplan einer Kurbelwelle.

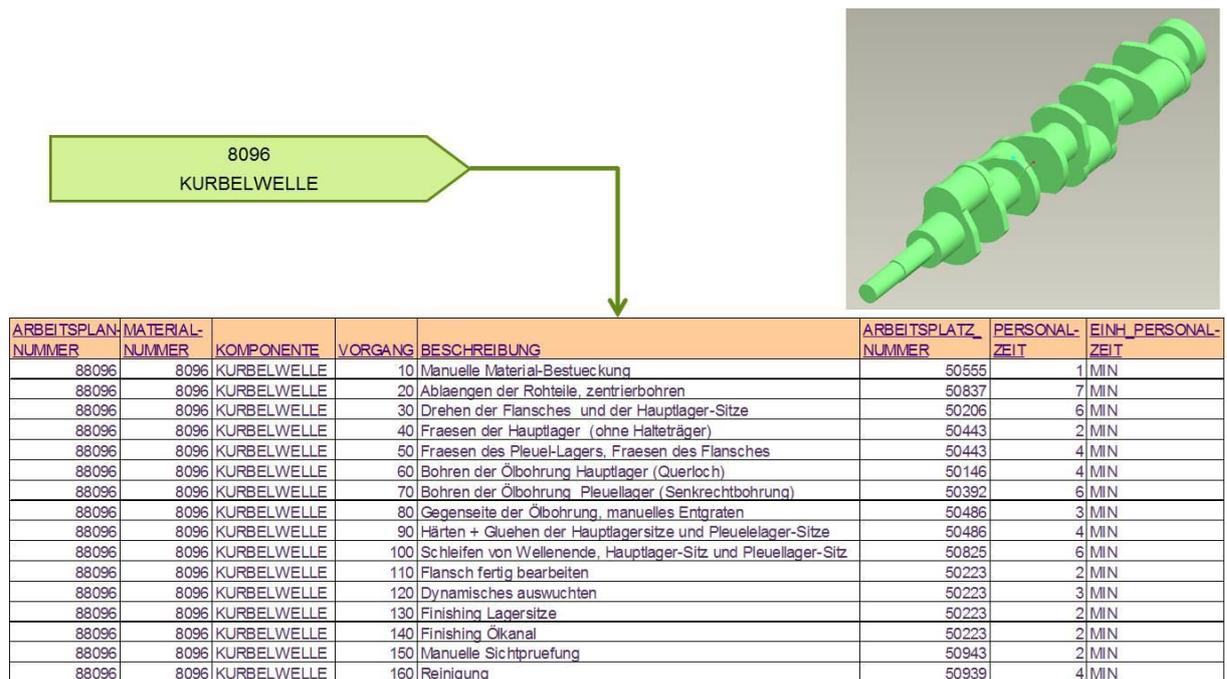


Abbildung 23: Arbeitsplan (Kurbelwelle)

3.2 Weitere Simulationsvorgaben

Für die Erstellung und die Ergebnisauswertung des Simulationsmodells wurden weitere Anforderungen gestellt. Die Anforderungen beziehen sich dabei auf die Erzeugung und Montage der Bauteile und die Simulationsergebnisse.

3.2.1 Erzeugung

Die Tabellen der Bauteilerzeugung sollen direkt aus den Arbeitsplänen, Stücklisten und Auftragskalender erzeugt werden, wodurch die Fabrik variabel eingesetzt werden kann z.B. können andere Stücklisten eingespielt werden und die Fabrik erzeugt dadurch ein anderes Produkt, bei gleich bleibendem Maschinenpark. Die Erzeugung der Bestandteile soll dabei eine Woche vor dem nächsten Fertigstellungstermin erfolgen.

3.2.2 Zielformulierung

Die Zielgrößen und Ergebnisse der Simulation sollen eine

- Monatsgenaue Auswertung der Auslastungsgrade, Fertigungsstunden, Grenzkapazität für kritische Stationen
- Monatsgenaue Auswertung der Fertigungsstunden auf Kostenstellen
- Monatsgenaue Auswertung der Anzahl an gefertigten Komponenten

enthalten.

Dabei sollen die Ergebnisdaten mittels Tabellen oder Grafiken dargestellt werden.

3.2.3 Montage

Die Motoren der Fabrik sollen auftragsbezogen gefertigt werden. Das heißt die Aufträge in der Lieferliste mit einem früheren Fertigstellungstermin sollen priorisiert und als erstes abgearbeitet werden, um die Liefertermine einhalten zu können.

Da in der vom Institut zur Verfügung gestellten Excel Datei der Auftragskalender auf 2 Schichtbetrieb ausgelegt wurde, sollte dieser auch bei der Simulation angestrebt werden. Feiertage wurden bei der Auslegung des Auftragskalenders vom Institut nicht berücksichtigt, deshalb sollen die Auftragsmengen bei der Implementierung der Feiertage korrigiert werden.

4 Modellierung

Im Folgenden wird die Systemmodellierung der vorgegebenen Fabrik in das lauffähige Simulationsmodell beschrieben. Weiters werden die Standardklassen von Plant Simulation, die Erzeugung der BEs sowie die Modellierung der mechanischen Fertigung und Montage erklärt.

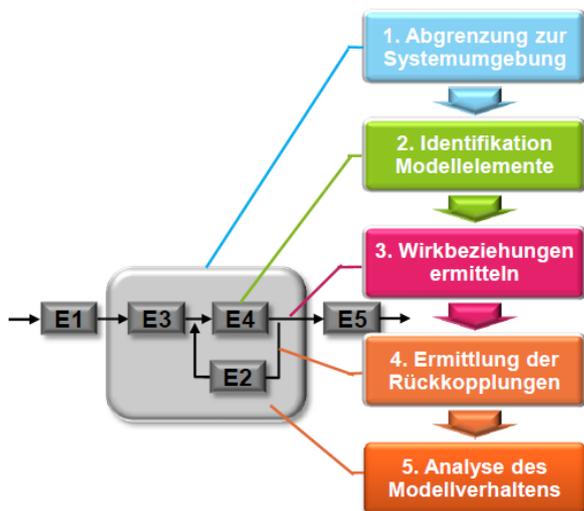
4.1 Konzeptionelles Modell

Der Modellentwurf erfolgt vom Groben zum Feinen (Top-down-Ansatz), Ziel des Entwurfs ist das konzeptionelle Modell, es dient als Ausgangsbasis für die Modellerstellung.



Abbildung 24: Ziel des Modellentwurfs (vgl. [KÜH06], S. 102)

Die Vorteile der Top-down-Methode sind das gute Systemverständnis des Gesamtsystems und die Übersichtlichkeit beim Aufbau des Systems. Die Praktische Vorgehensweise ist folgend beschrieben:



- 1) Freischneiden der Systemgrenzen zur Abgrenzung von System und Umwelt
- 2) Ermittlung der Beziehungen des Systems zur Umwelt bzw. zu anderen Systemen
- 3) Erfassen derjenigen Systemelemente, die für die zu modellierende Fragestellung ‚relevant‘ sind
- 4) Ermittlung derjenigen Beziehungen zwischen Systemelementen, die für die Fragestellung ‚relevant‘ sind
- 5) Analyse der Systemeigenschaften auf Makroebene, Mikroebene
- 6) Darstellung der Analyseergebnisse (vgl. [KÜH06], S. 39).

Abbildung 25: Vorgehensweise der Systemabgrenzung und Systemanalyse [ITL14]

4.1.1 Bestimmen der Systemgrenzen

Auf der Grundlage der im Punkt 3.1 gesammelten Ist-Daten und deren Strukturierung werden die Systemgrenzen des Modells definiert. Die Systemgrenzen des Modells können in Systemgrenzen zur Umwelt und in internen Systemgrenzen eingeteilt werden.

4.1.1.1 Systemgrenze zur Umwelt

Die Systemgrenze zur Abgrenzung zur Umwelt wird beim Wareneingang und Wareneingang festgelegt. Der Materialfluss in die Fabrik und aus der Fabrik heraus erfolgt nur über diese zwei Schnittstellen.

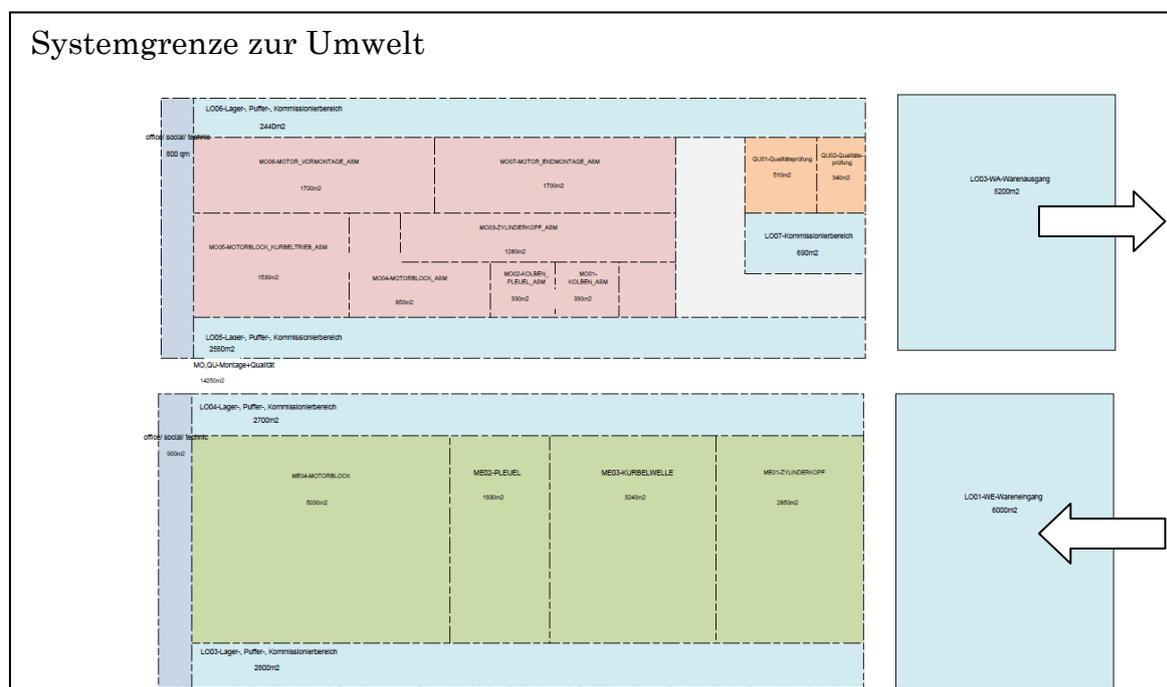


Abbildung 26: Systemgrenze zur Umwelt

Systemgrenze hinsichtlich des Wareneingangs:

Der Wareneingang nimmt Bauteile im 3-Schicht Betrieb entgegen. Hinsichtlich des Wareneingangs wird der Transportprozess zwischen dem Lager (LO03) der mechanischen Fertigung und dem Lager (LO05 und LO07) der Montage festgelegt. Der Wareneingang wird somit als Quelle für das Simulationsmodell und als Zulieferer der Lager angesetzt.

Systemgrenze hinsichtlich des Warenausgangs:

Der Warenausgang erhält hinsichtlich der Transportprozesse die fertigen Motoren aus der Qualitätssicherung. Nach dem Einlagern folgt der Warenausgang. Er wird somit als Senke für das Simulationsmodell angesetzt.

Über den Warenausgang stehen keine Daten zur Verfügung um eine weitere Auswertung dessen Kapazität oder über den Zeitpunkt des Auslagerns zu erhalten.

4.1.1.2 Interne Systemgrenzen

Die interne Systemgrenze befindet sich innerhalb der zuvor beschriebenen Systemgrenze. Bei den internen Systemgrenzen werden die einzelnen Systeme (ME01, ME02,...MO06, MO07) voneinander abgegrenzt, diese Systeme besitzen definierte Schnittstellen über die der Transportprozesse untereinander stattfinden.

Systemgrenze hinsichtlich der mechanischen Fertigung:

Hinsichtlich der mechanischen Fertigung wird der Transportprozess zwischen dem Lager LO03 und dem Lager LO04 angesetzt. Die einzelnen Systeme ME01, ME02, ME03 und ME04 werden dabei als eigenes System mit denselben Schnittstellen definiert. Innerhalb der Systemgrenze finden die Transporte für die Bearbeitung an den Arbeitsplätzen statt.

Systemgrenze hinsichtlich der Montage:

Hinsichtlich der Montage wird der Transportprozess von den Lagern LO05/LO07 zu den Lagern LO05/LO06 angesetzt. Wie bei der mechanischen Fertigung werden die Systeme der Montage MO01 bis MO07 als eigenes System definiert. Die Montage- und internen Transportprozesse geschehen innerhalb dieser Systeme. Als Schnittstelle für die Transporte dienen dabei die Lager.

4.1.2 Ermittlung der Beziehungen des Systems zur Umwelt

Der Wareneingang wird als Quelle für das Simulationsmodell definiert, wobei das Ausgangsverhalten der Quelle über eine Erzeugungstabelle festgehalten wird. Anhand dieser Tabelle werden die Bauteile lieferterminabhängig erzeugt. Der Warenausgang wird als Senke für das Simulationsmodell definiert, der Warenausgang erfolgt dabei kontinuierlich, sobald ein Produkt fertiggestellt wurde wird es abtransportiert, da er nicht weiter Teil der Untersuchungen ist.

4.1.3 Analyse der Systemeigenschaften auf Makroebene

Die Systembereiche werden in Wareneingang, Warenausgang, mechanische Fertigung, Montage und Qualitätssicherung unterteilt. Die gesamten Systembereiche bestehen aktuell aus Maschinenarbeitsplätzen und manuellen Arbeitsplätzen:

Systembereich	Maschinenarbeitsplätze	Manuelle Arbeitsplätze
ME01	23	14
ME02	16	24
ME03	24	20
ME04	17	32
MO01	-	5
MO02	-	4
MO03	-	26
MO04	-	21
MO05	-	18
MO06	-	18
MO07	-	20

Tabelle 8: Maschinen- und manuelle Arbeitsplätze

Die Transporte zwischen den Systemen erfolgen kontinuierlich und werden in einer Tabelle registriert, auf die Art der Transportsysteme wird bei der Simulation nicht eingegangen, da es nicht Teil der Aufgabenstellung ist.

Die Aufträge unterteilen sich in 9 Arten, wobei jede Art ihre eigene Prozessabfolge und Bearbeitungszeiten besitzt.

4.1.4 Analyse der Systemelemente auf Mikroebene

Abzubilden sind folgende Arbeitsplätze und ihre Einzelemente (Maschinen und manuelle Arbeitsplätze) im Simulationsmodell.

ID_LINIE	LINIE	ARBEITSPLATZ_NR	BEZEICHNUNG	TYP
ME01	ME_ZYLKOPF	S51100	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
ME01	ME_ZYLKOPF	S50810	Fräszentrum	PE 150 C
ME01	ME_ZYLKOPF	S50815	Fräszentrum	PF 150
ME01	ME_ZYLKOPF	S50710	Bohrzentrum	DMU 50 V
ME01	ME_ZYLKOPF	S50910	Schleifzentrum	ZX 3
ME01	ME_ZYLKOPF	S51105	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
ME01	ME_ZYLKOPF	S50500	Prüfzentrum-Dichteprüfung	HS4
ME01	ME_ZYLKOPF	S51110	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
ME02	ME_PLEUELSTANGE	S51200	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
ME02	ME_PLEUELSTANGE	S50820	Fräszentrum	PE 150 C
ME02	ME_PLEUELSTANGE	S50715	Bohrzentrum	DMU 50 V
ME02	ME_PLEUELSTANGE	S50915	Schleifzentrum	ZX 1
ME02	ME_PLEUELSTANGE	S51205	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
ME02	ME_PLEUELSTANGE	S50400	Prüfzentrum-Geometrieprüfung	LMR1
ME03	ME_KURBELWELLE	S51210	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
ME03	ME_KURBELWELLE	S50825	Fräszentrum	PE 150 C
ME03	ME_KURBELWELLE	S50600	Drehzentrum	SR8
ME03	ME_KURBELWELLE	S50830	Fräszentrum	PF 150
ME03	ME_KURBELWELLE	S50720	Bohrzentrum	DMU 50 V
ME03	ME_KURBELWELLE	S50725	Bohrzentrum	DMU 50 V
ME03	ME_KURBELWELLE	S51215	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
ME03	ME_KURBELWELLE	S50920	Schleifzentrum	ZX 3
ME03	ME_KURBELWELLE	S51220	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
ME03	ME_KURBELWELLE	S50405	Prüfzentrum-Geometrieprüfung	LMR3
ME03	ME_KURBELWELLE	S51225	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
ME04	ME_MOTORBLOCK	S51230	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
ME04	ME_MOTORBLOCK	S51235	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50800	Fräszentrum	PE 150 C
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50805	Fräszentrum	PF 150
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50700	Bohrzentrum	DMU 50 V
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50705	Bohrzentrum	DMU 60 V
ME04	ME_MOTORBLOCK	S51240	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50900	Schleifzentrum	ZX 1
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50905	Schleifzentrum	ZX 3
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50550	Lackiermaschine	FR21
ME04	ME_MOTORBLOCK	S51245	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
ME04	ME_MOTORBLOCK	S51250	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
ME04	ME_MOTORBLOCK	S51255	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50515	Prüfzentrum-Dichteprüfung	HS8
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50520	Prüfzentrum-Dichteprüfung	HS9
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50410	Prüfzentrum-Geometrieprüfung	LMR5
ME04	ME_MOTORBLOCK	S50415	Prüfzentrum-Geometrieprüfung	LMR6
MO01	MO_KOLBEN	S52100	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
MO01	MO_KOLBEN	S52105	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO01	MO_KOLBEN	S52110	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO01	MO_KOLBEN	S52115	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
MO02	MO_KOLBEN_PLEUEL_ASM	S52200	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
MO02	MO_KOLBEN_PLEUEL_ASM	S52205	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO02	MO_KOLBEN_PLEUEL_ASM	S52210	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52215	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52220	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52225	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52230	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52235	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52240	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52245	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52250	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52255	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52260	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52265	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO03	MO_ZYLKOPF	S52270	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
MO04	MO_MOTORBLOCK	S52300	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
MO04	MO_MOTORBLOCK	S52305	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO04	MO_MOTORBLOCK	S52310	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
MO05	MO_MOBLOCK_KURBELTRIEB	S52400	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
MO05	MO_MOBLOCK_KURBELTRIEB	S52405	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO05	MO_MOBLOCK_KURBELTRIEB	S52410	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO05	MO_MOBLOCK_KURBELTRIEB	S52415	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
MO06	MO_MOTORVORMONTAGE	S52500	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
MO06	MO_MOTORVORMONTAGE	S52505	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO06	MO_MOTORVORMONTAGE	S52510	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO06	MO_MOTORVORMONTAGE	S52515	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO06	MO_MOTORVORMONTAGE	S52520	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
MO07	MO_MOTOR	S52600	manueller Arbeitsplatz-Vorbereiten	Maschinenfacharbeiter
MO07	MO_MOTOR	S52605	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter

MO07	MO_MOTOR	S52610	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO07	MO_MOTOR	S52615	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO07	MO_MOTOR	S52620	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO07	MO_MOTOR	S52625	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter
MO07	MO_MOTOR	S52620	manueller Arbeitsplatz-Montage	Maschinenfacharbeiter
MO07	MO_MOTOR	S52625	manueller Arbeitsplatz-Finishing	Maschinenfacharbeiter

Tabelle 9: Arbeitsplätze

Die Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten, die für die Bearbeitung nötig sind, werden in der Tabelle Arbeitsplan im Simulationsmodell abgebildet.

Die Schichtmodelle für jede Ressource werden mittels Schichtplan_1, Schichtplan_2 und Schichtplan_3 dargestellt. Die Arbeitszeiten der jeweiligen Schicht sind in der folgenden Tabelle ersichtlich:

	Von	Bis	MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO	Pausen
Schicht 1	06:00	14:00	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	9:00-9:15; 12:00-12:45
Schicht 2	14:00	22:00	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	18:00-18:30; 20:30-21:00
Schicht 3	22:00	06:00	✓	✓	✓	✓	✓	-	-	1:00-1:15; 4:00-4:15

Tabelle 10: Schichtkalender

Die Schichtkalender haben im jeweiligen System Gültigkeit.

4.1.5 Systembeziehungen auf Mikroebene

Die Lagerbestände der Lager LO05 und LO06 sowie der maximale und minimale Bestand in jeder Kalenderwoche sollen über Tabellen erfasst werden.

Die Priorisierung der Komponenten erfolgt über eine im Bauteil hinterlegte Chargennummer die sich auf die vorgegebenen Liefertermine bezieht. Die Sortierung über die Chargennummer erledigt der Sortierer.

Bei der Priorisierung sollen bei jedem Arbeitsplatz die ankommenden Teile nach ihrem Liefertermin sortiert werden, sodass Teile mit früherem Liefertermin früher bearbeitet werden.

Die internen Systeme werden durch die Quelle versorgt, die Versorgung erfolgt lieferterminabhängig. Wenn der Simulationszeitpunkt mit dem Liefertermin übereinstimmt wird das Teil erzeugt und an das Folgesystem übergeben. Die Systeme der Montage werden zusätzlich von der mechanischen Fertigung und anderen Montagesystemen versorgt.

4.1.6 Modellauswertung

Die Simulation wertet folgende Daten aus:

- Tagesgenaue Auswertung der Transportmengen zwischen den Systemen
- Wochengenaue Auswertung an Soll und Ist-Werte an produzierten Teilen
- Wochengenaue Auswertung der Auslastungsgrade jedes Arbeitsplatzes
- Wochengenaue Auswertung der Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten und gefertigten Teilen jedes Systems.
- Detaillierte Wochengenaue Auswertung der Anzahl an verschiedenen Produzierten Teilen.

- Kontinuierliche Auswertung der Lagerbestände und wochengenaue Auswertung der maximalen und minimalen Lagerbestände.
- Wochengenaue detaillierte Auswertung der produzierten Motoren und der Einhaltung von Lieferterminen.

4.1.7 Datenschema des Modells

Das Datenschema soll die grundlegende Modellstruktur veranschaulichen. Die farblich hervorgehobenen Rechtecke (Auftragskalender, Stückliste und Arbeitsplan) sind die Haupteingangsdaten des Modells.

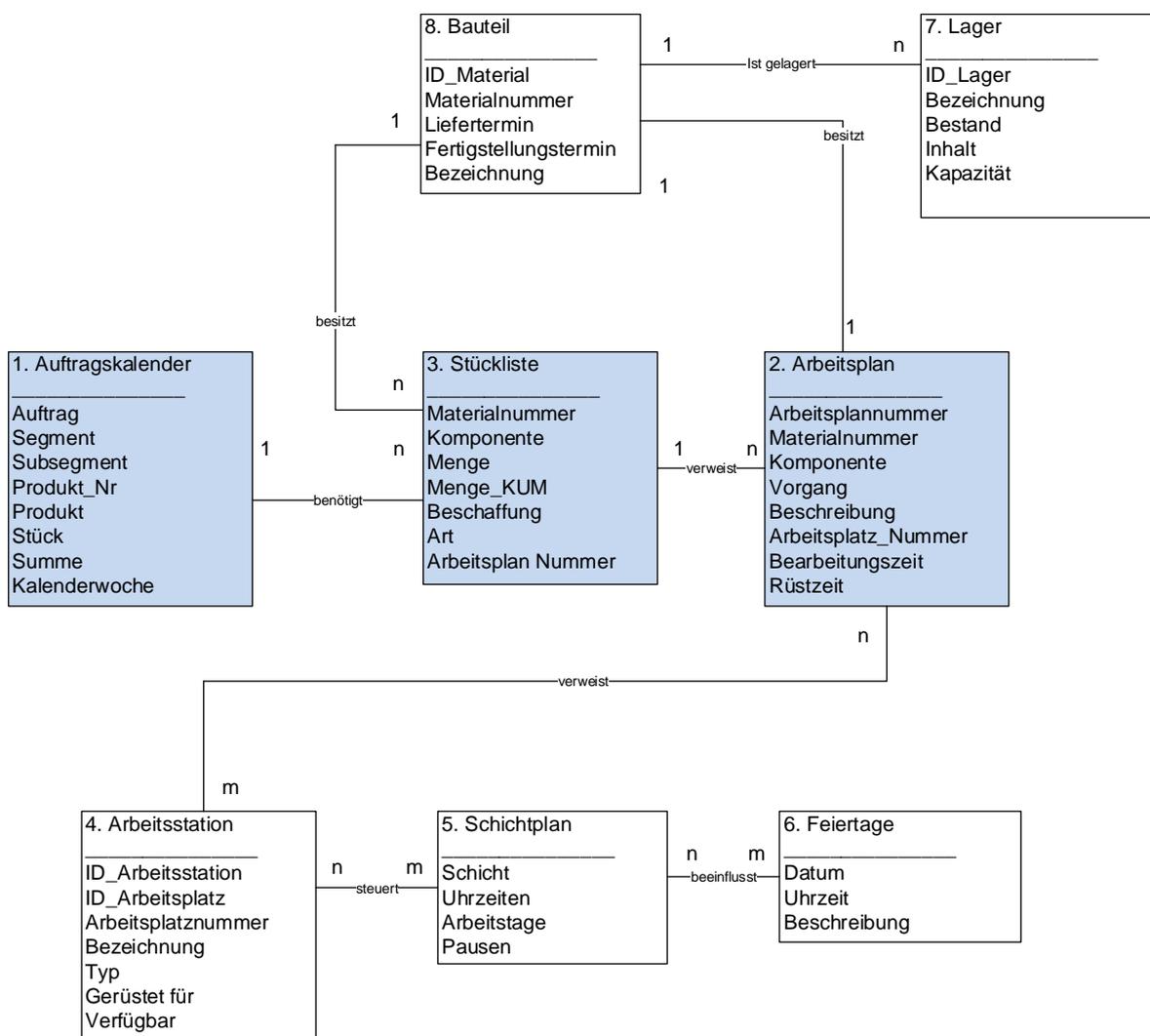


Abbildung 27: Datenschema des Modells

4.2 Implementierung des Modells

Bei der Implementierung wird das konzeptionelle Modell in ein Softwaremodell umgesetzt.



Abbildung 28: Implementierung (vgl. [KÜH06], S. 104)

Um einen besseren Einstieg in das Kapitel Implementierung zu erhalten werden die einzelnen verwendeten Klassen von Plant Simulation erläutert.

Für die Umsetzung der digitalen Fabrik wurden Standardbausteine aus Plant Simulation verwendet und angepasst. Sie lassen sich den Bereichen Materialfluss-, Ressourcen- und Informationsflussbausteinen zuordnen.

4.2.1.1 Materialflussbausteine

Ereignisverwalter	Der <i>Ereignisverwalter</i> koordiniert und synchronisiert die Ereignisse, die während der Simulation stattfinden. Über ihn kann die Simulation gestartet, angehalten und zurückgesetzt werden.
Kante	Die <i>Kante</i> stellt Materialflussverbindungen zwischen zwei Objekten im gleichen <i>Netzwerk</i> her.
Netzwerk	Im <i>Netzwerk</i> werden hierarchisch strukturierten Simulationsmodelle erstellt. Hier können Objekte zu einem Objekt mit höherer Funktionalität kombiniert werden. Das neu erstellte Objekt kann nun, wie jedes andere Objekt, verwendet werden.
Übergang	Das Objekt <i>Übergang</i> wird verwendet, um Übergänge zwischen <i>Netzwerken</i> zu modellieren.
Quelle	Die <i>Quelle</i> erzeugt bewegliche Objekte (BEs), entsprechend der Objektdefinition. Sie kann verschiedene Teiletypen hintereinander oder in gemischter Reihenfolge produzieren. Es können sowohl Verfahren zur Bestimmung der Erzeugungszeitpunkte als auch zur Bestimmung der zu erzeugenden BE-Typen angegeben werden.
Senke	Die <i>Senke</i> schleust BEs aus der Einrichtung aus. Sie gibt bearbeitete BEs nicht an einen Nachfolger weiter, sondern löscht sie nach der Bearbeitung.
Einzelstation	Die <i>Einzelstation</i> besitzt einen Arbeitsplatz, um BEs zu bearbeiten. Sie nimmt ein BE von ihrem Vorgänger entgegen und reicht es nach Ablauf der Rüst- und der Bearbeitungszeit reihum an einen ihrer Nachfolger

	weiter. Während sich ein BE auf ihr befindet, nimmt sie keine neu eintreffenden BEs auf, sondern trägt diese in ihre Blockierliste ein. Erst nachdem die Einzelstation wieder frei ist nimmt sie die blockierten BEs der Reihe nach auf.
Lager	Das <i>Lager</i> nimmt BEs auf und lagert diese so lange ein bis diese mit einer Methode entnommen werden.
Puffer	Der <i>Platzpuffer</i> hat mehrere in einer Reihe hintereinander angeordnete Stationen zur Bearbeitung von BEs. Die Plätze sind miteinander verbunden, so daß die BEs während ihrer Bearbeitungszeit alle Plätze durchlaufen. Die BEs können sich nicht überholen. Erst nachdem sie den Bearbeitungsplatz mit der höchsten Nummer erreicht haben, können sie umlagern.
Sortierer	Der <i>Sortierer</i> sortiert BEs, entsprechend eines Sortierkriteriums. Der <i>Sortierer</i> lagert das BE mit höchster Priorität als erstes um, unabhängig davon, wann es in das Objekt eingetreten ist. Die Prioritäten der BEs sind durch das Sortierkriterium und die Sortierreihenfolge definiert.

Abbildung 29: Materialflussbausteine in Plant Simulation

4.2.1.2 Informationsflussbausteine

Methode	Im Objekt <i>Methode</i> können Steuerungen erzeugt werden, die dann von den Objekten über die Namen der Steuerungen aufgerufen und gestartet werden können.
Tabelle	Die <i>Tabelle</i> ist eine Liste mit mehreren Spalten, die wahlfreien Zugriff auf die Einträge über den Index ermöglicht.
Trigger	Der <i>Trigger</i> ändert Werte von Attributen und globalen Variablen während der Simulation nach einem definierten Muster und ruft Methoden auf. Er bildet einen zeitlichen Werteverlauf ab. Definierte Attribute nehmen während des Simulationslaufes die vom <i>Trigger</i> vorgegebenen Werte an.
Generator	Der <i>Generator</i> aktiviert in, ab dem durch Start festgelegten Zeitpunkt, in regelmäßigen oder statistisch verteilten Abständen die bei Abstand eingetragene Methode (Abstandsteuerung). Nach Ablauf der festgelegten Zeitspanne aktiviert er die unter <i>Dauer</i> eingetragene Methode (Dauersteuerung).

Abbildung 30: Informationsflussbausteine in Plant Simulation

Abbildung der Arbeitsstation:

Mit Hilfe des Grundbausteins Einzelplatz werden die einzelnen Arbeitsplätze abgebildet, jedem Arbeitsplatz wird zusätzlich ein Puffer mit der Kapazität eins vor- bzw. nachgeschaltet, der die Aufgabe hat die Teile unmittelbar vor oder nach der Bearbeitung zwischen zu speichern. Die Puffer übernehmen zusätzlich die Rolle der Parameterübergabe an die Teile und Bearbeitungsmaschine.

Abbildung des Wareneingangs:

Mit dem Baustein Quelle wird die Erzeugung der Fertigungsaufträge dargestellt. Die Quelle erzeugt die Teile anhand einer Lieferliste, die Simulationsdatumsabhängig abgearbeitet wird.

Abbildung vom Transport und Fördersystem:

Das Transportaufkommen zwischen den einzelnen Systemen wird über eine Tabelle dargestellt, in welcher die täglichen Transporte der Systeme aufgezeichnet werden. Die Simulation der Transporte zwischen den Systemen ist nicht Teil der Simulation.

Eingabedaten:

Der Arbeitsplan, die Stückliste, der Auftragskalender und die Schichtpläne dienen als Eingangsdaten der Simulation.

Die Steuerungslogik des Modells wird über Methoden definiert:

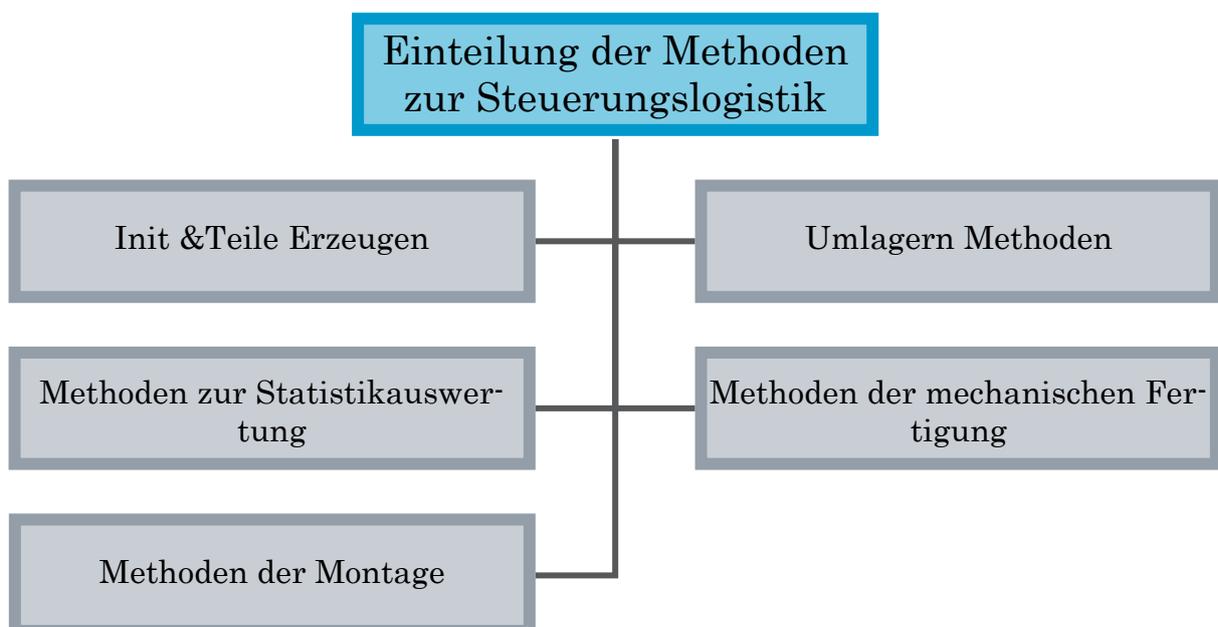


Abbildung 31: Einteilung der Methoden zur Steuerungslogistik

Init & Teile Erzeugen:

- Methode Init
 - o Über die Methode Init werden Tabellen und Werte vor dem Simulationslauf vorinitialisiert.
 - o Der Inhalt der Tabellen für die Produktionsstatistik wird rückgesetzt.
 - o Der Inhalt der Tabellen für die Auswertung des Lagerbestands wird rückgesetzt.
 - o Die Auswertung der produzierten Motoren wird zurückgesetzt.
 - o Die Tabelle des Transportaufkommens wird rückgesetzt.
 - o Die für die Auswertung nötige Produktionswoche wird auf eins gesetzt.

- Methode Erzeugungstabelle_ET_schreiben
 - o Liest den Arbeitsplan, die Stückliste und den Auftragskalender ein und erzeugt daraus die Lieferliste für die Quelle der Einzelteile.
 - o Erzeugt die simulationsnötigen benutzerdefinierten Attribute der beweglichen Elemente.
 - o Die Lieferliste wird lieferdatumabhängig sortiert.

- Methode Erzeugungstabelle_BG_schreiben
 - o Liest den Arbeitsplan, die Stückliste und den Auftragskalender ein und erzeugt daraus die Lieferliste für die Quelle der Baugruppen.
 - o Erzeugt die simulationsnötigen benutzerdefinierten Attribute der beweglichen Elemente.
 - o Die Lieferliste wird lieferdatumabhängig sortiert.

Umlagern Methoden:

- Methode M_Umlagern_LO05_ET
 - o Die fertigen Teile/Baugruppen aus der mechanischen Fertigung und Montage werden in das Lager LO05 umgelagert und der Transport wird in der Transporttabelle registriert.

- Methode M_Lager_Materialfluss
 - o Die Bauteile die in das Lager einlagen werden auf Ihre nächste Arbeitsstation untersucht und in das Folgesystem weiter umgelagert.
 - o Der Transport wird in der Transporttabelle registriert.

- Methode M_Umlagern_LO06_ET
 - o Die fertigen Bauteile aus der Montage MO04 bis MO07 werden in das Lager LO06_ET umgelagert.
 - o Der Transport wird in der Transporttabelle registriert.

Methoden zur Statistikauswertung:

- Methode M_Wochenauswertung
 - o Setzt zu Wochenbeginn den Wert Woche um Eins höher
 - o In den Tabellen zur Produktionsauswertung T_ME01_Produktion bis T_MO07_Produktion werden die ermittelten Werte der derzeitigen Produktionswoche in die Simulationswoche umgeschrieben.
 - o Die Anzahl der Teile die in das System transportiert, werden in die Produktionsauswertungstabellen übertragen.
 - o Die Anzahl an Teilen die sich Ende der Produktionswoche im System befinden wird erfasst.
- Methode M_LO05_Bestand
 - o Beim Einlangen von Teilen in das Lager LO05 wird die Chargennummer des Teils in der Tabelle T_LO05_Bestand gesucht und der Bestand um Eins erhöht.
- Methode M_LO06_ET_Bestand
 - o Beim Einlangen von Teilen in das Lager LO06_ET wird die Chargennummer des Teils in der Tabelle T_LO06_ET_Bestand gesucht und der Bestand um Eins erhöht.
- Methode M_LO05_Auslagern
 - o Der Bestand der Teile des Lagers LO05 wird beim Erreichen des Lieferdatums der Simulation auf null gesetzt
 - o Der maximale und minimale Lagerbestand wird aufgezeichnet.
- Methode M_LO06_ET_Auslagern
 - o Der Bestand der Teile des Lagers LO06_ET wird beim Erreichen des Lieferdatums der Simulation auf null gesetzt
 - o Der maximale und minimale Lagerbestand wird aufgezeichnet.
- Methode M_LO06_Einlagern
 - o Schreibt die Anzahl aller fertiggestellten Motoren in die Tabelle T_LO06 und kontrolliert ob der Liefertermin der fertiggestellten Motoren eingehalten wurde und übergibt den Wert „true“ in die Tabelle T_LO06 falls ein Motor zu spät produziert wurde.

Methoden der mechanischen Fertigung:

- Methode Init
 - o Setzt die Tabelle T_Fertigungsstunden und T_Auslastungsgrade zurück.
 - o Setzt die Variable Woche auf Eins.

- Methode Maschine_BZ_RZ_Zuweisen
 - Übergibt die Bearbeitungszeit und Rüstzeit an die Einzelstation.
- Methode BE_Ziel_RZ_BZ_Zuweisen
 - Sucht im Arbeitsplan nach dem nächsten Arbeitsplatz
 - Weist die Bearbeitungszeit, Rüstzeit und Arbeitsplatz für den folgende Arbeitsschritt dem beweglichen Element zu.
 - Schleust die beweglichen Elemente aus dem System aus.
- Methode Rohteil_Fertigteil
 - Weist dem Teil das Folgesystem zu.
 - Schreibt die benutzerdefinierten Attribute vom Rohteil in die eines Einzelteils um.
- Methode BE_Umlagern
 - Lagert das Teil auf den nächsten Arbeitsplatz im Arbeitsplan um.
- Methode M_Wochenauswertung
 - Ruft die Methode M_Relative_Belegung auf.
 - Trägt die Fertigungsstunden, Rüstzeiten und gefertigten Teile des Systems in der aktuellen Woche in die Tabelle T_Fertigungsstunden ein.
 - Setzt die aktuellen Fertigungsstunden, Rüstzeiten und gefertigten Teile auf null.
- Methode M_gefertigte_Teile
 - Summiert die gefertigten Teile des Systems wöchentlich auf und übergibt sie an die Tabelle T_Fertigungsstunden.
- Methode M_Ruestzeiten
 - Summiert die Rüstzeiten des Systems wöchentlich auf und übergibt sie an die Tabelle T_Fertigungsstunden.
- Methode M_Fertigungsstunden
 - Summiert die Fertigungsstunden des Systems wöchentlich auf und übergibt sie an die Tabelle T_Fertigungsstunden.
- Methode M_Relative_Belegung
 - Übergibt wöchentlich den Auslastungsgrad jedes Arbeitsplatzes an die Tabelle T_Auslastungsgrad.
 - Setzt den Auslastungsgrad der Arbeitsplätze wöchentlich zurück.

Methoden der Montage:

Bestimmte Methoden der mechanischen Fertigung werden ebenfalls in der Montage verwendet:

- Methode Maschine_BZ_RZ_Zuweisen
- Methode BE_Ziel_RZ_BZ_Zuweisen
- Methode BE_Umlagern
- Methode M_Wochenauswertung
- Methode M_gefertigte_Teile
- Methode M_Ruestzeiten
- Methode M_Fertigungsstunden
- Methode M_Relative_Belegung

Zusätzlich werden für die Montage weitere Methoden benötigt die zum Teil dieselbe Bezeichnung besitzen aber zusätzliche Funktionen ausführen.

- Methode Init
 - o Setzt die Tabelle T_Fertigungsstunden und T_Auslastungsgrade zurück.
 - o Setzt die Variable Woche auf Eins.
 - o Setzt den Bestand der Einzelteile in der Tabelle Bestand_MO0x_Eingangspuffe_ET bei Initialisierung auf den Wert null.
- Methode M_Montageabteilung_Aus
 - o Weist dem Teil das Folgesystem zu.
 - o Teile werden beim Verlassen gezählt.
- Methode M_Einlagern_ET
 - o Registriert die Einzelteile in der Tabelle Bestand_MO0x_Eingangspuffer_ET.
- Methode M_BG_Umlagern_ET_Vernichten
 - o Löscht die Einzelteile der ankommenden Baugruppen aus der Tabelle Bestand_MO0x_Eingangspuffer_ET.
 - o Liest die Einzelteile der Baugruppe ein.
 - o Lagert die Baugruppe auf den ersten Arbeitsplatz.
- Methode M_BG_Füllen
 - o Kontrolliert die Baugruppen bei denen noch nicht alle Einzelteile verfügbar waren.
- Methode Ohne_Warten
 - o Dient zur unabhängigen Auswertung der Montageabteilungen.

4.2.2 Bauteilerzeugung

Die Bauteilerzeugung stellt den wichtigsten Teil der Simulation dar. Sie erfolgt durch eine Lieferliste (über Quellen). Diese enthält das Datum, die Komponente, die Produktionsanzahl und die benutzerdefinierten Attribute. Diese Lieferlisten werden nach der Reihe, simulationsdatumsabhängig, abgearbeitet und die Bauteile erzeugt.

Da laut der Ist-Analyse die Fertigstellungstermine der Motoren vorgegeben sind, wird laut Kapitel 2.7.1 Ablauf und Terminplanung eine Rückwärtsterminierung durchgeführt, um den Erzeugungszeitpunkt der einzelnen Bauteile zu erhalten.

4.2.2.1 Erzeugung der Lieferliste

Als Ausgangsbasis für die Simulation wurde eine Excel Datei mit allen Informationen zur digitalen Fabrik vom Institut zur Verfügung gestellt. Die wichtigsten für die Simulation nötigen Eingangsdaten sind dabei, die Stückliste, der Arbeitsplan und der Auftragskalender. Durch diese Daten können Tabellen generiert werden, die für die Bauteilerzeugung, den Material- und Informationsfluss notwendig sind. Mit Hilfe dieser Produktdaten wird anschließend eine Lieferliste erzeugt.

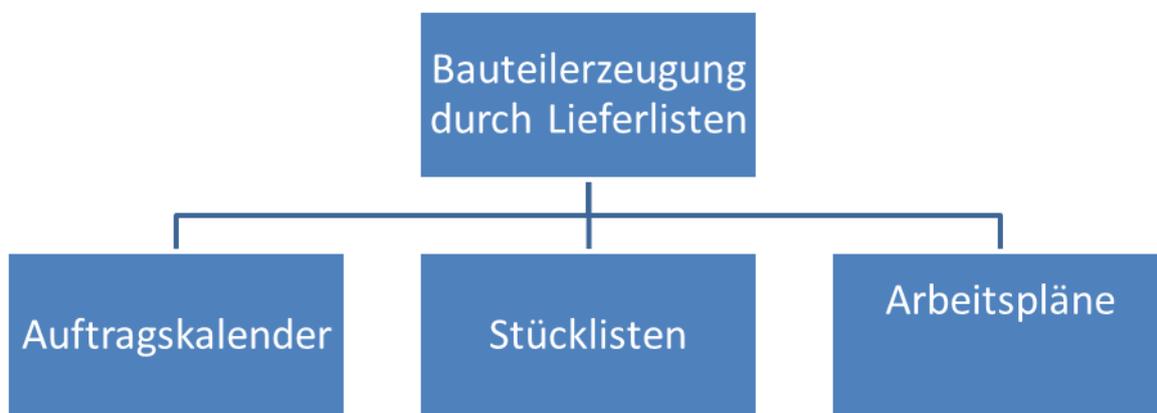


Abbildung 32: Notwendige Daten für die Bauteilerzeugung

4.2.2.1.1 Daten Auftragskalender

Der Auftragskalender wurde von der vom Institut zur Verfügung gestellten Excel Datei übernommen und in ein für Plant Simulation brauchbares Format konvertiert und implementiert.

	date 1	string 2	string 3	string 4	string 5	integer 6	string 7	integer 8	integer 9
ing	Datum	Kalenderwoche	Auftrag	Segment	Subsegment	Produkt_Nr	Produkt	Stück	Anzahl
1	31.12.2012	1	A2011001-R4_1400	R4	R4-TD3	401112	R4-TD3-1400	6000	300
2	31.12.2012	1	A2011004-V6_3000	V6	V6-D2M4	601112	V6-D2M4-3000	4700	240
3	31.12.2012	1	A2011007-V8_4400	V8	V8-W56	801112	V8-W56-4400	2400	150
4	07.01.2013	2	A2011001-R4_1400	R4	R4-TD3	401112	R4-TD3-1400	6000	300
5	07.01.2013	2	A2011004-V6_3000	V6	V6-D2M4	601112	V6-D2M4-3000	4700	240

Abbildung 33: Auftragskalender (Auszug aus dem Simulationsmodell)

In den Spalten des Auftragskalenders sind die nötigen Auftragsdaten, wie das Datum, Kalenderwoche, Auftrag, etc. enthalten. Diese Daten geben Auskunft über die Menge, den Motorentyp und das Datum.

- Datum: gibt Auskunft darüber bis wann der Motor fertiggestellt werden soll.
- Kalenderwoche: gibt an in welcher Kalenderwoche dieser Motor fertiggestellt werden soll.
- Auftrag: Jeder Auftrag hat eine eindeutige Bezeichnung.
- Segment: Information über die Art des Motors (Reihen 4 Zylinder, V-Motor 6 Zylinder, V-Motor 8 Zylinder)
- Subsegment: die 4, 6 und 8 Zylinder Motoren gibt es in jeweils 3 verschiedenen Hubraumklassen.
- Produktnummer: Die einzelnen Subsegmente werden über einen Nummernschlüssel definiert.
- Stück: Die Anzahl der Motoren die über das ganze Jahr produziert werden.
- Anzahl: Die zu produzierende Anzahl an Motoren in dieser Kalenderwoche.

R4-TD3-1400	4 Zylinder Reihenmotor, 1400ccm
R4-SK5-1600	4 Zylinder Reihenmotor, 1600ccm
R4-MR8-2000	4 Zylinder Reihenmotor, 2000ccm
V6-D2M4-3000	6 Zylinder V-Motor, 3000ccm
V6-LM2-3400	6 Zylinder V-Motor, 3400ccm
V6-K4-3600	6 Zylinder V-Motor, 3600ccm
V8-WS6-4400	8 Zylinder V-Motor, 4400ccm
V8-GT5-4700	8 Zylinder V-Motor, 4700ccm
V8-MZ16-5000	8 Zylinder V-Motor, 5000ccm

Tabelle 11: Produktpalette

4.2.2.1.2 Berechnen der Lieferliste

Bei der Lieferliste wird zwischen der Lieferliste für Einzelteile und Baugruppen unterschieden.

Das Lieferdatum der einzelnen Bauteile errechnet sich aus dem Fertigstellungstermin der Motoren. Die Berechnung erfolgt mittels Auftragskalender und der Stufe (Bearbeitungsstufe) des Bauteils. Durch die Rückwärtsterminierung erhält man somit das Lieferdatum jedes einzelnen Bauteiles. Pro Stufe wurde laut Vorgabe für die Rückwärtsterminierung eine Woche veranschlagt.

Der Kolben eines Motors besitzt z.B. die Stufe 5, damit wird er 5 Wochen bevor der fertige Motor das Werk verlassen soll erzeugt und anschließend montiert.

Die Lieferliste enthält zusätzlich die Anzahl, den Namen und benutzerdefinierte Attribute der Bauteile, die aus der Stückliste und dem Arbeitsplan erzeugt werden.

In den folgenden Abbildungen ist ein Auszug aus den Lieferlisten der Einzelteile und der Baugruppen dargestellt.

	date 1	object 2	integer 3	string 4	table 5
string	Lieferzeit	BE	Anzahl	Name	Attribute
1	26.11.2012	.BEs.Fördergut	300	MOTORBLOCK_ROH	Benutzerdefinierte Attribute
2	26.11.2012	.BEs.Fördergut	300	KURBELWELLE_ROH	Benutzerdefinierte Attribute
3	26.11.2012	.BEs.Fördergut	1200	PLEUEL_STANGE_ROH	Benutzerdefinierte Attribute
4	26.11.2012	.BEs.Fördergut	1200	KOLBEN	Benutzerdefinierte Attribute
5	26.11.2012	.BEs.Fördergut	1200	KOLBENRING_OBEN	Benutzerdefinierte Attribute
6	26.11.2012	.BEs.Fördergut	1200	KOLBENRING_UNTEN	Benutzerdefinierte Attribute
7	26.11.2012	.BEs.Fördergut	240	MOTORBLOCK_ROH	Benutzerdefinierte Attribute
8	26.11.2012	.BEs.Fördergut	240	KURBELWELLE_ROH	Benutzerdefinierte Attribute

Abbildung 34: Lieferliste Einzelteile

	date 1	object 2	integer 3	string 4	table 5
string	Lieferzeit	BE	Anzahl	Name	Attribute
1	03.12.2012	.BEs.Fördergut	1200	KOLBEN_ASM	Benutzerdefinierte Attribute
2	03.12.2012	.BEs.Fördergut	1440	KOLBEN_ASM	Benutzerdefinierte Attribute
3	03.12.2012	.BEs.Fördergut	1200	KOLBEN_ASM	Benutzerdefinierte Attribute
4	10.12.2012	.BEs.Fördergut	300	MOTORBLOCK_ASM	Benutzerdefinierte Attribute
5	10.12.2012	.BEs.Fördergut	1200	KOLBEN_PLEUEL_ASM	Benutzerdefinierte Attribute
6	10.12.2012	.BEs.Fördergut	240	MOTORBLOCK_ASM	Benutzerdefinierte Attribute
7	10.12.2012	.BEs.Fördergut	1440	KOLBEN_PLEUEL_ASM	Benutzerdefinierte Attribute
8	10.12.2012	.BEs.Fördergut	150	MOTORBLOCK_ASM	Benutzerdefinierte Attribute

Abbildung 35: Lieferliste Baugruppen

Die benutzerdefinierten Attribute dienen als Informationsträger während der Simulation. Sie sind in einer Subtabelle der Lieferliste abgespeichert und werden bei der Erzeugung der beweglichen Elemente im Bauteil hinterlegt.

Durch Methoden wird auf den Arbeitsplan und die Stückliste zugegriffen sowie die benötigten Attribute ausgelesen und in die Lieferlisten übertragen. Die Lieferlisten werden beim Initialisieren des Modells durch diese Methoden erzeugt.

Die in der Stückliste hinterlegte Materialnummer dient der Suche der Bearbeitungszeit, Rüstzeit und folge Arbeitsstation im Arbeitsplan. Die ermittelten Informationen aus dem Arbeitsplan werden ebenfalls in den benutzerdefinierten Attributen gespeichert.

Bei der Erzeugung wird zwischen Einzelteilerzeugung und Baugruppenerzeugung unterschieden. Die Einzelteile und Baugruppen bekommen zum Teil gleiche benutzerdefinierte Attribute zugewiesen. (Abbildung 27)

	string 1	integer 2	boolean 3	string 4	real 5	time 6	date 7	dat 8
string	Attributname							
1	Lieferdatum						03.12.2012	
2	Komponente			KOLBEN_ASM				
3	Materialnummer	401778						
4	Chargennummern	1401778						
5	Arbeitsplan	41778						
6	Arbeitsplan_Zeile	87						
7	Stueckliste_Zeile	13						
8	Folge_Arbeitsstation			552100				
9	Folge_Bearbeitungszeit					1:00.0000		
10	Folge_Ruestzeit					0.0000		
11								
12	Produkt	401112						
13	Baugruppe	401112						
14	Finish_Date_Motor						31.12.2012	
15	Verbaut_in_Komponente			KOLBEN_PLEUEL_ASM				
16	Verbaut_in_Materialnummer	401980						
17	Verbaut_in_Stueckliste_Zeile	10						
18	Verbaut_in_Arbeitsstation			552200				
19	Bauteil_Nummer_1	1401468						
20	Bauteil_Nummer_1_Anzahl	1						
21	Bauteil_Nummer_2	1401936						
22	Bauteil_Nummer_2_Anzahl	1						
23	Bauteil_Nummer_3	1401940						
24	Bauteil_Nummer_3_Anzahl	1						
25	Bauteil_Nummer_4	0						

Abbildung 36: Benutzerdefiniertes Attribute aus der Subtabelle. Beispiel Baugruppe Kolben_ASM

4.2.2.2 Einzelteilerzeugung

Die Einzelteilerzeugung erfolgt über die Quelle_ET, nach der Erzeugung gelangen einige Teile in die mechanische Fertigung und die restlichen Teile in die Montage.

4.2.2.3 Baugruppenerzeugung

Die Baugruppenerzeugung erfolgt über die Quelle_BG, alle Baugruppentteile gelangen direkt zur Montage.

4.2.3 Mechanische Fertigung

In der mechanischen Fertigung werden die Rohteile, Kurbelwelle_Roh, Pleuel_Stange_Roh, Motorblock_Roh und Zylinderkopf_Roh zu einbaufertigen Einzelteilen weiterverarbeitet. (Tabelle 9)

Rohteil	Fertiges Einzelteil	Fertigungsbereich
Zylinderkopf_Roh	Zylinderkopf	ME01
Pleuel_Stang_Roh	Pleuel_Stange	ME02
Kurbelwelle_Roh	Kurbelwelle	ME03
Motorblock_Roh	Motorblock	ME04

Tabelle 12: Rohteil Weiterverarbeitung

Bei der Bearbeitung durchlaufen die Rohteile mehrere Arbeitsstationen. Die Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten an den einzelnen Stationen sind in den beweglichen Elementen (Rohteilen) gespeichert. Die Rohteile werden dabei von einer Arbeitsstation zur nächsten weitergereicht, sobald der Bearbeitungsprozess abgeschlossen ist. Wenn das Bauteil alle vorgesehenen Arbeitsschritte durchlaufen hat und somit montagebereit ist, gelangt das Bauteil in den Ausgangspuffer. Dort wird es zur Statistikauswertung registriert und aus dem Netzwerk ausgeschleust.

4.2.3.1 Umsetzung der Fertigungssimulation, am Beispiel mechanischen Fertigung ME01

Eine Arbeitsstation wird durch einen Puffereingang, die Bearbeitungsstation und einen Pufferausgang definiert. Durch einen Sortierer, der den Namen des Arbeitsplatzes trägt und sich vor dem Puffereingang befindet, werden die ankommenden Rohteile auftragsbezogen sortiert und auf die freien Arbeitsstationen umgelagert.

In der folgenden Abbildung sieht man 3 Arbeitsstationen der mechanischen Fertigung ME01. Die Arbeitsstationen sind über Kanten mit dem Sortierer (auftragsbezogene Sortierung) verbunden.

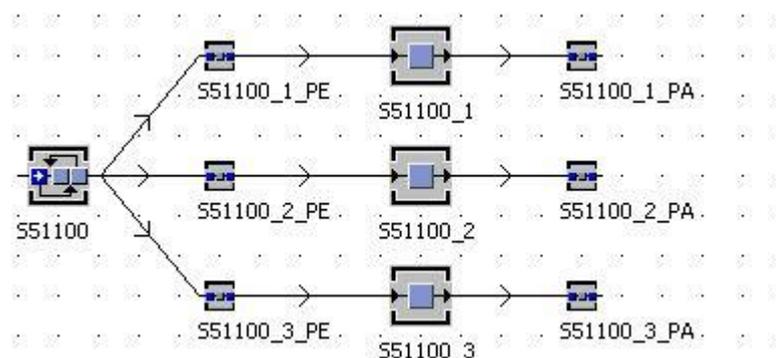


Abbildung 37: Ausschnitt aus der mechanischen Fertigung ME01 mit 3 Arbeitsstationen

Beschreibung und Bezeichnung:

- S51100: ist die Bezeichnung des Arbeitsplatzes, der aus mehreren Maschinen bestehen kann.
- _1, _2, _3: sind die Einzelnen Maschinen des Arbeitsplatzes
- _PE: ist der Puffereingang der Maschine
- _PA: ist der Pufferausgang der Maschine

Die auftragsbezogene Sortierung erfolgt über die Chargennummer der Bauteile. Dabei handelt es sich um eine aufsteigende Zahl, bestehend aus Kalenderwoche und Materialnummer z.B.:

wird ein Bauteil aus der ersten Kalenderwoche, mit der Materialnummer 401343, beziffert. Hierbei ergibt sich eine Chargennummer von 1401343. Dieses Bauteil wird einem anderen mit einer höheren Chargennummer (z.B. Kalenderwoche 5 selber Bauteil) vorgezogen ($1401343 < 5401343$).

Durch die Sortierung wird eine Priorisierung erreicht. Die Bauteile die am frühesten benötigt werden, werden als erstes gefertigt.

4.2.3.2 Methoden der mechanischen Fertigung

Die für die Ablaufsteuerung nötigen Methoden des Simulationsmodells werden in Folge kurz erklärt.

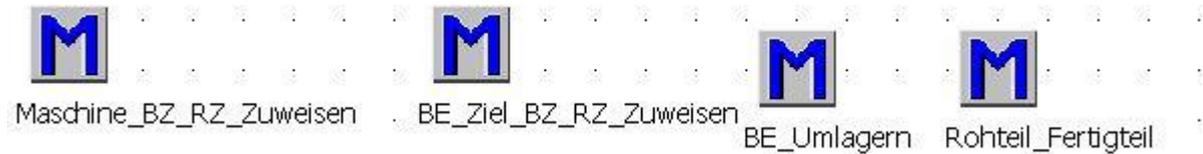


Abbildung 38: Methoden der mechanischen Fertigung

Methode Maschine_BZ_RZ_Zuweisen:

Diese Methode wird aufgerufen sobald die Ausgangssteuerung des Eingangspuffers (PE) von einem beweglichen Element (BE) ausgelöst wird. Die Bearbeitungszeit und Rüstzeit wird aus dem beweglichen Element eingelesen und auf die Maschine übertragen. Sobald das Übertagen vollbracht ist, wird das Element auf die Maschine umgelagert. Beim Auslesen des beweglichen Elements werden auf seine benutzerdefinierten Attribute zugegriffen.

	string 1	integer 2	boolean 3	string 4	real 5	time 6	date 7	date 8
string	Attributname							
1	Lieferdatum						03.12.2012	
2	Komponente			ZYLINDERKOPF_ROH				
3	Materialnummer	401754						
4	Chargennummern	1401754						
5	Arbeitsplan	0						
6	Arbeitsplan_Zeile	0						
7	Stueckliste_Zeile	21						
8								
9								
10								
11								
12	Produkt	401112						
13	Baugruppe	401112						
14	Finish_Date_Motor						31.12.2012	
15	Folge_Komponente			ZYLINDERKOPF				
16	Folge_Materialnummer	401753						
17	Folge_Stueckliste_Zeile	20						
18	Folge_Arbeitsstation			551100				
19	Folge_Bearbeitungszeit					6:00.0000		
20	Folge_Ruestzeit					20:00.0000		
21	Folge_Arbeitsstation_Vorher			0				
22	Materialnummer_String			401754				
23	Folge_Arbeitsplannummer	41753						
24	Folge_Arbeitsplan_Zeile	76						
25	Folge_Lieferdatum							10.12.2012

Abbildung 39: Benutzerdefinierte Attribute des Rohteils Zylinderkopf_Roh (Folge_Bearbeitungszeit und Folge_Ruestzeit werden vor der Bearbeitung ausgelesen)

Methode-BE_Ziel_BZ_RZ_Zuweisen:

Der Aufruf der Methode erfolgt sobald ein BE die Eingangssteuerung des Ausgangspuffers, einer Arbeitsstation auslöst. In dieser Methode wird in der nächsten Zeile, im Arbeitsplan nach dem folge Arbeitsplatz, Rüstzeit und Bearbeitungszeit gesucht. Die Daten für den weiteren Ablauf wie folge Arbeitsstation, Rüstzeit und Bearbeitungszeit werden in das bewegliche Element gespeichert. Wenn es keinen folge Arbeitsplatz gibt, wird als nächstes Ziel der Ausgangspuffer des Netzwerks als Ziel eingetragen.

Methode-BE_Umlagern:

Diese Methode wird bei der Ausgangssteuerung des Ausgangspuffers ausgelöst. Die Methode liest den folge Arbeitsplatz aus dem beweglichen Element und lagert es auf den jeweilige Arbeitsplatz um (Sortierer oder Ausgangspuffer).

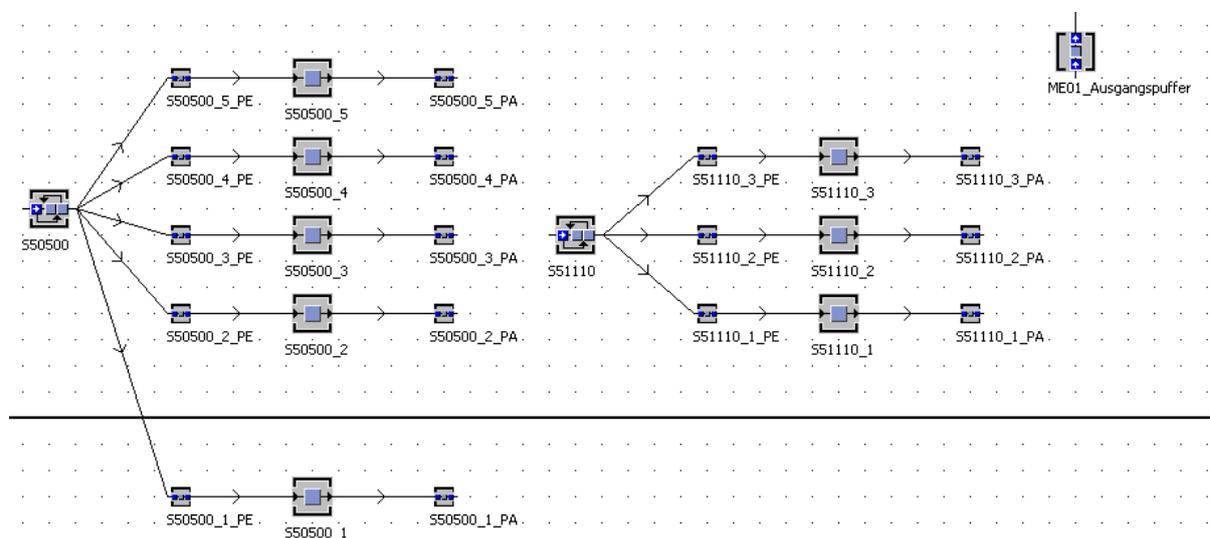


Abbildung 40: Ausschnitt aus der mechanischen Fertigung ME01 (mehrere Arbeitsplätze mit Ausgangspuffer)

Methode-Rohteil_Fertigteil:

Diese Methode wird beim Eintreten in den Ausgangspuffer des Netzwerks aufgerufen. Beim Aufrufen der Methode wird in der Stückliste gesucht, in welcher Baugruppe dieses Bauteil verbaut ist und das Folgenetzwerk eingetragen.

Die Arbeitsstation:

Beim Eintreffen des Elements in die Arbeitsstation wird verglichen ob die Materialnummer des Elements dieselbe Materialnummer besitzt, wie das Element vorher. Gab es keine Materialnummernänderung (selber Motortyp) wird das Bauteil laut Bearbeitungszeit bearbeitet. Falls sich die Materialnummer geändert hat (Bauteil eines anderen Motortyps) erfolgt erst ein Umrüsten laut Rüstzeit mit anschließendem Bearbeiten. Nach dem Bearbeiten und eventuellem Umrüsten erfolgt ein Umlagern auf den Ausgangspuffer (PA).

4.2.4 Montage

In der Montage werden systembereichsabhängig Einzelteile zu Baugruppen oder fertigen Motoren zusammengebaut. Die Simulation wird durch zeitgesteuertes Anliefern der benötigten Einzelteile und Baugruppen umgesetzt.

Sobald die Einzelteile in der Montage ankommen, werden sie in einer Tabelle registriert. Beim Einlagern der Baugruppen, werden die entsprechenden Einzelteile der Baugruppe vernichtet (aus der Tabelle gelöscht) und die Baugruppe wird in den Montageprozess umgelagert. Falls noch nicht alle benötigten Bauteile vorhanden sind wird die Baugruppe in einem Lager zwischengelagert.

4.2.4.1 Umsetzung der Montagesimulation

Die Netzwerke der Montagebereiche besitzen zwei getrennte Übergänge. Ein Übergang wird für die Einzelteile (_ET) verwendet, der andere für die Baugruppen (_BG). Die Einzelteile erreichen als erstes die Station Einlagern _ET.

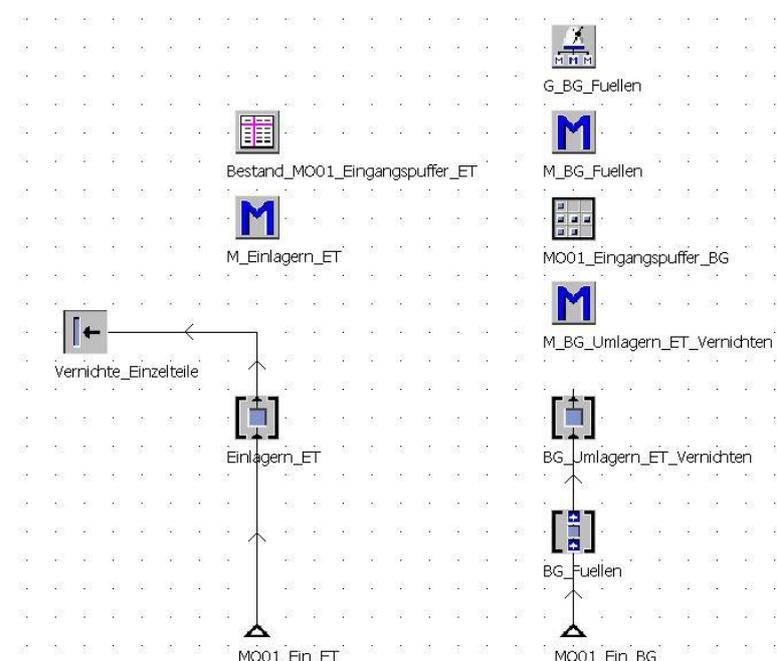


Abbildung 41: Montageeingang Darstellung MO01 Kolbenmontage

4.2.4.2 Methoden der Montage

Beim Auslösen der Ausgangssteuerung (Einlagern_ET) wird die Methode M_Einlagern_ET aufgerufen.

Methode-M_Einlagern_ET:

In der Methode M_Einlagern_ET werden die benutzerdefinierten Attribute des beweglichen Elements eingelesen und in die Bestandstabelle übertragen. Nachdem die Attribute übergeben wurden, werden die Einzelteile in der Senke vernichtet.

Baugruppen:

Die Baugruppen gelangen über den Netzwerkübergang *Ein_BG* als erstes zu der Station *BG_Füllen*. Diese Station hat eine Pufferfunktion und eine weitere Aufgabe, auf die später genauer eingegangen wird. Nach der Station *BG_Füllen* erreichen die Baugruppen die Station *BG_Umlagern_ET_Vernichten*.

In der Ausgangssteuerung von *BG_Umlagern_ET_Vernichten* wird die Methode *M_BG_Umlagern_ET_Vernichten* aufgerufen.

Methode *M_BG_Umlagern_ET_vernichten*:

Bei dieser Methode werden aus dem beweglichen Element Informationen über die Baugruppe gelesen. Die Anzahl und die einzelnen Bestandteile dieser Baugruppe sind als benutzerdefinierte Attribute in der Baugruppe gespeichert.

z.B. Über das Attribut *Bauteil_Nummer_1* und *Bauteil_Nummer_1_Anzahl* kann die Methode mit der Bestandstabelle der Einzelteile vergleichen, ob alle Einzelteile zur Verfügung stehen. Ist ein benötigtes Einzelteil vorhanden wird das benutzerdefinierte Attribut *Bauteil_Nummer_x_Anzahl* um den Wert 1 erniedrigt und das Bauteil aus der Tabelle gelöscht. Dasselbe passiert bei *Bauteil_Nummer_2* usw. Wenn alle Bauteile vorhanden sind werden die Baugruppen in den Eingangspuffer des ersten folge Arbeitsplatzes umgelagert. Falls ein benötigtes Einzelteil nicht vorhanden ist wird die Baugruppe ohne weitere Veränderung der Attribute in den Eingangspuffer_BG umgelagert (Zwischenpuffer).

	string 1	integer 2	boolean 3	string 4	real 5	time 6	date 7	da 8
string	Attributname							
1	Lieferdatum						03.12.2012	
2	Komponente			KOLBEN_ASM				
3	Materialnummer	401778						
4	Chargennummern	1401778						
5	Arbeitsplan	41778						
6	Arbeitsplan_Zeile	87						
7	Stueckliste_Zeile	13						
8	Folge_Arbeitsstation			S52100				
9	Folge_Bearbeitungszeit					1:00.0000		
10	Folge_Ruestzeit					0.0000		
11								
12	Produkt	401112						
13	Baugruppe	401112						
14	Finish_Date_Motor						31.12.2012	
15	Verbaut_in_Komponente			KOLBEN_PLEUEL_ASM				
16	Verbaut_in_Materialnumme	401980						
17	Verbaut_in_Stueckliste_Zeil	10						
18	Verbaut_in_Arbeitsstation			S52200				
19	Bauteil_Nummer_1	1401468						
20	Bauteil_Nummer_1_Anzahl	1						
21	Bauteil_Nummer_2	1401936						
22	Bauteil_Nummer_2_Anzahl	1						
23	Bauteil_Nummer_3	1401940						
24	Bauteil_Nummer_3_Anzahl	1						
25	Bauteil_Nummer_4	0						
26	Bauteil_Nummer_4_Anzahl	0						

Abbildung 42: Benutzerdefinierte Attribute der Baugruppe *Kolben_ASM*

Methode M_BG_Fuellen

Die Methode M_BG_Fuellen wird durch einen Generator angesteuert. Dieser simuliert einen Lagerarbeiter der alle 24 Stunden nachkontrolliert ob alle Bauteile, für die im Zwischenpuffer gelagerten Baugruppen vorhanden sind. Dabei werden alle Baugruppen aus dem Zwischenpuffer (Eingangspuffer_BG) in den Puffer BG_Fuellen umgelagert damit durchlaufen sie ein weiteres Mal die Station BG_Fuellen_ET-Vernichten. Diese Baugruppen durchlaufen somit jeden Tag die Kontrolle bis alle benötigten Einzelteile verfügbar sind.

Der Montageprozess verläuft ähnlich wie es bei der mechanischen Fertigung geschieht.

Die Bearbeitungszeiten, Rüstzeiten und folge Arbeitsplatz werden aus dem beweglichen Element eingelesen, die Bauteile bearbeitet und mittels Arbeitsplänen und Stücklisten die weiteren Attribute und der folge Arbeitsplatz zugewiesen.

4.2.5 Lagerhaltung

Die Lagerhaltung und der Bestand im Lager werden über Tabellen gesteuert. Somit kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Simulation der Lagerbestand eingesehen werden.

Dabei wird die Chargennummer des Bauteils, die Anzahl an Bauteilen dieser Chargennummer, das Auslieferungsdatum und der Name des Bauteils vermerkt. Zusätzlich kann, über das Lieferdatum, kontrolliert werden, ob alle Bauteile für die Montageprozesse rechtzeitig eingetroffen sind.

Index	Chargennummern	Anzahl_vorhanden	Lieferdatum	Name
30403096	30403096	180	24.06.2013	KURBELWELLE
30403128	30403128		08.07.2013	MOTORBLOCK_ASM
30403135	30403135		15.07.2013	MOTORBLOCK_KURBELTRIEB_ASM
30403342	30403342	180	24.06.2013	MOTORBLOCK
30403457	30403457		22.07.2013	MOTOR_VORMONTAGE_ASM
30403467	30403467		15.07.2013	ZYLINDERKOPF_ASM
30403753	30403753		24.06.2013	ZYLINDERKOPF
30403778	30403778		01.07.2013	KOLBEN_ASM
30403864	30403864	720	24.06.2013	PLEUEL_STANGE
30403980	30403980		08.07.2013	KOLBEN_PLEUEL_ASM
30602096	30602096	150	24.06.2013	KURBELWELLE

Abbildung 43: Auszug aus dem Lager LO05 (Bestand)

4.2.6 Überblick über das Simulationsmodell

In der Folgenden Abbildung sind die Struktur und der Aufbau des Simulationsmodells ersichtlich.

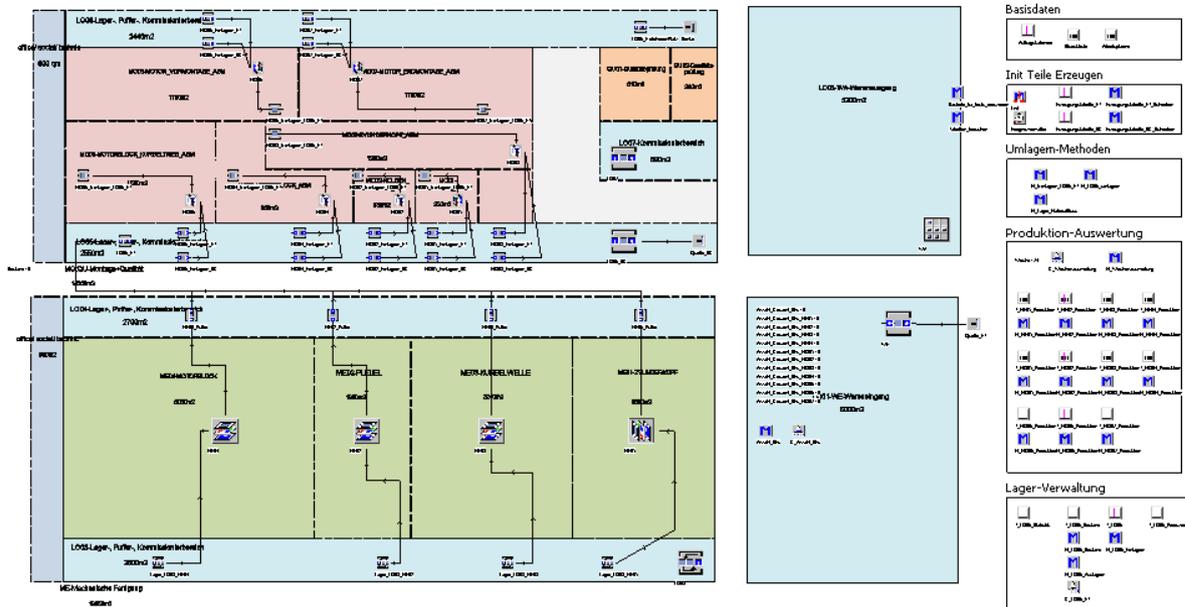


Abbildung 44: Überblick über das Simulationsmodell

Um die Fabrik übersichtlich zu gestalten werden die einzelnen Systembereiche mittels Netzwerken dargestellt in denen die Bearbeitung und Montage erfolgt. Diese Netzwerke sind ein Teil eines übergeordneten Gesamtnetzwerks. Auf der rechten Seite befinden sich die Basisdaten (Arbeitsplan, Auftragskalender, Stückliste), die Initialisierung Methoden mit Bauteilerzeugung, die Methoden für Umlagerungsvorgänge und Methoden und Tabellen für die Auswertung und Lagerhaltung.

4.2.7 Geschwindigkeitsoptimierung der Simulation

Um mehrere Simulationsläufe mit verschiedenen Einstellungen durchführen zu können sollte versucht werden die Simulationszeit zu reduzieren, um schneller an Simulationsergebnisse zu gelangen.

Da die Simulation in der ersten lauffähigen Version mehrere Tage lief, musste eine Geschwindigkeitsoptimierung durchgeführt werden. Diese Lösungen wurden in Onlineforen gefunden, da die Hilfefunktion von Plant Simulation für solche Probleme keine Lösungen anbietet.

4.2.7.1 Profiler

Die erste Geschwindigkeitsverbesserung wurde durch Untersuchung der Simulation mittels Profiler erreicht. Im Profiler werden nach einem vollen Simulationslauf alle Methoden, deren Aufrufhäufigkeit und infolge dessen der erzeugte Zeitverzug aufgelistet. Durch Änderungen an den Methoden wurde die erste Geschwindigkeitserhöhung erreicht.

4.2.7.2 Untersuchen des Speicherbedarfs

Die zweite Verbesserung gelang durch die Untersuchung des Speicherbedarfs, der Simulationsobjekte. Durch das Attribut memUsage und Befehl „Objekt suchen“ kann der Speicherbedarf eines Objekts angezeigt werden. Objekte die viel Speicher verwenden, können damit ermittelt und anschließend optimiert werden.

4.2.7.3 Reduzierung der beweglichen Elemente

Die dritte Verbesserung gelang durch die Reduzierung der beweglichen Elemente. Durch eine Auswertung wurde zuerst ermittelt wie viele bewegliche Elemente die Simulation durchlaufen. Die Auswertung ergab einen Wert von 4.504.030 beweglichen Elementen, die erzeugt und vernichtet werden. Um die Simulation zu beschleunigen, muss die Anzahl dieser Elemente nach der Weitergabe von Information vernichtet werden. Dabei wurden die Baugruppeneinzelteile beim Eintreffen in die Montageabteilung in einer Tabelle registriert und anschließend vernichtet, anstatt die Einzelteile zwischen zu Lagern und auf die Baugruppe zu warten.

Diese Optimierung brachte bis dahin die größte Verbesserung.

4.2.7.4 Optimierung der Methodenprogrammierung

Durch anfragen in einem Hilfeforum wurde der Code der Methode M_BG_Umalgern_ET_vernichten untersucht und Verbesserungsvorschläge angeboten, da laut Profiler diese Methode den größten Zeitverzug verursacht.

„Beim Löschen der Bauteile aus der Tabelle sollten Sie die Zeile löschen, sonst wird die Tabelle immer größer:

anstatt:

Bestand_MO03_Eingangspuffer_ET.loeschen({0,i}..{2,i});

besser:

Bestand_MO03_Eingangspuffer_ET.entferneZeile(i);

weiter könnten Sie darüber nachdenken, anstatt die Teile in der Tabelle zu speichern, nur noch den Bestand der Teile in der Tabelle zu speichern (Zugang:

*+1, Abgang: -1). Sie könnten dazu den Teilnamen als Zeilenindex verwenden. Damit sparen Sie sich das Suchen komplett.“
(<http://ww3.cad.de/foren/ubb/Forum262/HTML/001773.shtml#000001>)*

Hierbei wurden beide Verbesserungsvorschläge untersucht. Schließlich wurde eine Entscheidung zu Gunsten der Lösung mittels Tabellenindex getroffen, da diese Lösung die besseren Ergebnisse lieferte.

Durch diese Verfahren konnte die Simulation um ein vielfaches beschleunigt werden. Das erste Simulationsmodell benötigte für einen Durchlauf einige Tage. Nach den Optimierungen betrug ein voller Simulationsdurchlauf 20 Minuten.

5 Durchführen der Simulationsläufe

In diesem Kapitel erfolgt die Durchführung der Simulationsexperimentreihen, die Ergebnisse der Experimente werden ausgewertet und dokumentiert. Die Verfahren zur gewählten Optimierung und deren Optimierungsziele werden erläutert.

5.1 Optimierungsziel

Um eine Optimierung am Simulationsmodell vornehmen zu können müssen zuerst die Optimierungsziele definiert werden. Daraus kann die Vorgehensweise der Optimierung ermittelt werden.

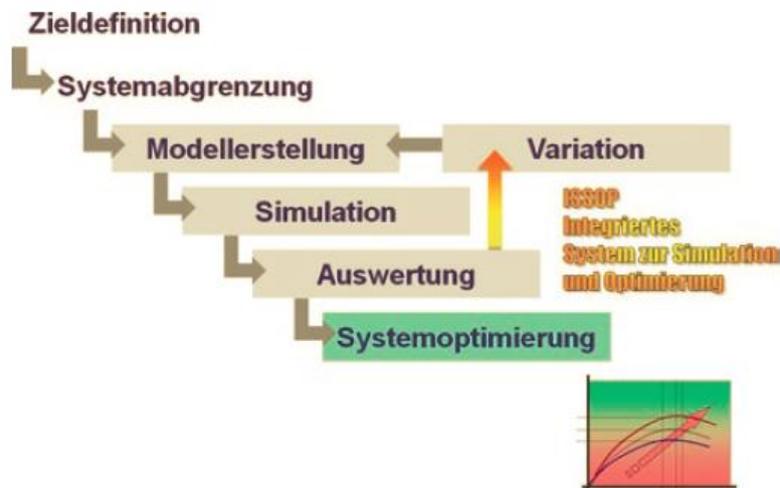


Abbildung 45: Entwicklung eines Optimierungsprozesses [MKR(+)¹⁰, S.190].

Bei der Betrachtung von Prozessen, die direkt oder indirekt die Fertigung und Logistik der Zulieferteile beeinflusst, werden in der Praxis folgende primäre Zielgrößen identifiziert:

- Kosten minimieren
- Lagerbestände senken
- Ressourcen bestmöglich auslasten
- Durchlaufzeiten senken
- Termintreue halten

Daraus können für die Fertigungssteuerung die Zielgrößen

- optimale Sequenz der Fertigungsaufträge und
- optimale Schichtpläne

abgeleitet werden (vgl. [MKR(+)¹⁰, S.106).

5.1.1 Stellgrößen

Durch den Einsatz von Simulations- und Optimierungswerkzeugen können durch Veränderung von Eingangsparametern optimale Planungsergebnisse erzielt werden. In der folgenden Grafik handelt es sich z.B. um eine Reihenfolgeoptimierung der Aufträge unter Berücksichtigung der veränderlichen Parameter und Variablen (Schichtmodell, Auftragssequenz). Bei neu einzuordnenden zeitnahen Auftragseingängen wird die Sequenz so bestimmt, dass die oben genannten Ziele Pareto-optimal gelöst werden (auch Kompromisslösungen genannt) (vgl. [MKR(+)]10], S.107f).

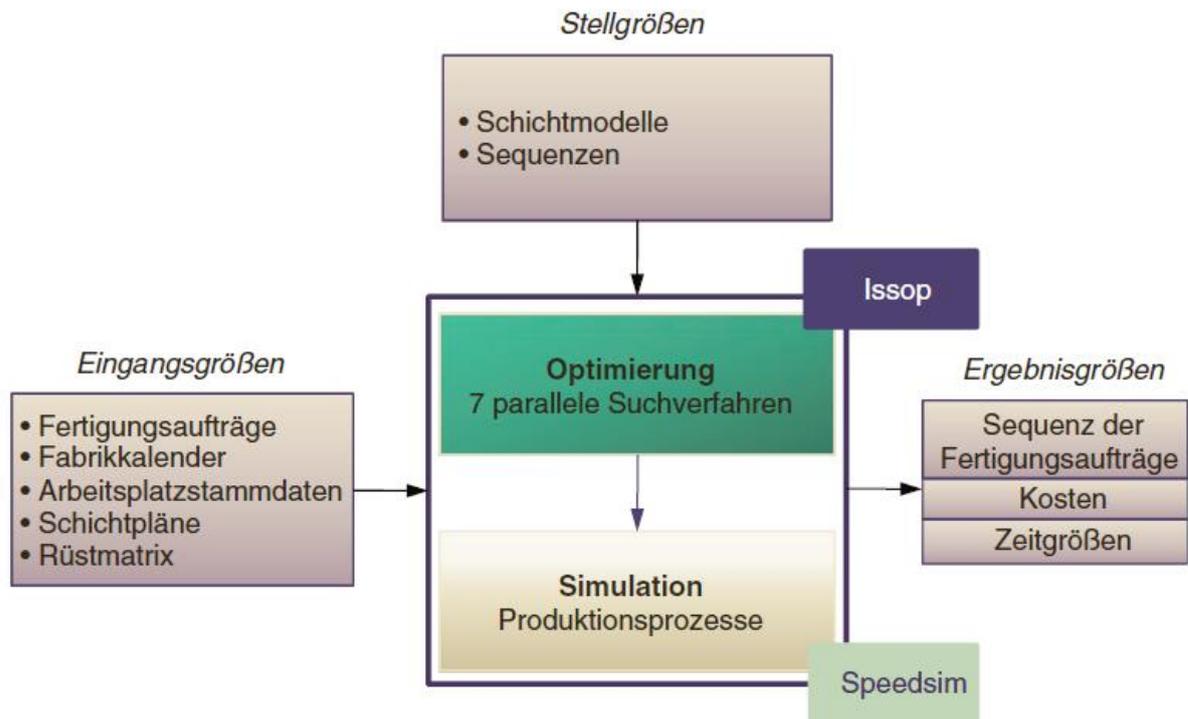


Abbildung 46: Überblick Zusammenhänge ([MKR(+)]10], S.107).

Aus diesen und den Erkenntnissen des Kapitels 2.7 Grundlagen-Kapazitätsplanung folgt für die spätere Optimierung der Motorenfabrik, dass mit folgenden Optimierungsansätzen (Stellgrößen) vorgegangen werden kann:

- Anpassen des Schichtkalenders
- Auftragskalendervorzug von Aufträgen
- Fremdfertigung von Bauteilen oder Baugruppen
- Erhöhung des Maschinenparks

5.2 Experimentieren

Im Kapitel Experimentieren werden die Auswertemöglichkeiten des Modells, die Simulationsversuchsplanung und die durchgeführten Experimente beschrieben.

5.2.1 Auswertemöglichkeiten

Zur besseren Versuchsauswertung wurde die Simulation mit mehreren Auswertemöglichkeiten versehen. Durch diese Auswertemöglichkeiten können erstens die Richtigkeit der Simulation geprüft werden und zweitens Informationen für die Optimierung erhalten werden. Zu den Auswertemöglichkeiten zählen:

- Auswertung von Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten
- Auswertung der Anzahl produzierter Bauteile und Baugruppen
- Auswertung der Auslastungsgrade

5.2.1.1 Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten

In den einzelnen Netzwerken werden bei jeder Bearbeitung eines Bauteiles die Bearbeitungszeiten und Rüstzeiten der Maschinen registriert sowie aufsummiert und aufgezeichnet. Die Aufzeichnung erfolgt dabei wochenweise und wird zusätzlich im Verhältnis zu den produzierten Stückzahlen dargestellt.

5.2.1.2 Produzierte Bauteile und Baugruppen

Um eine bessere Kontrolle über die produzierten Bauteile und Baugruppen zu erhalten werden die Bauteile beim Verlassen eines Netzwerkes registriert und in eine Tabelle übertagen. Dabei kann die Anzahl der produzierten Teile vom jeweiligen Motortyp eingesehen werden. Zur Kontrolle ob alle Teile in dieser Kalenderwoche (im Netzwerk) fertiggestellt wurden wird die Anzahl der Eingänge in das Netzwerk mit der Anzahl der Ausgänge verglichen.

5.2.1.3 Auslastungsgrade

Bei den Experimenten werden die Auslastungsgrade der einzelnen Arbeitsstationen ermittelt und die Daten zu einem kumulierten Mittelwert zusammengefasst. Die Ergebnisdaten werden in ein Diagramm übertragen. Dabei werden alle Maschinen eines Netzwerkes in einem Diagramm dargestellt. Die Auswertung der Auslastungsgrade erfolgt dabei wochenweise.

5.2.2 Simulationsversuchsplanung

Ziel der Simulationsversuchsplanung ist es die Fabrik dahin zu optimieren, dass in allen Produktionswochen eine gleichmäßige Kapazitätsauslastung mit hoher Produktivität besteht und zusätzlich die Liefertermine eingehalten werden können. Für die Optimierung und Validierung der ITL-Demofabrik werden vier Maßnahmen vorgeschlagen.

M1-Anschaffung von Arbeitsstationen (Maschinen, Manueller Arbeitsstation)

M2-Anpassung der Schichtbetriebe an die Auslastung

M3-Kapazitätsanpassung, Reduzierung der Auftragsmenge, Fremdvergabe, Anpassung an die Auslastungsgrade der Arbeitsplätze

M4-Vorzug von Aufträgen

Experiment ID	Änderung am Modell	Erwartetes Ergebnis
1	<ul style="list-style-type: none"> - 3-Schicht Betrieb der gesamten Fabrik (24h/5 Tage) - Entkoppelung der Montagesysteme - Ohne Feiertage 	Erste Abschätzung der Auslastungsgrade der einzelnen Systeme im Ist-Zustand der Fabrik
2	<ul style="list-style-type: none"> - 3-Schicht Betrieb (24h/5 Tage) - Erhöhung der Anzahl an Arbeitsstationen - Entkoppelung der Montagesysteme - Ohne Feiertage 	Einhaltung der Liefertermine über die gesamte Produktionsphase
3	<ul style="list-style-type: none"> - 2-Schicht Betrieb außer Systeme erhöhten Auslastungen - Kapazitätsanpassung 	Optimale Anpassung des Auftragskalenders an die Kapazitäten

Abbildung 47: geplante Experimente

Bei den ersten Geschwindigkeitsoptimierungen stellte sich heraus, dass es sogar bei einem 24 Stunden Betrieb (3-Schichten an 5 Tagen pro Woche), zu Verzögerungen der Liefertermine kommt.

5.2.3 Experiment Nummer 1

Beim ersten Experiment wurde die derzeitige Ist-Fabrik (aktueller Planungsstand) im 24 Stunden Modus 5 Tage die Woche sowie ohne Feiertage simuliert. Durch die Auswertung dieser Ist-Daten konnten die ersten Abschätzungen getroffen werden, welche Systembereiche der Fabrik überlastet sind oder ob ein Ressourcenpuffer zum Einsetzen von Schichtplänen vorhanden ist.

Bei diesem Experiment wurden, durch die Abhängigkeiten der einzelnen Montagenezwerke, die Terminpläne nicht eingehalten. Somit konnten die fertigen Motoren nicht zum Auslieferungsdatum fertiggestellt werden. Zum Vergleich wurden von den Montagenezwerken Diagramme erstellt, bei denen die Netzwerke unabhängig voneinander arbeiten. Um die Auswirkung zu hoher Auslastungsgrade der Vormontage und mechanischen Fertigung auf die Endmontagen zu verdeutlichen, wurden Vergleichsdiagramme erstellt. (Anhang)

Simulation Start	26.11.2012 00:00:00
Simulation Ende	30.4.2014 00:00:00
Schichtkalender	3 Schichten
Optimierungen	keine
Auslieferungstermin eingehalten	Nein (18.2.2013)
Feiertage	keine

Tabelle 13: Simulationsparameter Experiment Nummer 1

Bei den Simulationen mit Abhängigkeiten konnten ab dem 18.2.2013 bis zum Ende der Simulation die Liefertermine nicht eingehalten werden. Die Verzögerungen wurden aufgrund von zu hoher Auslastungen, der Vormontage-Netzwerke und der mechanischen Fertigung verursacht. In der folgenden Abbildung erkennt man links den Auslastungsgrad pro Woche der Montage MO05, der Auslastungsgrad übersteigt dabei nie den Wert von 50% da die Zuliefersysteme dieser Montage nicht rechtzeitig liefern können. Auf der rechten Seite wurde die Montage von den Zuliefersystemen entkoppelt und unabhängig von den Lieferterminen der Einzelteile simuliert. Dabei erkennt man die höheren Auslastungsgrade über die gesamte Produktionsphase.

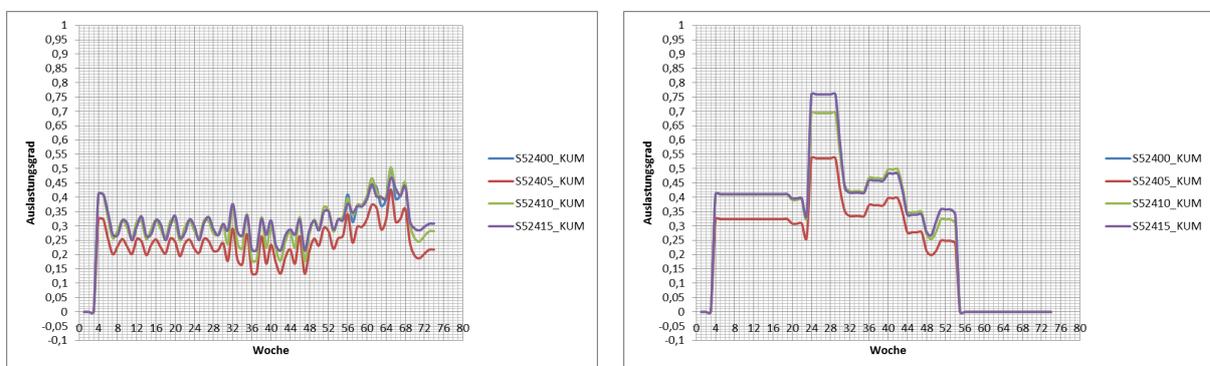


Abbildung 49: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO05. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenezwerke links und ohne gegenseitige Beeinflussung rechts.

5.2.4 Experiment Nummer 2

Auf der Grundlage der Erkenntnisse des ersten Experiments wurden Optimierungen am Modell durchgeführt.

Einige Maschinen der Netzwerke MO01 und MO02 sind selbst bei einem 3 Schichtbetrieb überlastet, über das ganze Produktionsjahr hinweg wurde eine Auslastung von 100% registriert. Wie in folgender Grafik ersichtlich wurde bei dem Arbeitsplatz S52205 eine 100% Auslastung im 3-Schicht Betrieb von der vierten Produktionswoche bis zu zweiundsiebzigste Produktionswoche erreicht. Da es sich bei dem Montagesystem um den Zusammenbau vom Pleuel mit Kolben also eine Vormontage handelt, kommt es somit im gesamten Montageprozess zu Verzögerungen.

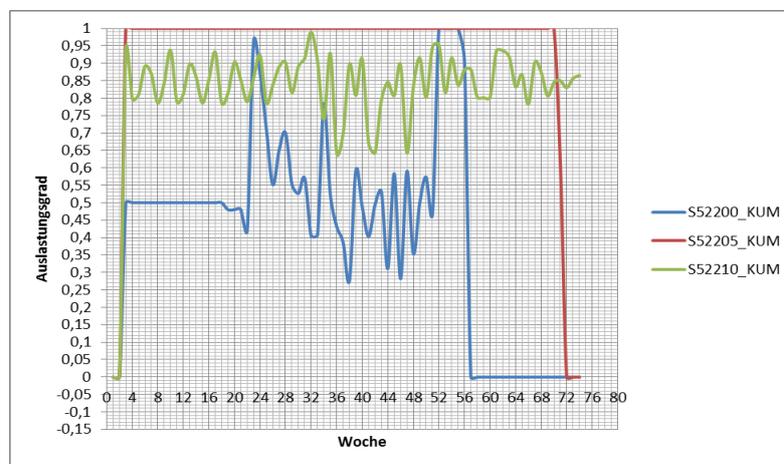


Abbildung 50: Auslastungsgrad pro Woche, des Netzwerks Montage MO02.

Simulation Start	26.11.2012 00:00:00
Simulation Ende	30.4.2014 00:00:00
Schichtkalender	3 Schichten
Optimierungen	Maschinen in MO01 und MO02 hinzugefügt
Auslieferungstermin eingehalten	Ja
Feiertage	keine

Tabelle 14: Simulationsparameter Experiment Nummer 2

Deshalb wurde bei der Optimierung der Netzwerke MO01 und MO02 das Verfahren der Maschinenparkvergrößerung gewählt, da eine Änderung der Schichtpläne oder eine Reihenfolgenoptimierung keine Verbesserung bringen würde.

Für weitere Testläufe wurden Stationen hinzugefügt.

Montagebereich	Erweiterung um Arbeitsstation
MO01	S52105_3
	S52105_4
	S52110_2
MO02	S52205_2
	S52205_3
	S52210_3
	S52210_4
	S52210_5

Tabelle 15: Hinzugefügte Arbeitsstationen

Durch diese Optimierung entstehen in diesen Netzwerken über das ganze Produktionsjahr gesehen keine Stauungen mehr. Somit ergibt sich durch zu hohe Auslastungsgrade keine Beeinflussung der Liefertermine. In der folgenden Grafik wurde die Anzahl der Arbeitsstationen der Montage MO02 erhöht. Der Auslastungsgrad der Maschinen liegt im Durchschnitt bei ca. 70% (Ausnahme Produktionswoche 24 bis 28). Die einzelnen Spitzen der Auslastung entstehen durch Feiertage und höhere Auftragsmengen, die im Experiment 3 behandelt werden.

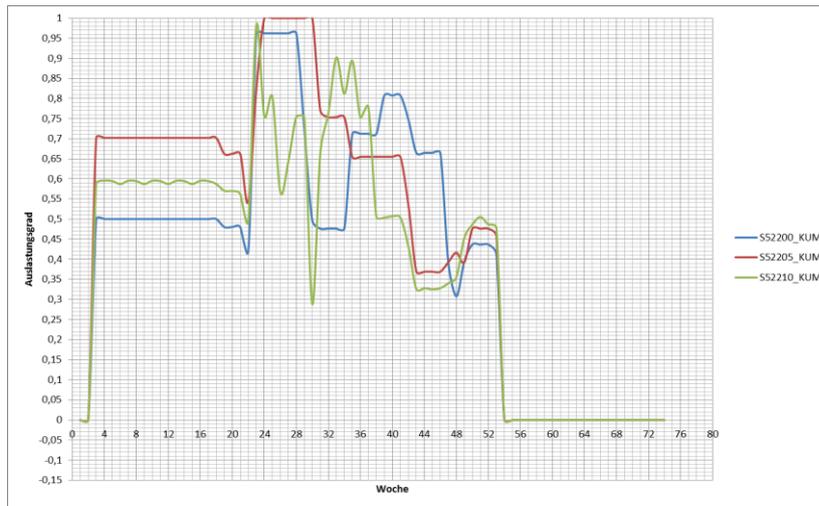


Abbildung 51: Auslastungsgrad pro Woche, des Netzwerks Montage MO02 (Arbeitsstation Anzahl erhöht, mit Feiertagen)

5.2.5 Experiment Nummer 3

Bei der Auswertung der ersten zwei Experimente ist klar erkennbar, dass alle Netzwerke in der Kalenderwoche 28 eine hohe Auslastung besitzen. Auf dieser Erkenntnis und der Vorgabe einen möglichst 2-Schicht Betrieb der Fabrik zu bewerkstelligen, wurde eine Lösung gesucht, die eine Optimierung der Kapazitätsauslastung durch Terminvorzug oder Anpassung des Auftragskalenders beabsichtigt.

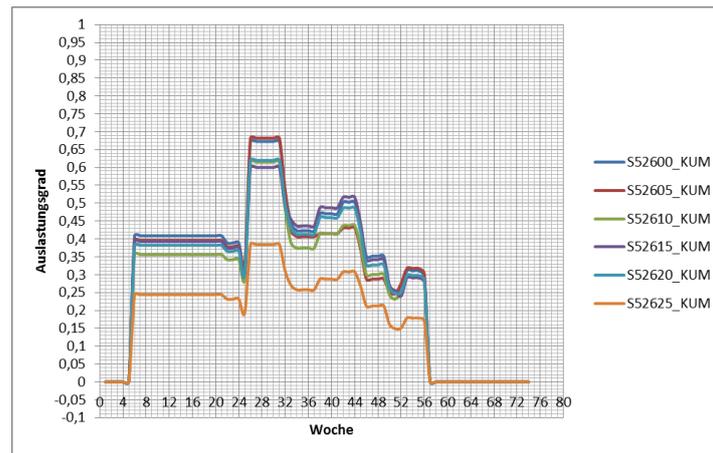


Abbildung 52: Auslastung der Motor Endmontage MO07 im 3-Schicht Betrieb, vor der Kapazitätsplanung.

Simulation Start	26.11.2012 00:00:00
Simulation Ende	30.4.2014 00:00:00
Schichtkalender	2 Schichten außer: MO01 alle Arbeitsplätze (3-Schicht) MO02 alle Arbeitsplätze (3-Schicht) ME02 Arbeitsplatz S51205 (3-Schicht) ME04 Arbeitsplatz S51240 (3-Schicht)
Optimierungen	Maschinen in MO01 und MO02 hinzugefügt, Kapazitätsplanung
Auslieferungstermin eingehalten	Ja
Feiertage	berücksichtigt

Tabelle 16: Simulationsparameter Experiment Nummer 3

Durch Beobachtungen der Montageabteilung MO07 Motor_Endmontage im 2-Schicht Betrieb konnte eine grobe Grenzkapazität ermittelt werden. Diese ist von der Typanzahl (R4-, V6-, V8-Motoren) und der Anzahl der zu produzierenden Motoren abhängig. Diese Erkenntnisse sind auf die höheren Rüstzeiten bei mehreren Motorentypen und die höheren Bearbeitungszeiten der 8 Zylindermotoren zurückzuführen. Wenn z.B. mehr 8 Zylinder Motoren gefertigt werden, sinkt die Grenzkapazität.

Bei einem 2-Schicht Betrieb liegen die Grenzkapazitäten bei:

Werkstage	Grenzkapazitäten		
	4 Motortypen pro Woche	3 Motortypen pro Woche	2 Motortypen pro Woche
4 Werkstage	-	Ca. 430 Motoren	-
5 Werkstage	Ca. 560 Motoren	ca. 580 Motoren	Ca. 600 Motoren

Tabelle 17: Grenzkapazitäten der Montage MO07, abhängig von der Anzahl an Werktagen und Anzahl der Motorentypen pro Woche

Deshalb wurde aufgrund der Auslastung der Montageabteilung MO07 eine Kapazitätsplanung durchgeführt. Die Anzahl der Motoren im Auftragskalender wurde an den Montagebereich MO07 angepasst.

Durch schrittweise Anpassung des Auftragskalenders wurde eine Glättung über das gesamte Produktionsjahr erreicht und somit eine bessere und wirtschaftlichere Nutzung der Ressourcen erzielt. In der folgenden Abbildung erkennt man eine Auslastung von 85% bis 90% über das ganze Produktionsjahr, Ausnahme ist der Arbeitsplatz S52625. Bei diesem Arbeitsplatz würde die Auslastung bei der Einführung und Reduktion auf den 1-Schicht Betrieb bei 100% liegen und somit wäre der Arbeitsplatz überlastet.

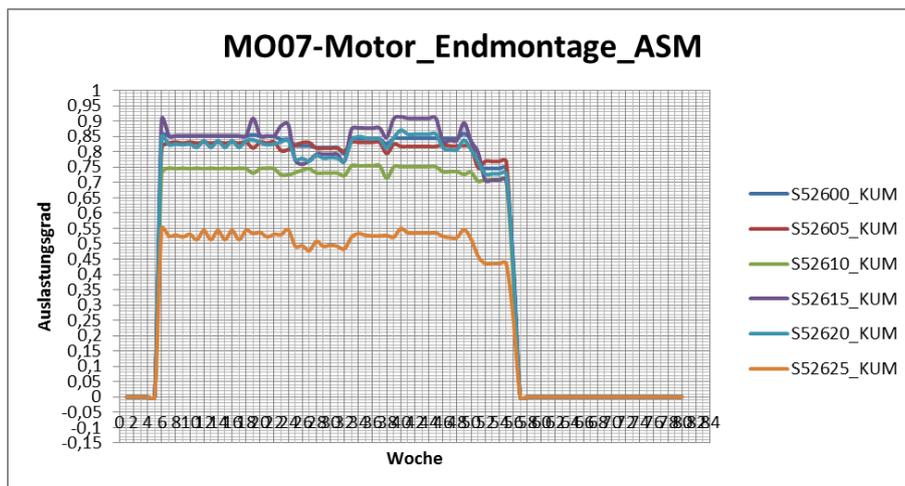


Abbildung 53: Motor Endmontage (2-Schicht Betrieb, Glättung des Auslastung, inkl. Feiertage)

Durch diese Optimierung ergab sich ein neuer Auftragskalender, bei dem auch die Feiertage berücksichtigt worden sind.

Feiertage (ohne Einfluß auf Simulation Ro)	Diagrammwoche bezogen auf MO07	Datum BG erstellen	Auftrag	A201D01 R4_1400	A201D02-R4_600	A201D03-R4_2000	A201D04-V6_3000	A201D05-V6_3400	A201D06-V6_3600	A201D07-V8_4400	A201D08-V8_4700	A201D09-V8_5000	Summe Motoren
Di. 01.01.2013, So. 06.01.2013	6	31.12.2012	KW1	50			240			140			430
	7	07.01.2013	KW2	200			240			140			580
	8	14.01.2013	KW3	200			240			140			580
	9	21.01.2013	KW4	200			240			140			580
	10	28.01.2013	KW5	200			240			140			580
	11	04.02.2013	KW6	200			240			140			580
	12	11.02.2013	KW7	200			240			140			580
	13	18.02.2013	KW8	200			240			140			580
	14	25.02.2013	KW9	200			240			140			580
	15	04.03.2013	KW10	200			240			140			580
	16	11.03.2013	KW11	200			240			140			580
	17	18.03.2013	KW12	200			240			140			580
	18	25.03.2013	KW13	200			240			140			580
Mo. 01.04.2013	19	01.04.2013	KW14	50			240			140			430
	20	08.04.2013	KW15	200			240			140			580
	21	15.04.2013	KW16	200			240			140			580
	22	22.04.2013	KW17	200			240			140			580
Mi. 01.05.2013	23	29.04.2013	KW18	65			240				140		430
Do. 09.05.2013	24	06.05.2013	KW19	65			240				140		430
	25	13.05.2013	KW20	335			140				140		600
Mo. 20.05.2013	26	20.05.2013	KW21		300			100			90		490
Do. 30.05.2013	27	27.05.2013	KW22		300			100			90		490
	28	03.06.2013	KW23		300			100			110		590
	29	10.06.2013	KW24		300			100			110		590
	30	17.06.2013	KW25		300			100			110		590
	31	24.06.2013	KW26		300			100			110		590
	32	01.07.2013	KW27		100			100			100		580
	33	08.07.2013	KW28		100	200			150		100		580
	34	15.07.2013	KW29		100	100			150		100		580
	35	22.07.2013	KW30		100	100			150		100		580
	36	29.07.2013	KW31		100	100			150		100		580
	37	05.08.2013	KW32		100	100			150		100		580
Do. 15.08.2013	38	12.08.2013	KW33		100					200		100	430
	39	19.08.2013	KW34		100					200		100	560
	40	26.08.2013	KW35		100					200		100	560
	41	02.09.2013	KW36		100					200		100	560
	42	09.09.2013	KW37		100					200		100	560
	43	16.09.2013	KW38		100					200		100	560
	44	23.09.2013	KW39		100					200		100	560
	45	30.09.2013	KW40		100					200		100	560
	46	07.10.2013	KW41		200					210		100	570
	47	14.10.2013	KW42		200					210		100	570
Sa. 26.10.2013	48	21.10.2013	KW43		200					210		100	570
Fr. 1.11.2013	49	28.10.2013	KW44		60					210		100	430
	50	04.11.2013	KW45		200					230		140	570
	51	11.11.2013	KW46		200					350			550
	52	18.11.2013	KW47		400					200			600
	53	25.11.2013	KW48		400					200			600
So. 08.12.2013	54	02.12.2013	KW49		400					200			600
	55	09.12.2013	KW50		400					200			600
	56	16.12.2013	KW51		100					200			300
Mi. 25.12.2013, Do. 26.12.2013													
		Summe		3565	1900	4660	4700	2970	4770	2240	1735	1610	28150

Abbildung 54: Optimierter Auftragskalender nach der Kapazitätsplanung

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der Diplomarbeit erfolgte eine Einarbeitung in das Thema Fertigungssimulation mit Plant Simulation und SimTalk, wobei die Literatur von Stefen Bangsow verwendet wurde. Durch das Lösen kleiner Übungsbeispiele wurden die Kenntnisse Schritt für Schritt verbessert und das erlangte Wissen angewendet.

Nach der Durchführung der Einarbeitung in die Simulationssoftware folgten Literaturrecherchen zum Thema der digitalen Fabrik, der Modellierung und Simulation in der Materialflusstechnik und das Einlesen in Vorlesungsunterlagen zu der ITL-Motorenfabrik.

Auf dieser Basis wurde ein Lastenheft erstellt um die Ziele und Ergebnisse der Simulation zu konkretisieren. Der zentrale Fokus der Arbeit liegt in der Validierung der Ist-Daten, welche durch statische Planung berechnet wurden.

Die festgelegten Zielgrößen und Ergebnisse der Simulation sollten eine monatsgenaue Auswertung der Auslastungsgrade, Fertigungsstunden und Grenzkapazität für kritische Stationen, eine monatsgenaue Auswertung der Fertigungsstunden auf den Kostenstellen und eine monatsgenaue Auswertung der Anzahl an gefertigten Komponenten sein. Zusätzlich sollte eine Kapazitätsplanung und Anpassung des Auftragskalenders an die bestehenden Ressourcen durchgeführt werden.

Nach dem festlegen der Ergebnisse und Ziele erfolgte das Einarbeiten in die Fabrik mittels einer Ist-Analyse der vorhandenen Fabrikdaten (Excel Datei ITL-Lernfabrik). Bei der Ist-Analyse wurde die Fabrik in Teilbereiche gegliedert und die simulationsrelevanten Informationen den Bereichen zugeordnet.

Auf der Basis der Datenanalyse wurde nach der Erstellung von einem Konzeptmodell ein lauffähiges Fabrikmodell erstellt und um die geforderten Auswertemöglichkeiten erweitert. Das Modell wurde auf die simulationsrelevanten Daten gefiltert und reduziert. Fehlende Fabrikdaten wurden ergänzt und nach Absprache korrigiert.

Den schwierigsten Teil stellte die Bauteilerzeugung dar, da sämtliche Informationen zum Ablauf der Simulation in den beweglichen Elementen gespeichert werden mussten. Durch die Durchführung von Simulationsexperimentreihen und die Ergebnisauswertung wurde erkannt, dass es bei der Kolbenmontage und der Montage von Kolben mit Pleuel zu Stauungen im Materialfluss durch Erreichen der Grenzkapazität kommt. Die Arbeitsplätze wurden hier erweitert um die Liefertermine halten zu können. Nach der Korrektur der Arbeitsplätze wurden aufgrund der Grenzkapazitäten der Motor Endmontage die Schichtpläne angepasst und eine Kapazitätsplanung durchgeführt, die in den Ist-Daten nicht vorhandenen Feiertage wurden berücksichtigt. Durch weitere Untersuchungen der Grenzkapazität wurde festgestellt, dass sie stark von den verschiedenen Anzahlen an Motorentypen (R4, V6, V8), die in einer Kalenderwoche gefertigt werden, abhängig ist. Wenn mehrere V8 Motoren anstatt R4 Motoren gefertigt werden, sinkt die Grenzkapazität. Ebenfalls wurde festgestellt, dass bei der Fertigung von mehreren Motorentypen (2, 3 oder 4 zu fertigende Typen pro Kalenderwoche) die Grenzkapazität ebenfalls sinkt.

7 Verzeichnisse

7.1 Literaturverzeichnis

- [BAN08] Bangsow, S. (2008). *Fertigungssimulation mit Plant Simulation und SimTalk , Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen*. München/Wien: Carl Hanser.
- [BAN11] Bangsow, S. (2011). *Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk*. München: Carl Hanser Verlag München.
- [KG95] Ján Kosturiak, M. G. (1995). *Simulation von Produktionssystemen*. Altenburg: Springer-Verlag Wien New York.
- [KLU10] Klug, F. (2010). *Logistikmanagement in der Automobilindustrie*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- [KÜH06] Kühn, W. (2006). *Digitale Fabrik, Fabriksimulation für Produktionsplaner*. Hanser.
- [MKR(+10] Lothar März, W. K. (2010). *Simulation und Optimierung in der Produktion und Logistik*. Karlsruhe: Springer.
- [HEI11] Martin, H. (2011). *Transport- und Lagerlogistik , Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. Hamburg: Vieweg und Teubner.
- [FD00] Wolfram Fischer, W. D. (2000). *Produkt- und Anlagensoptimierung, Effiziente Produktentwicklung und Systemauslegung*. Sindelfingen, Paderborn: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [HAC84] Hackstein, R. (1984). *Produktionsplanung und -steuerung (PPS), Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.

7.2 Weitere Quellen

- [SIE14] Siemens PLM Software Plant Simulation URL:
http://www.plm.automation.siemens.com/de_at/products/tecnomatix/plant_design/plant_simulation.shtml -Aufrufdatum 20.2.2014
- [CAD14] CAD.de: die CAD-CAM-CAE-Community Forum: TM - Plant Simulation
URL:<http://ww3.cad.de/foren/ubb/Forum262/HTML/001773.shtml#00001> – Aufrufdatum 11.3.2014
- [ITL14] Institut für Technische Logistik: Modellbildung und Simulation in der Materialflusstechnik, DI Trummer Wolfgang, 2013

7.3 Abkürzungsverzeichnis

BE	Bewegliches Element
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
KW	Kalenderwoche
VDI	Verband der deutscher Ingenieure
MF	Materialfluss
DES	Discrete Event Simulation
ITL	Institut für Technische Logistik
BG	Baugruppe
ET	Einzelteil
PE	Puffer Eingang
PA	Puffer Ausgang
ME	Mechanische Fertigung
MO	Montage
QU	Qualitätssicherung
LO	Lager
WE	Wareneingang
WA	Warenausgang
ME01	Mechanische Fertigung Zylinderkopf
ME02	Mechanische Fertigung Pleuel
ME03	Mechanische Fertigung Kurbelwelle
ME04	Mechanische Fertigung Motorblock
MO01	Montage Kolben
MO02	Montage Kolben & Pleuel
MO03	Montage Zylinderkopf
MO04	Montage Motorblock
MO05	Montage Motorblock Kurbeltrieb
MO06	Montage Motor Vormontage
MO07	Montage Motor Endmontage
LO03	Eingangslager für die mechanische Fertigung
LO04	Ausgangslager für die mechanische Fertigung
LO05	Eingangslager für die Montage
LO06	Ausgangslager für die Montage
LO07	Eingangslager für die Montage
QU01	Qualitätsprüfung
QU02	Qualitätsprüfung

7.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablauf einer Materialflussanalyse nach VDI 3633	12
Abbildung 2: Zusammenhang der logistischen Zielgrößen ([MKR(+) <i>10</i>], S. 9) ..	15
Abbildung 3: Ablauf einer Simulationsstudie ([MKR(+) <i>10</i>], S. 11).....	16
Abbildung 4: Methoden des Kapazitätsabgleichs ([KLU <i>10</i>], S. 384)	18
Abbildung 5: Plant Simulation 8.1	20
Abbildung 6: Fabrikslayout [ITL].....	22
Abbildung 7: Layout Detaillierung [ITL]	23
Abbildung 8: Anzahl Arbeitsplätze mechanische Fertigung ME01	25
Abbildung 9: Anzahl Arbeitsplätze mechanische Fertigung ME02	25
Abbildung 10: Anzahl Arbeitsplätze mechanische Fertigung ME03.....	26
Abbildung 11: Anzahl Arbeitsplätze mechanische Fertigung ME04	26
Abbildung 12: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO01	27
Abbildung 13: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO02	27
Abbildung 14: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO03	27
Abbildung 15: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO04	28
Abbildung 16: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO05	28
Abbildung 17: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO06	28
Abbildung 18: Anzahl Arbeitsplätze Montage MO07	28
Abbildung 19: Gesamlayout [ITL]	29
Abbildung 20: Blockschaltbild [ITL]	31
Abbildung 21: Aufbau eines 8 Zylinder Motors	35
Abbildung 22: Produktreihe Motoren R4-V6-V8.....	35
Abbildung 23: Arbeitsplan (Kurbelwelle).....	38
Abbildung 24: Ziel des Modellentwurfs (vgl. [KÜH06], S. 102)	40
Abbildung 25: Vorgehensweise der Systemabgrenzung und Systemanalyse [ITL14].....	40
Abbildung 26: Systemgrenze zur Umwelt.....	41
Abbildung 27: Datenschema des Modells.....	46
Abbildung 28: Implementierung (vgl. [KÜH06], S. 104)	47
Abbildung 29: Materialflussbausteine in Plant Simulation	48
Abbildung 30: Informationsflussbausteine in Plant Simulation	48
Abbildung 31: Einteilung der Methoden zur Steuerungslogistik	49
Abbildung 32: Notwendige Daten für die Bauteilerzeugung	54
Abbildung 33: Auftragskalender (Auszug aus dem Simulationsmodell)	55
Abbildung 34: Lieferliste Einzelteile.....	57
Abbildung 35: Lieferliste Baugruppen	57
Abbildung 36: Benutzerdefiniertes Attribute aus der Subtabelle. Beispiel Baugruppe Kolben_ASM	58
Abbildung 37: Ausschnitt aus der mechanischen Fertigung ME01 mit 3 Arbeitsstationen.....	59
Abbildung 38: Methoden der mechanischen Fertigung.....	61
Abbildung 39: Benutzerdefinierte Attribute des Rohteils Zylinderkopf_Roh (Folge_Bearbeitungszeit und Folge_Ruestzeit werden vor der Bearbeitung ausgelesen)	61

Abbildung 40: Ausschnitt aus der mechanischen Fertigung ME01 (mehrere Arbeitsplätze mit Ausgangspuffer)	62
Abbildung 41: Montageeingang Darstellung MO01 Kolbenmontage	63
Abbildung 42: Benutzerdefinierte Attribute der Baugruppe Kolben_ASM	64
Abbildung 43: Auszug aus dem Lager LO05 (Bestand).....	65
Abbildung 44: Überblick über das Simulationsmodell	66
Abbildung 45: Entwicklung eines Optimierungsprozesses [MKR(+) ¹⁰], S.190). 69	
Abbildung 46: Überblick Zusammenhänge ([MKR(+) ¹⁰], S.107).....	70
Abbildung 47: geplante Experimente.....	72
Abbildung 48: Montagegraph V8 Motor [ITL]	73
Abbildung 49: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO05. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke links und ohne gegenseitige Beeinflussung rechts.....	74
Abbildung 50: Auslastungsgrad pro Woche, des Netzwerks Montage MO02. ..	75
Abbildung 51: Auslastungsgrad pro Woche, des Netzwerks Montage MO02 (Arbeitsstation Anzahl erhöht, mit Feiertagen)	76
Abbildung 52: Auslastung der Motor Endmontage MO07 im 3-Schicht Betrieb, vor der Kapazitätsplanung.	77
Abbildung 53: Motor Endmontage (2-Schicht Betrieb, Glättung des Auslastung, inkl. Feiertage).....	78
Abbildung 54: Optimierter Auftragskalender nach der Kapazitätsplanung.....	79
Abbildung 55: Auslastungsgrad pro Woche. mechanische Fertigung ME01 (3-Schicht)	88
Abbildung 56: Auslastungsgrad pro Woche. mechanische Fertigung ME02 (3-Schicht)	89
Abbildung 57: Auslastungsgrad pro Woche. mechanische Fertigung ME03 (3-Schicht)	89
Abbildung 58: Auslastungsgrad pro Woche. mechanische Fertigung ME04 (3-Schicht)	90
Abbildung 59: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO01. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	91
Abbildung 60: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO01. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	91
Abbildung 61: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO02. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	92
Abbildung 62: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO02. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	92
Abbildung 63: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO03. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	93
Abbildung 64: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO03. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	93
Abbildung 65: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO04. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	94
Abbildung 66: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO04. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	94
Abbildung 67: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO05. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	95

Abbildung 68: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO05. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	95
Abbildung 69: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO06. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	96
Abbildung 70: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO06. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	96
Abbildung 71: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO07. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	97
Abbildung 72: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO07. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)	97

7.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gliederung der für eine Simulation benötigten Daten (vgl. [BAN08], S.12).....	14
Tabelle 2: Gliederung der Systembereiche	23
Tabelle 3: Transportmatrix ITL Demofabrik [ITL]	32
Tabelle 4: Auftragskalender	33
Tabelle 5: Feiertage.....	34
Tabelle 6: Stückliste.....	36
Tabelle 7: Arbeitsplan (Ausschnitt Kurbelwelle, Excel).....	37
Tabelle 8: Maschinen- und manuelle Arbeitsplätze	43
Tabelle 9: Arbeitsplätze	45
Tabelle 10: Schichtkalender	45
Tabelle 11: Produktpalette	55
Tabelle 12: Rohteil Weiterverarbeitung.....	59
Tabelle 13: Simulationsparameter Experiment Nummer 1.....	74
Tabelle 14: Simulationsparameter Experiment Nummer 2.....	75
Tabelle 15: Hinzugefügte Arbeitsstationen	76
Tabelle 16: Simulationsparameter Experiment Nummer 3.....	77
Tabelle 17: Grenzkapazitäten der Montage MO07, abhängig von der Anzahl an Werktagen und Anzahl der Motorentypen pro Woche	78

8 Anhang

Experiment Nummer 1 Ergebnisse

Ergebnisse mechanische Fertigung ME01

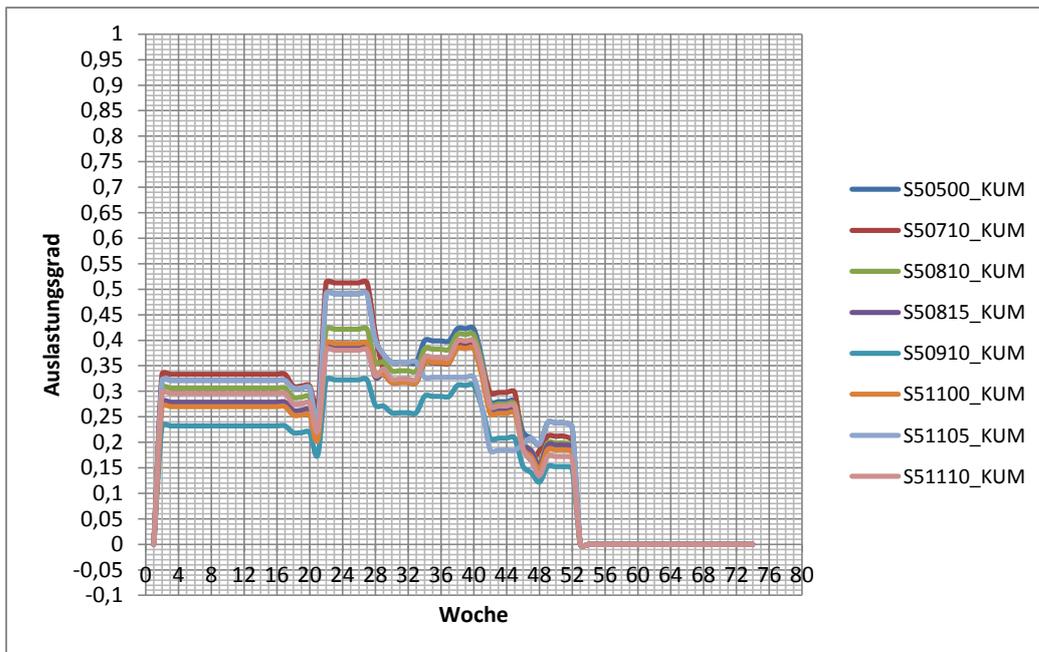


Abbildung 55: Auslastungsgrad pro Woche. mechanische Fertigung ME01 (3-Schicht)

Ergebnisse mechanische Fertigung ME02

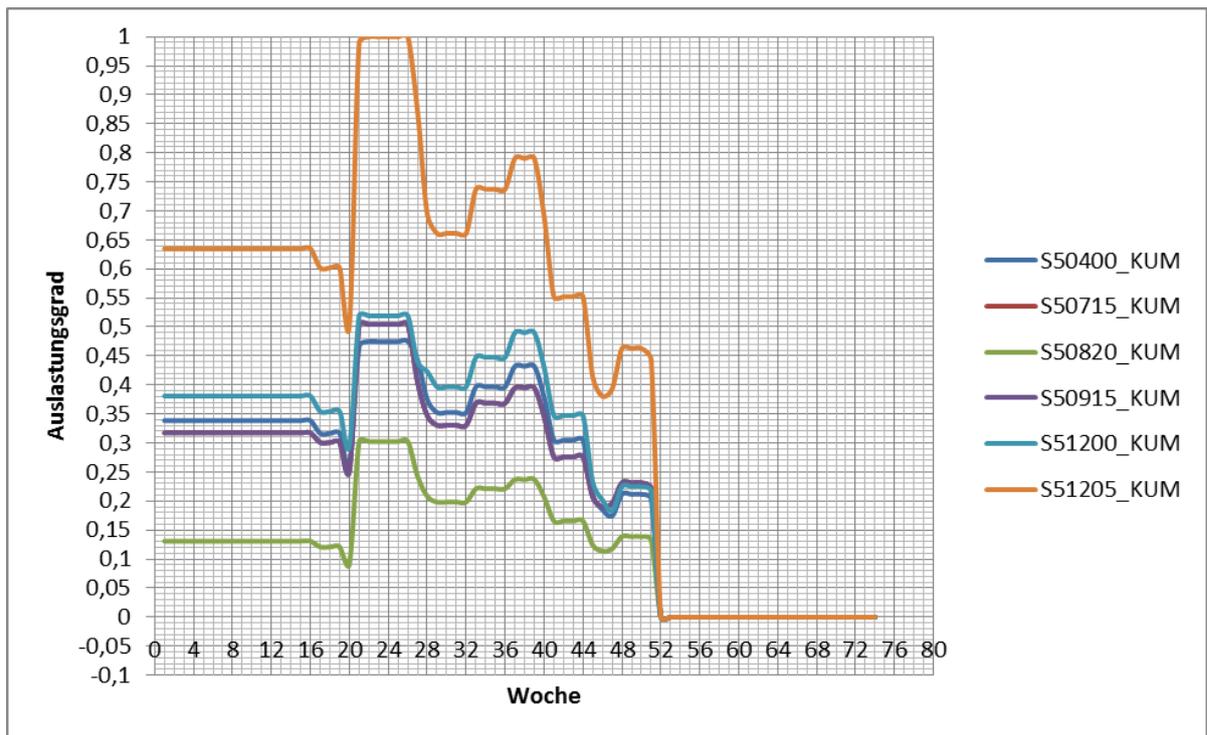


Abbildung 56: Auslastungsgrad pro Woche. mechanische Fertigung ME02 (3-Schicht)

Ergebnisse mechanische Fertigung ME03

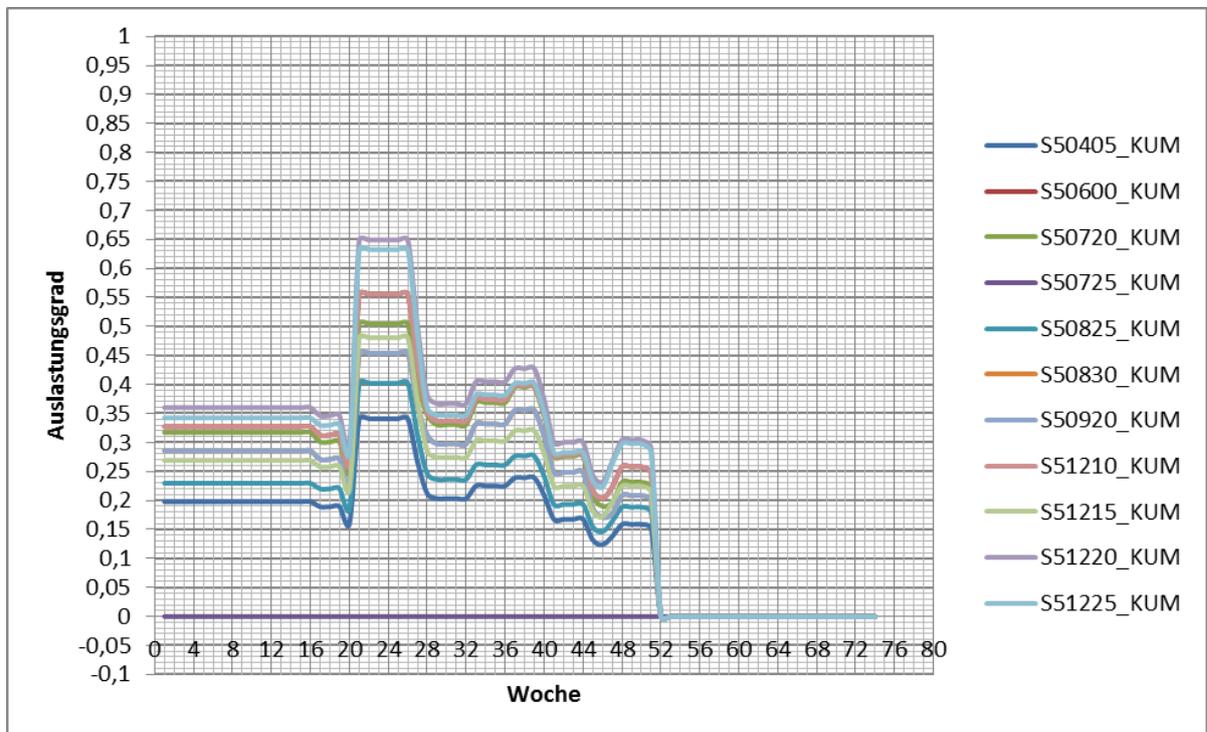


Abbildung 57: Auslastungsgrad pro Woche. mechanische Fertigung ME03 (3-Schicht)

Ergebnisse mechanische Fertigung ME04

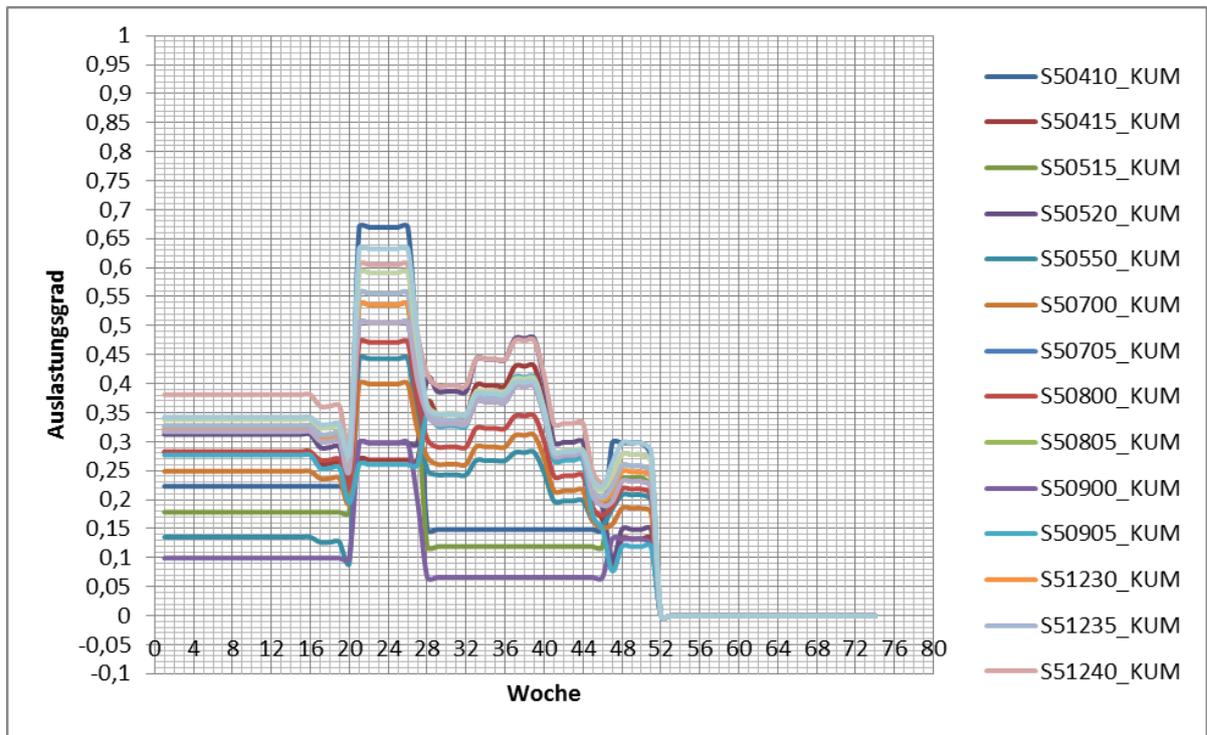


Abbildung 58: Auslastungsgrad pro Woche. mechanische Fertigung ME04 (3-Schicht)

Ergebnisse Montage MO01

Bei der Montage MO01 sind eine Veränderungen im Auslastungsgrad erkennbar, da es sich bei den Montagebauteilen um Zulieferteile handelt.

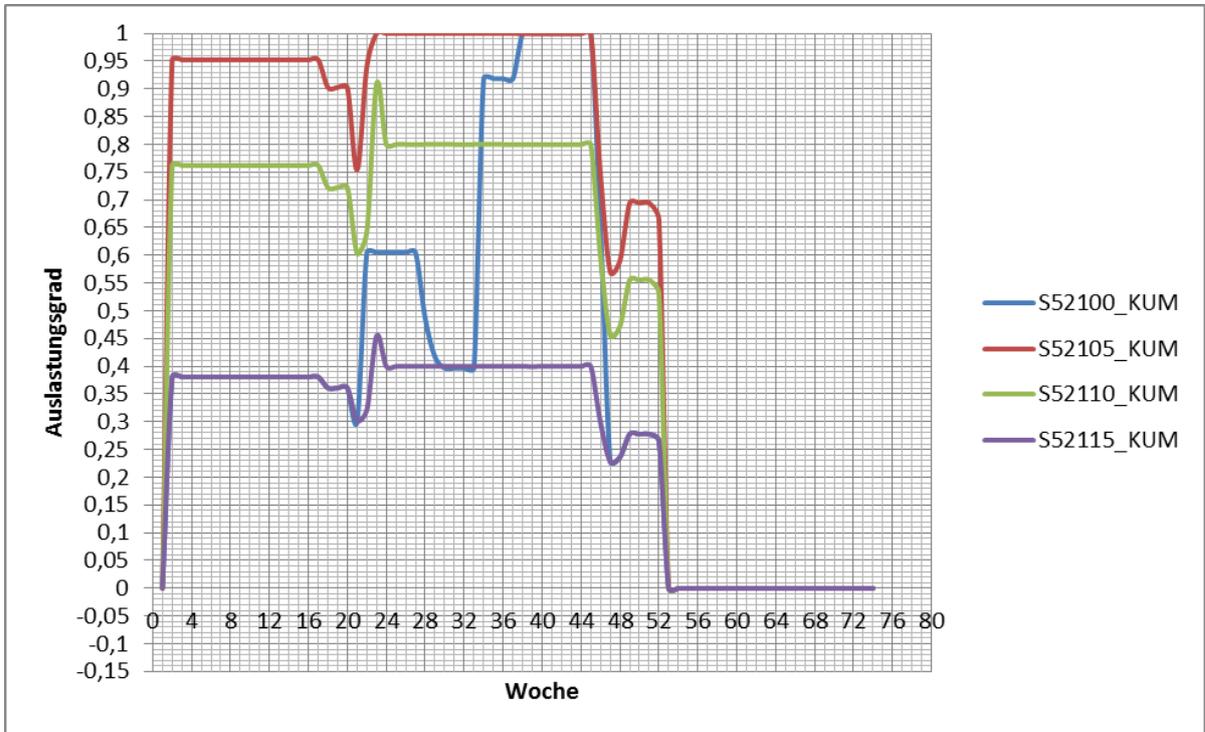


Abbildung 59: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO01. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

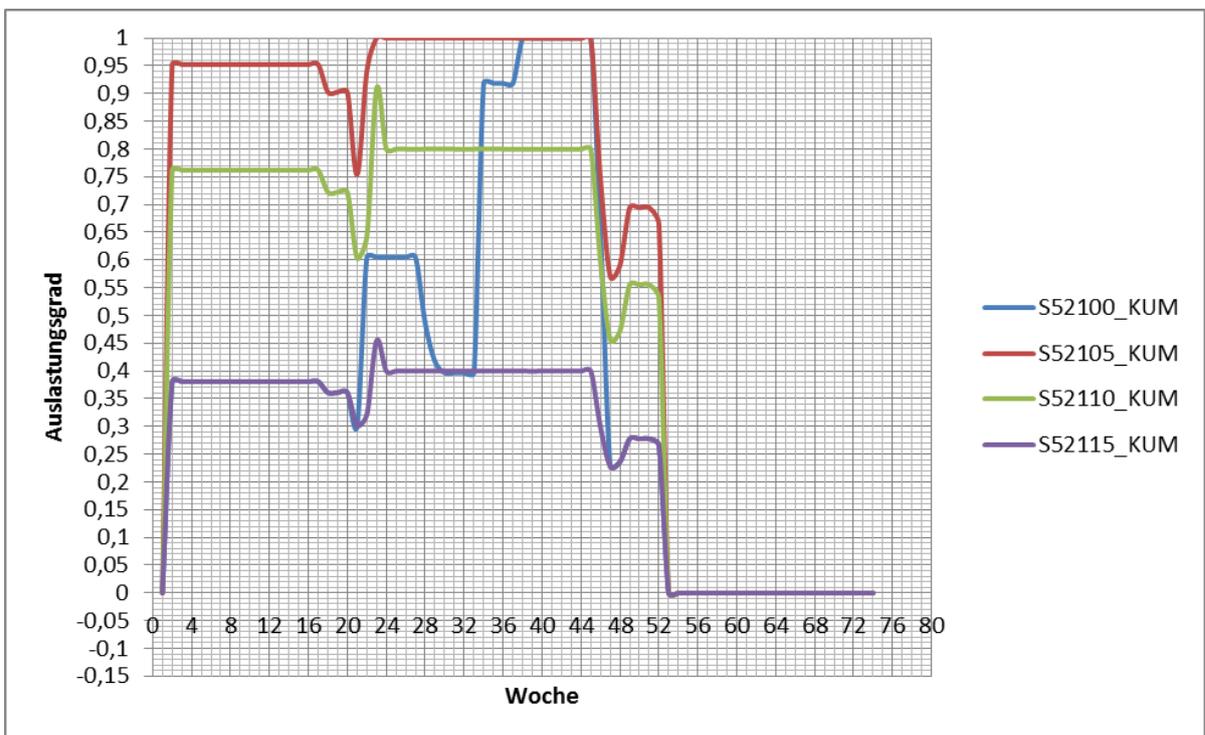


Abbildung 60: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO01. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

Ergebnisse Montage MO02

Bei der Montage MO02 kommt es an den Maschinen S52200, durch die Abhängigkeit von der Montage MO01 zu einer Veränderung des Auslastungsgrades.

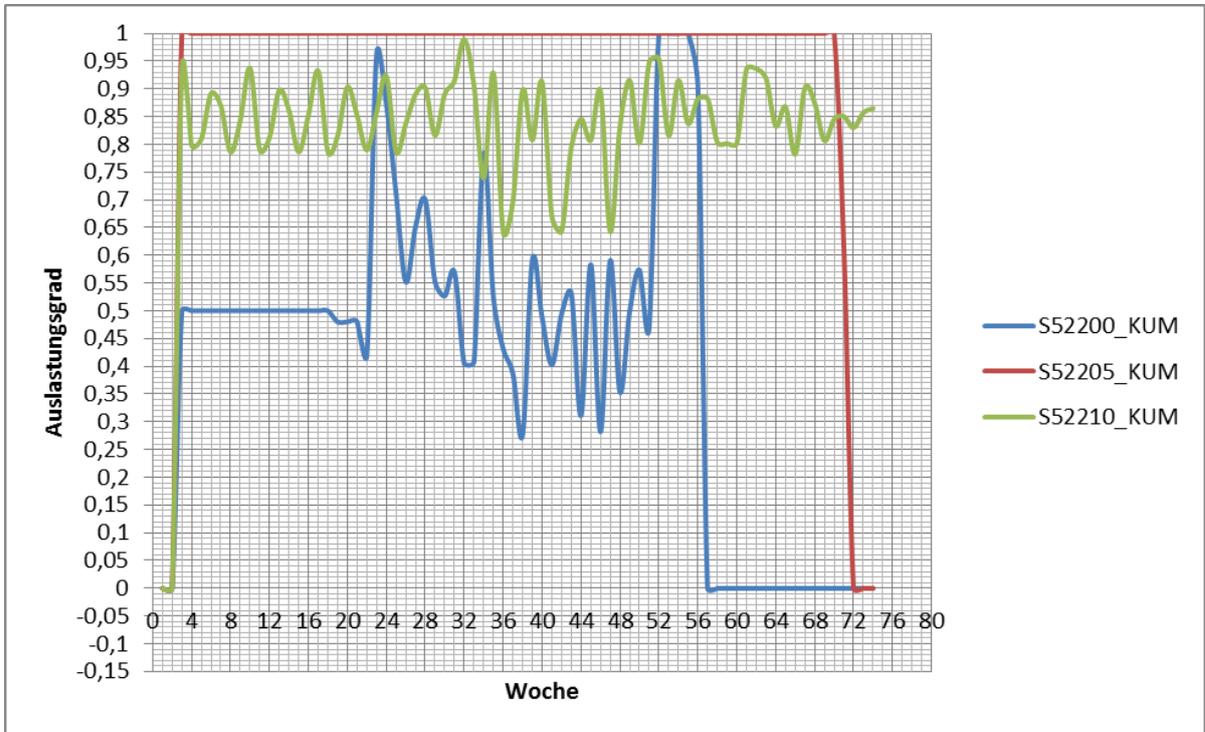


Abbildung 61: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO02. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

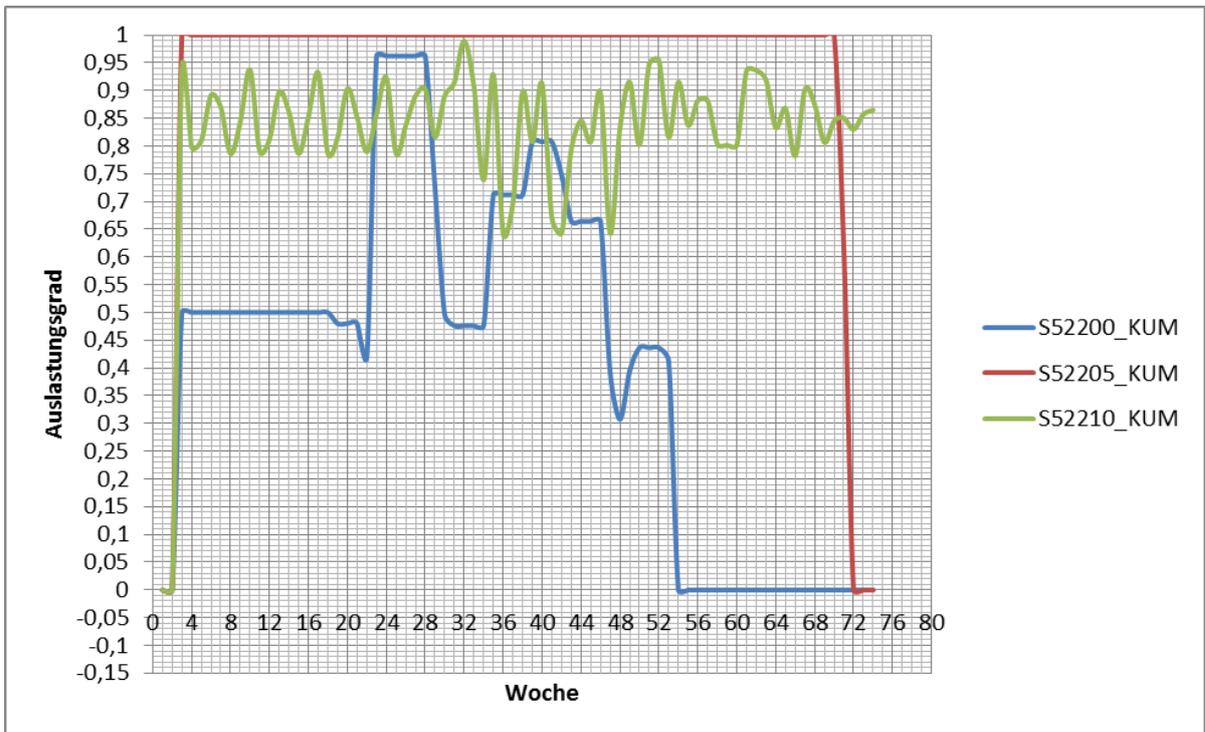


Abbildung 62: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO02. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

Ergebnisse Montage MO03

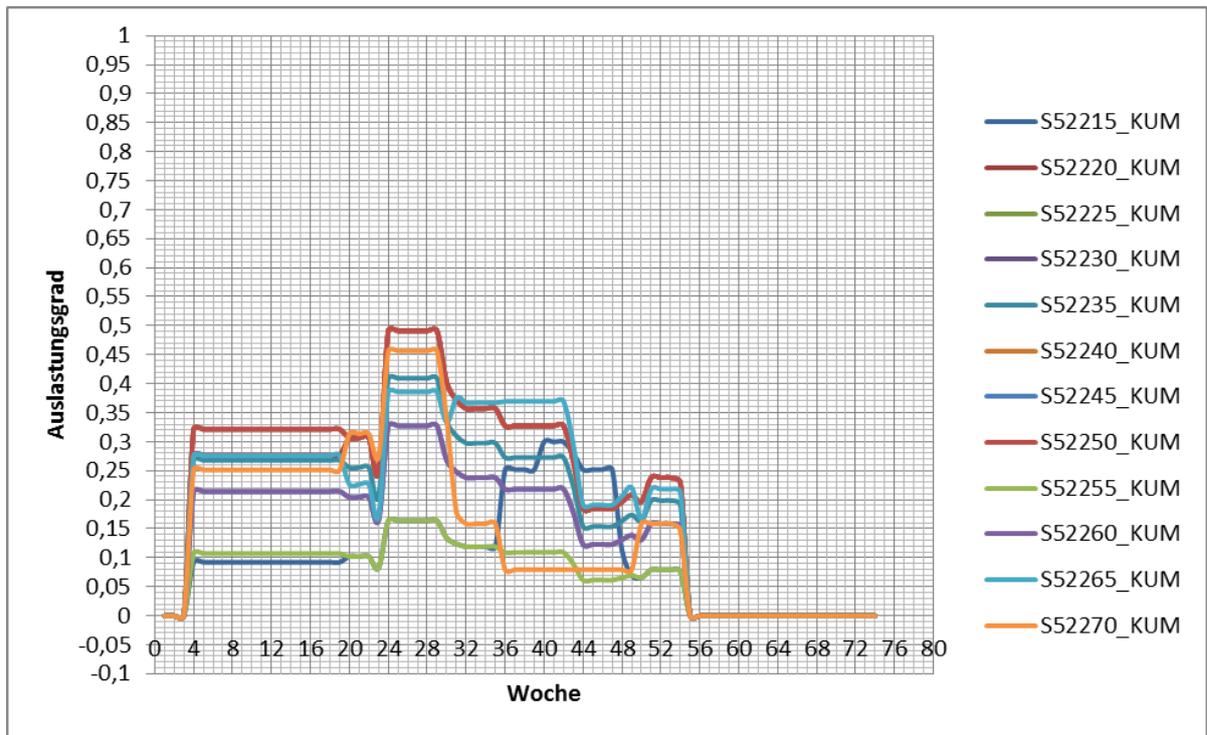


Abbildung 63: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO03. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

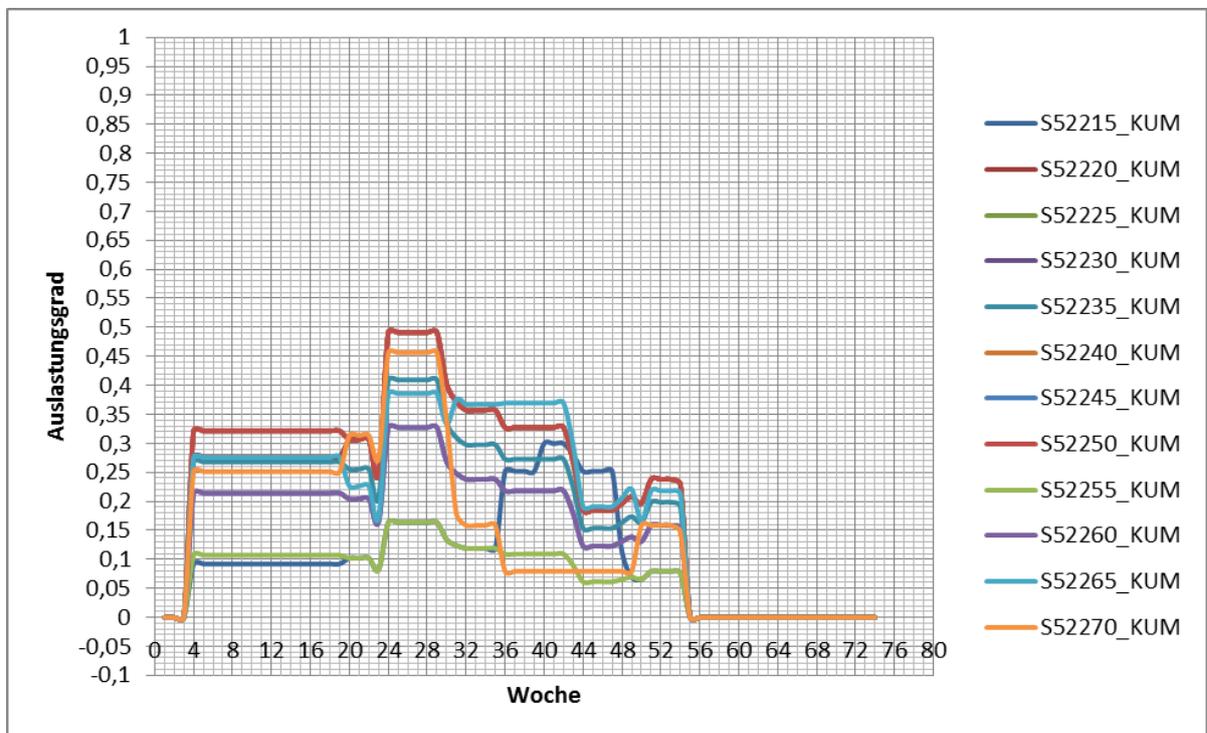


Abbildung 64: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO03. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

Ergebnisse Montage MO04

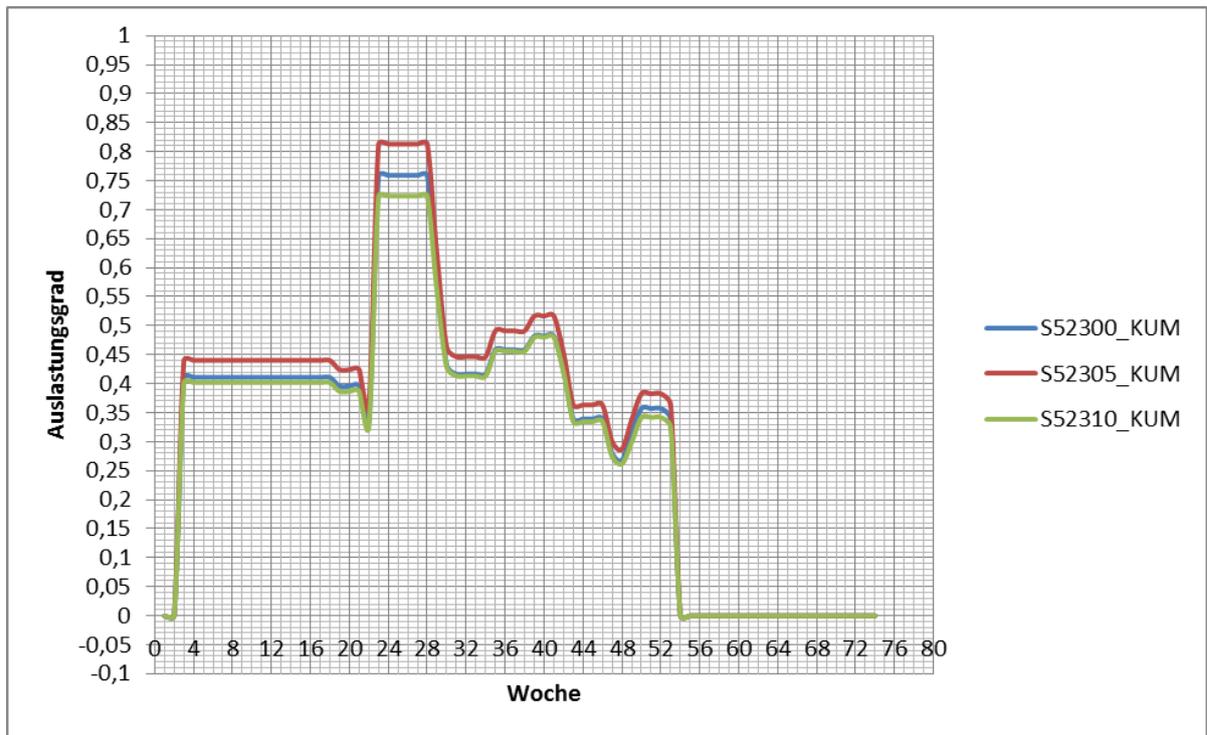


Abbildung 65: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO04. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

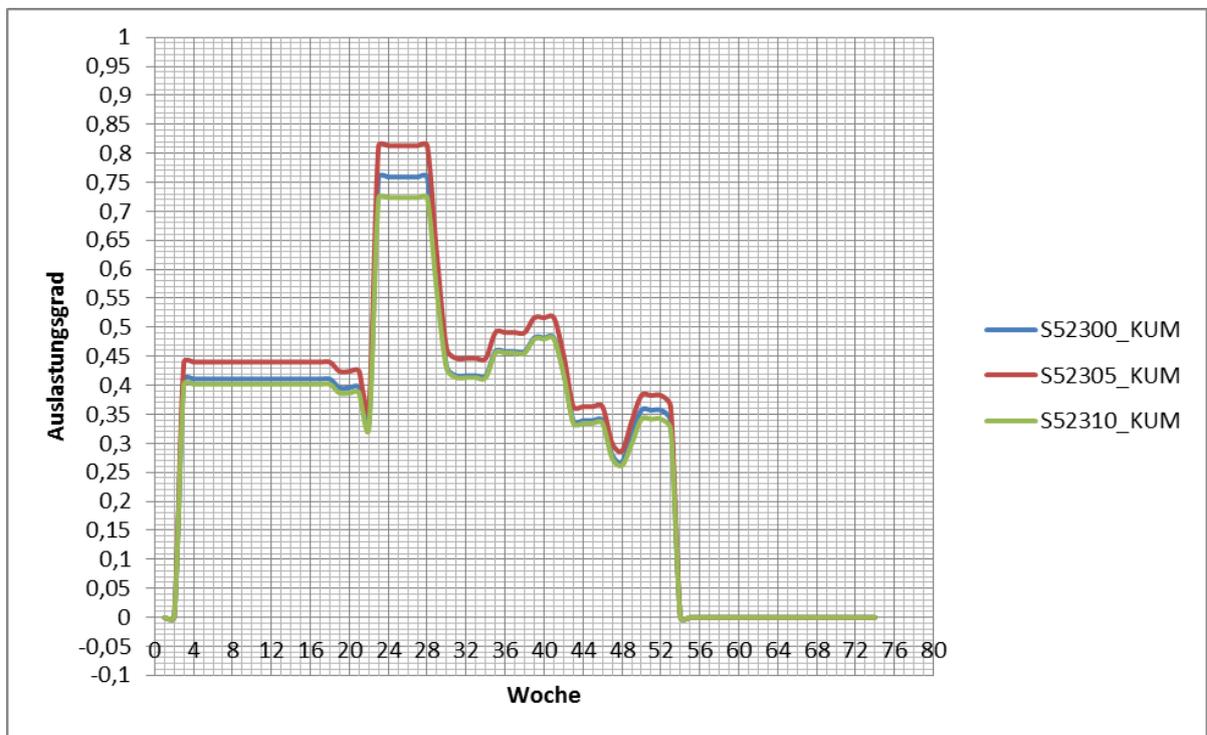


Abbildung 66: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO04. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

Ergebnisse Montage MO05

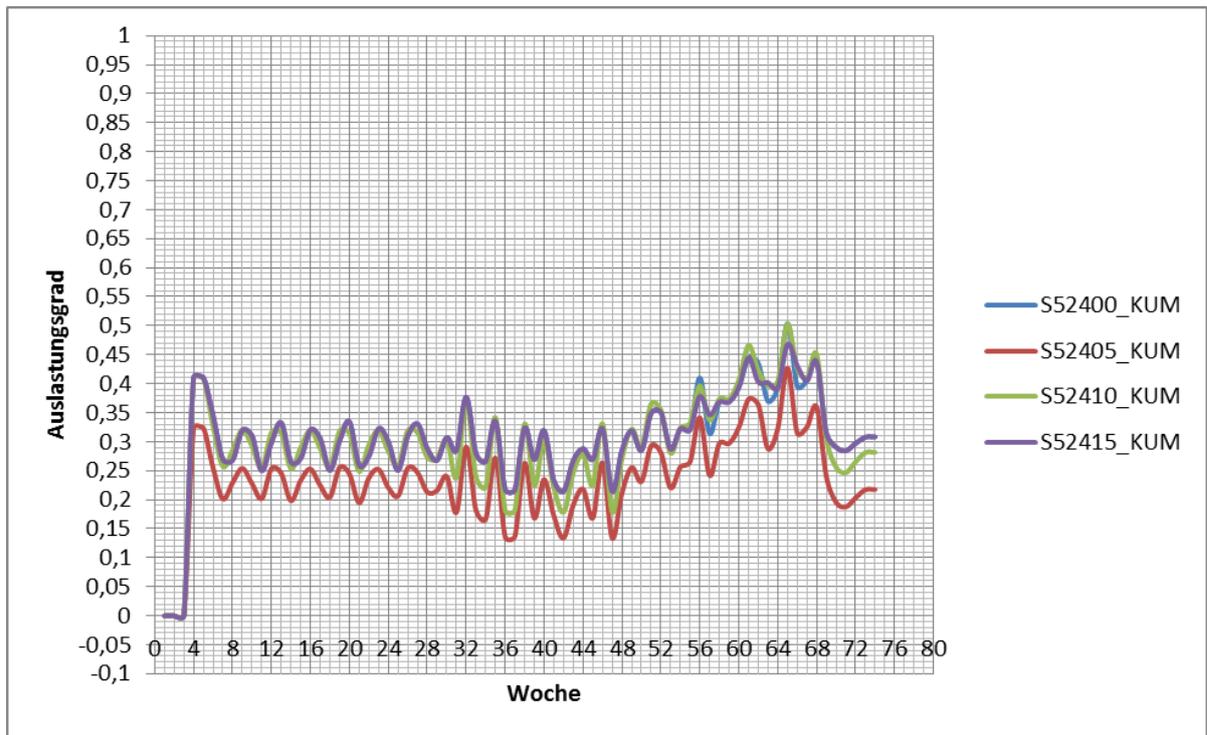


Abbildung 67: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO05. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

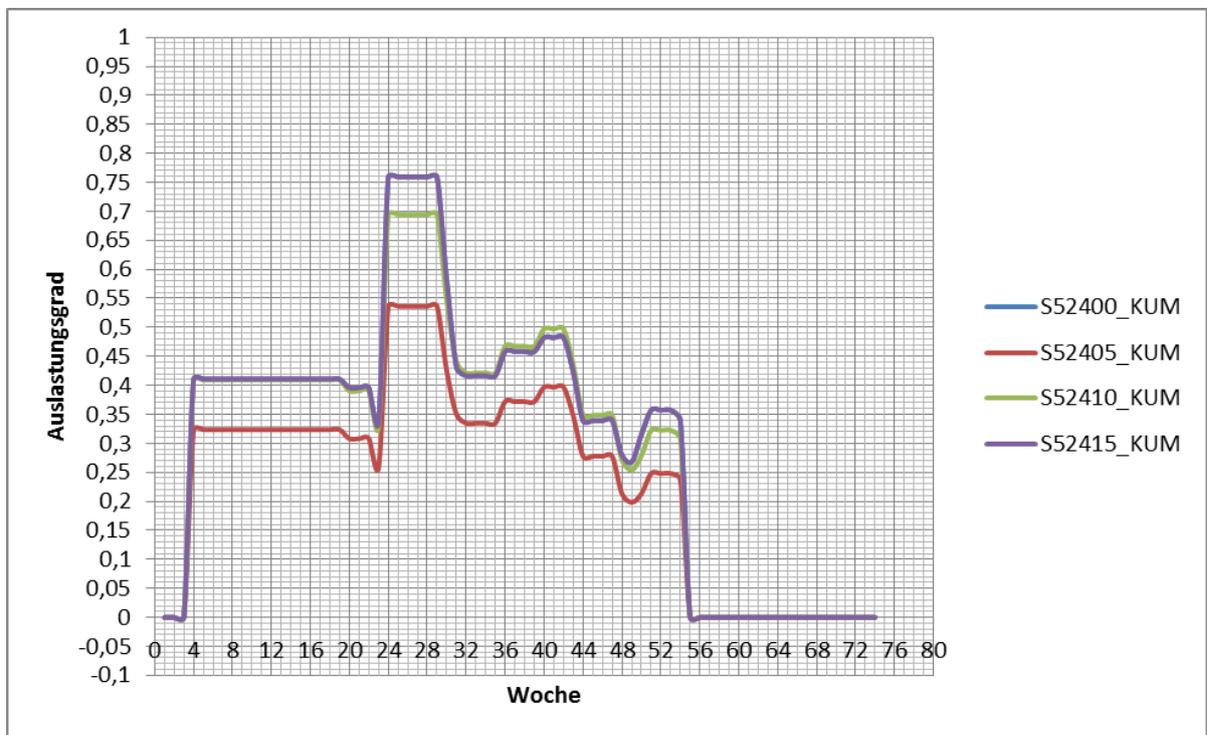


Abbildung 68: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO05. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

Ergebnisse Montage MO06

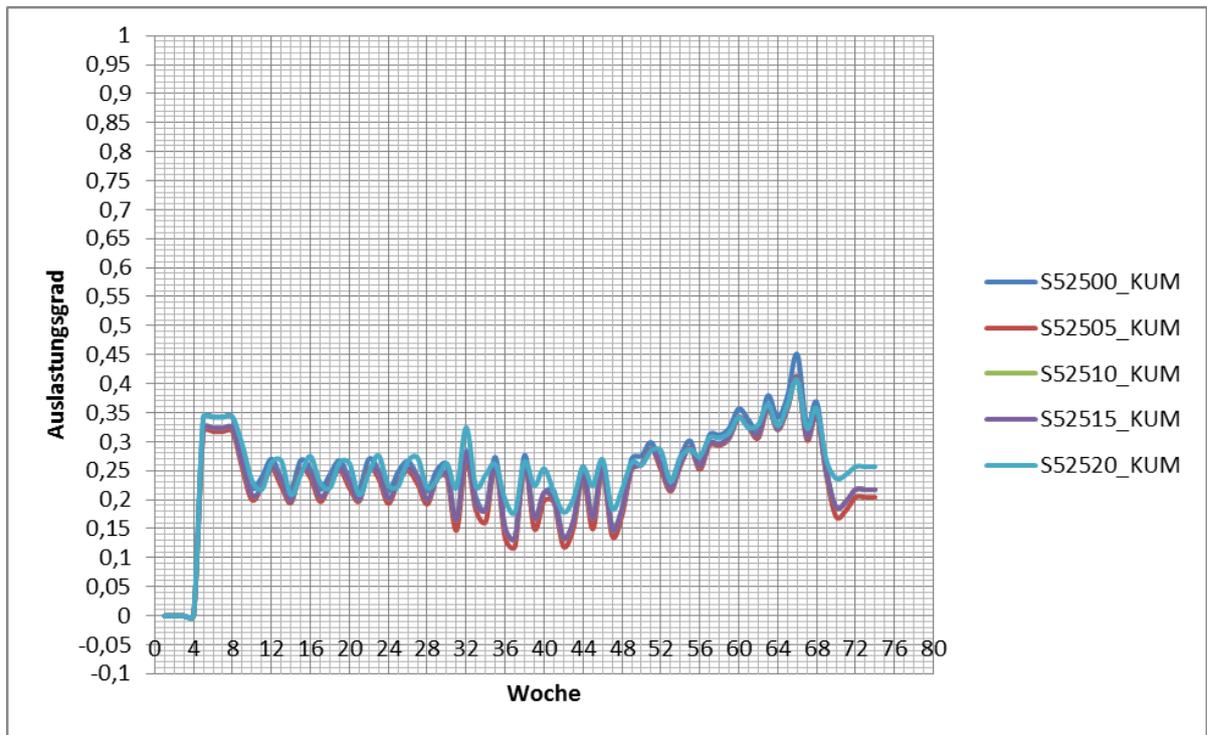


Abbildung 69: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO06. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

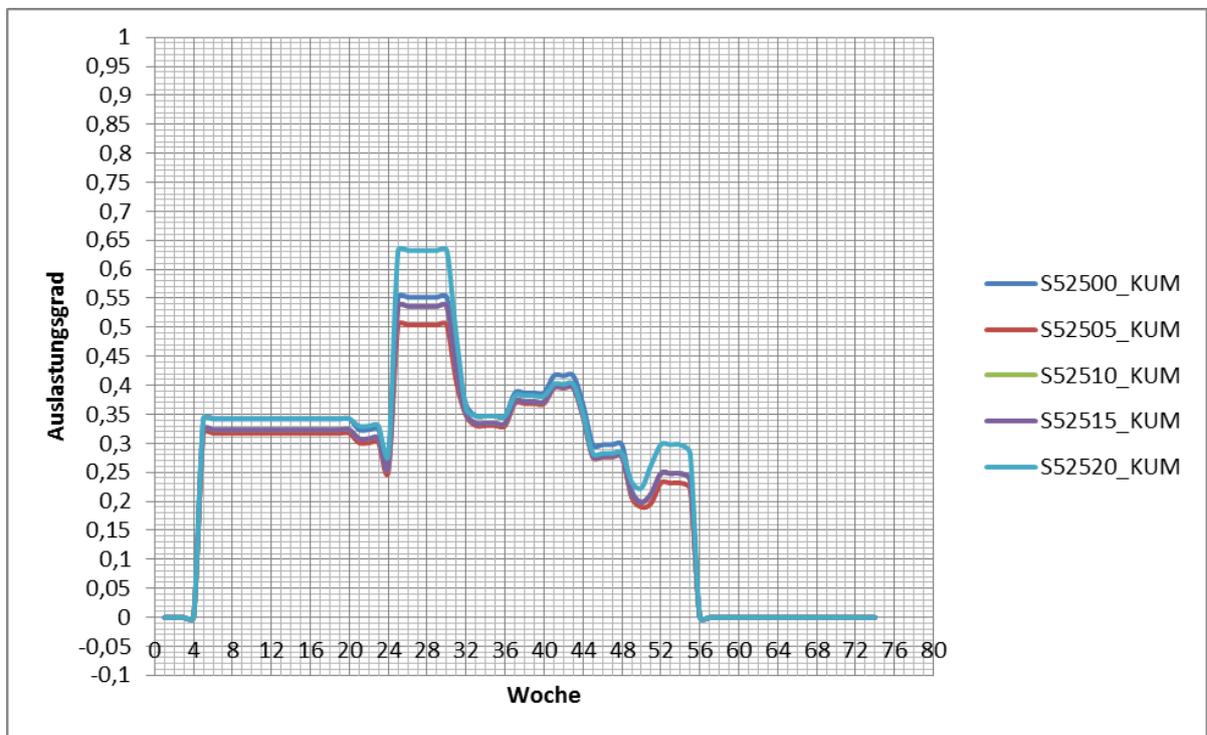


Abbildung 70: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO06. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

Ergebnisse Montage MO07

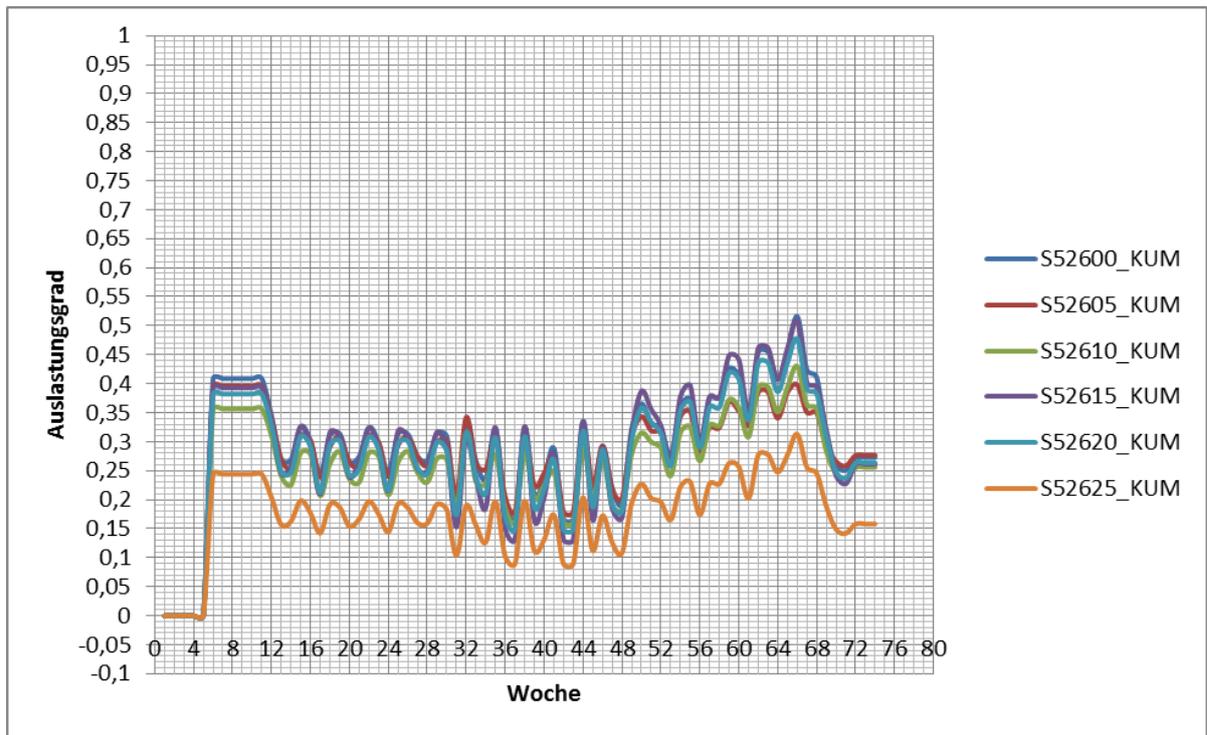


Abbildung 71: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO07. Mit gegenseitiger Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)

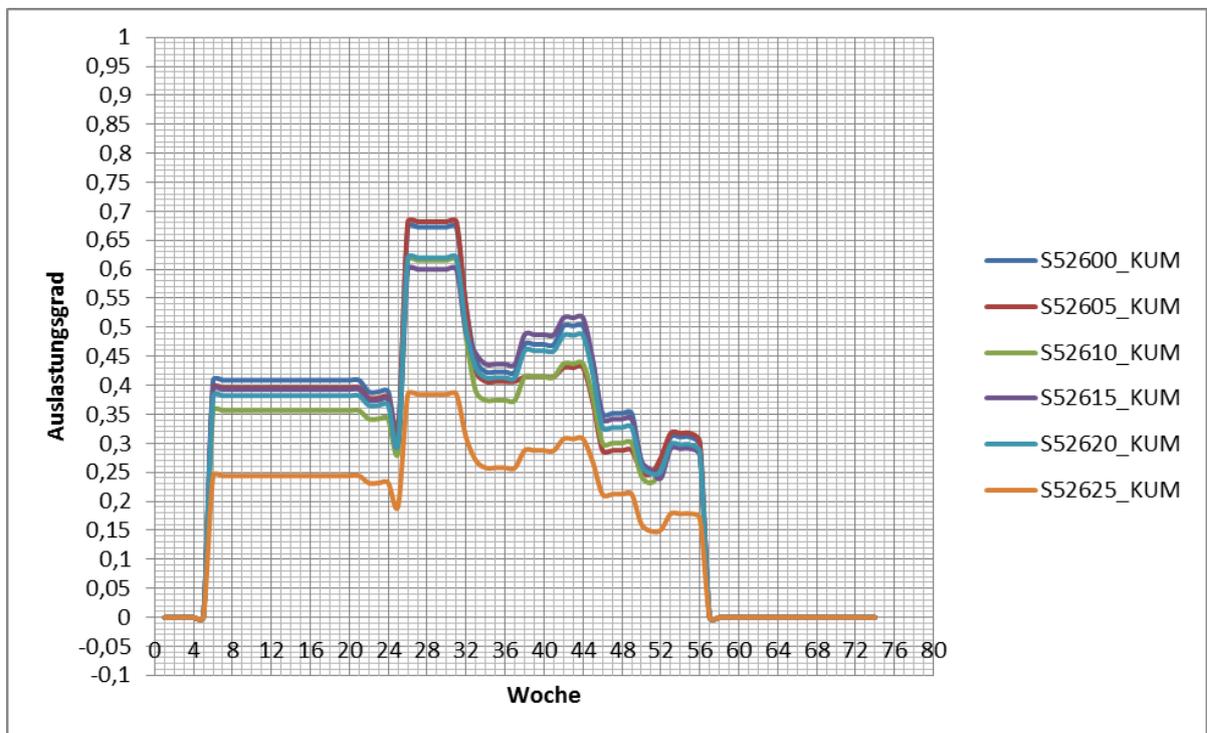


Abbildung 72: Auslastungsgrad pro Woche. Montage MO07. Ohne gegenseitige Beeinflussung der Montagenetzwerke (3-Schicht)