

Masterarbeit

Analyse und Optimierung einer Prüf- und Adjustagelinie für Flachstähle

von

Christian Possegger, BSc

Technische Universität Graz

Fakultät Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut für Technische Logistik

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

Graz, Jänner 2015

Eidesstattliche 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 15. Jänner 2015

.....
Christian Possegger, BSc

Vorwort

Diese Masterarbeit wurde zur Erlangung des akademischen Grades „Diplom-Ingenieur des Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbaus“ verfasst. Sie ist im Zuge meines Studiums an der Technischen Universität Graz am Institut für Technische Logistik in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Böhler Edelstahl GmbH & Co KG entstanden.

Besonders möchte ich mich für die Unterstützung und die Betreuung durch Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Trummer und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Jodin bedanken.

Bei der Firma Böhler Edelstahl GmbH & Co KG möchte ich mich für die sehr gute Zusammenarbeit und die Unterstützung vor allem durch Herrn Dipl.-Ing. Georg Nowak, Herrn Dipl.-Ing. Lars Mooshammer und Herrn Ing. Manfred Tratinek bedanken.

Ich danke auch meiner langjährigen Freundin Laura, die mir in teilweise schwierigen Projektphasen stets die entscheidende Stütze war und meine Launen immer mit einem Lächeln ertragen hat.

Den größten Dank möchte ich schlussendlich meiner Familie aussprechen, die mir in jeglichen Belangen von Beginn an zur Seite stand und mir diese Ausbildung ermöglicht hat.

Kurzfassung

Erklärtes Ziel dieser Arbeit ist es, die produktionsbezogenen Vorgänge einer Prüf- und Adjustagelinie für Kantstähle zu analysieren, ihre Schwachstellen aufzuzeigen und darauf aufbauend gezielte Optimierungsmöglichkeiten zu entwickeln um somit ein verbessertes Gesamtsystem zu entwerfen. Diese Entwicklung soll im Hauptteil der vorliegenden Arbeit durch eine Simulationsstudie – realisiert in der Simulationssoftware „Plant Simulation“ - gestützt werden.

Zu Beginn eines solchen Vorhabens ist es zunächst wichtig, die aktuelle Situation zu verstehen und ihre zugrunde liegenden Prozesse zu kennen. In einer umfangreichen Ist-Analyse werden daher zuerst alle produkt- und prozessbedingten Daten so aufbereitet, dass das System für den beabsichtigten Zweck der Simulation ausreichend genau beschrieben werden kann.

Im nächsten Schritt werden die durch Mitarbeiterinterviews und Datenaufbereitung sichtbar gewordenen Systemschwachstellen analysiert und aufgrund ihres Ursprungs klassifiziert. Um auf diese Schwachstellen reagieren zu können werden Optimierungsvarianten entwickelt, die folgend durch unterschiedliche Kombinationen in der Simulation auf ihren Einfluss auf Zielgrößen wie Liefertreue oder Durchsatzleistung getestet werden sollen.

Das Simulationsmodell an sich wird durch die Implementierung der Daten aus der Ist-Analyse aufgebaut, verifiziert und validiert. Die Erweiterung um die oben erwähnten Optimierungskonzepte zeigt schlussendlich das Optimierungspotential unterschiedlicher Konzepte und gibt Aufschluss über die Sinnhaftigkeit zukünftiger Investitionen im Unternehmen.

Abstract

The objective of this thesis is to analyze the production related processes of an inspection and finishing line for flat-rolled steels, to highlight its weak points and to generate problem specific optimization-possibilities, which should lead to a more efficient production-system. In the main part of this thesis this goal should be accomplished by using a material-flow simulation model, realized in the simulation software “Plant Simulation”.

At the beginning of this project it is crucial to understand the current situation and its underlying processes. During an extensive as-is-analysis all product- and process-related data is concentrated to an extent which sufficiently describes the system for the purpose of adequate simulation.

The next step is to analyze the system`s weak points – visible through data processing and employee interviews – and classify them based on their origins. To respond to those weak points, optimization-variants are built which are further tested on their effectiveness on different objective values like delivery reliability or throughput performance.

The simulation-model itself is created by implementation of the generated data of the as-is-analysis and afterwards verified and validated. The enhancement through the various optimization-variants finally identifies optimization-potentials of different concepts and offers valuable support to the enterprise`s future investment decisions.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	9
1.1	Das Unternehmen Böhler Edelstahl GmbH & Co KG.....	9
1.2	Ausgangssituation	10
1.3	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	11
2	Problemanalyse.....	13
2.1	Ökonomische Betrachtung	13
2.1.1	Produktionssystem und Produktionsfaktoren	13
2.1.2	Maßeinheiten der Effizienz.....	14
2.2	Technische Betrachtung.....	16
2.2.1	Der Systembegriff.....	16
2.2.2	Grundelemente der Materialflusssysteme	19
2.2.2.1	Leistungsdurchsatz.....	19
2.2.2.2	Grenzleistungen.....	20
2.2.2.3	Warteschlangen-Theorie.....	23
2.2.2.4	Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit	30
2.2.3	Modellierung logistischer Systeme	32
2.2.3.1	Darstellung des Materialflusses nach VDI 3300.....	33
2.2.3.2	Flussdiagramme.....	33
2.2.3.3	Graphen.....	34
2.2.3.4	Materialflussmatrizen	35
2.2.3.5	Sankey-Diagramme	38
2.2.3.6	Beschreibung dynamischer Prozesse durch Verteilungen	38
2.2.3.6.1	Diskrete Verteilungen	39
2.2.3.6.2	Stetige Verteilungen.....	41
2.2.4	Layoutplanung.....	44
2.2.5	Simulation logistischer Systeme.....	46
2.2.5.1	Grundprinzip der Simulationsmethodik.....	46
2.2.5.2	Vor- und Nachteile der Simulationstechnik	48
2.2.5.3	Die Wahl des geeigneten Simulationswerkzeuges	49
3	Entwicklung von Maßnahmen	54
3.1	Ist-Analyse und Datenaufbereitung	55
3.1.1	Zielfestlegung	55
3.1.2	Überblick des Betriebsablaufs	57
3.1.3	Datenerhebung und -aufbereitung	58
3.1.3.1	Datenanalyse des System-Inputs.....	61
3.1.3.2	Datenanalyse des Produktionssystems.....	67
3.2	Schwachstellenanalyse und Optimierungsansätze.....	85
3.2.1	Interviews hinsichtlich Anlagenschwachstellen	86
3.2.2	Entwicklung von Optimierungsansätzen	87
3.2.2.1	Lagerführung (L)	88
3.2.2.2	Durchlauflogik (D)	90
3.2.2.3	Schichtmodelle & Qualifikationen (S).....	91
3.3	Simulation.....	93
3.3.1	Modellbildung.....	95
3.3.1.1	Entity-Relationship-Model	96
3.3.1.2	Auftragserzeugung.....	97

3.3.1.3	Layout und Transportwege	100
3.3.1.4	Bearbeitung der Aufträge.....	103
3.3.1.5	Zuteilung der Arbeiter zu den Einzelstationen	105
3.3.1.6	Verifikation und Validierung	106
3.3.2	Implementierung der Optimierungskonzepte.....	108
4	Auswertung der Ergebnisse	116
4.1	Materialflussbetrachtung	117
4.2	Einfluss auf die Liefertreue.....	119
4.3	Einfluss auf die Durchlaufzeit	121
4.4	Einfluss auf die Durchsatzleistung.....	123
4.5	Beurteilung der Ergebnisse.....	124
5	Zusammenfassung	127
6	Verzeichnisse.....	128
6.1	Literaturverzeichnis	128
6.2	Abbildungsverzeichnis	130
6.3	Tabellenverzeichnis	133
7	Anhang	134

Abkürzungen

KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
ROI	Return on Investment
ERP	Enterprise-Resource-Planning
QIS	Qualitäts-Informationen-System
PVS	Produktions-Verfolgungs-System
WAS	Wärmebehandlungs- und Adjustage-System
PAL	Prüf- und Adjustagelinie
PK-Station	Prüf- und Kontrollstation
MRRM	Mehrrollenrichtmaschine
RP	Richtpresse
FSM	Flachschleifmaschine
TS	Trennsäge
LIFO	Last-In-First-Out
AGV	Arbeitsgangvariante
MTTR	Mean-Time-To-Repair
MTBF	Mean-Time-Between-Failures
LO	Logistikobjekt
ZE	Zeiteinheit
FE	Fördereinheit
LT	Ladungsträger
LE	Ladungseinheit
FG	Fördergut

1 Einleitung

Durch die weltweit stark steigende Nachfrage an qualitativ hochwertigsten Edelstählen ist es von großer Bedeutung, einen Produktentstehungsprozess im Unternehmen zu etablieren, der allen Anforderungen des Marktes Rechnung tragen kann. Dazu ist neben der Bewahrung des technischen Knowhows und der stetigen Weiterentwicklung der metallurgischen Expertise im Unternehmen ebenfalls eine Fokussierung auf effiziente und gleichzeitig leistungsstarke Produktionsprozesse notwendig.

Richtungsweisende Prinzipien wie sie im sogenannten „Lean Management“ oder „Lean Production“ zusammengefasst werden, werden immer öfter von europäischen Unternehmen erfolgreich adaptiert und nehmen auch einen immer höheren Stellenwert ein. Großes gemeinsames Ziel all dieser Lean-Überlegungen ist es, nicht wertschöpfende Aktivitäten jeglicher Art aufzudecken und schrittweise zu eliminieren um zu einem kontinuierlich besser werdenden System zu gelangen.

Anspruch dieser Arbeit ist es, diese Verschwendungen durch Materialfluss-Simulationen aufzuzeigen, Optimierungsmöglichkeiten zu testen und Verbesserungspotentiale für zukünftige Investitionsprojekte abschätzbar zu machen.

Im Sinne der Geheimhaltung sensibler Unternehmensdaten wird auf Wunsch des Unternehmens auf das Anführen konkreter Absatzzahlen und anderer sensibler Daten hier weitestgehend verzichtet.

1.1 Das Unternehmen Böhler Edelstahl GmbH & Co KG

Böhler Edelstahl GmbH & Co KG (im Folgenden Böhler Edelstahl genannt) ist ein edelstahlerzeugendes Unternehmen mit Firmensitz in Kapfenberg, Österreich.

Bereits 1870 als „Gebrüder Böhler & Co“ gegründet, entwickelt sich das ursprüngliche Unternehmen nach dem Kauf des Stahlwerkes in Kapfenberg im Jahr 1894 über die folgenden Jahrzehnte zu einem immer größeren und weltweit agierenden Edelstahlproduzenten. Als juristische Person wird „Böhler Edelstahl GmbH & Co KG“ durch eine Umstrukturierung im Unternehmen gegründet. Böhler Edelstahl ist somit Teil der Böhler-Uddeholm AG, die 1995/96 privatisiert, und im Jahr 2008 durch die voestalpine AG übernommen wird.

Heute zählt Böhler Edelstahl zu den weltweit bedeutendsten Herstellern von

- Schnellarbeitsstählen,
- Werkzeugstählen,
- Sonderwerkstoffen.

Diese Edelstähle – der Produktkatalog zählt insgesamt mehr als 200 Stahlmarken – werden in Produkten verwendet, die entsprechend ihren Anforderungen höchsten Belastungen standhalten müssen. So werden die in Kapfenberg produzierten Stähle zum Beispiel im Bereich der Umformtechnik

oder der Zerspanungstechnik eingesetzt oder finden ihren Einsatz in höchstbeanspruchten Produkten im Flugzeugbau, Turbinenbau oder der Medizintechnik. Durch ein leistungsstarkes Vertriebsnetz wird die weltweite Distribution der Werkstoffe sichergestellt. [BÖH14a]

Tabelle 1-1 zeigt die wichtigsten Unternehmenskennzahlen im Überblick.

Tabelle 1-1: Unternehmenskennzahlen (GJ 2014) Böhler Edelstahl GmbH & Co KG, [BÖH14b]

Umsatz	636,12 Mio. EURO
Lieferung	140.610,9 t
Beschäftigte	1989
Exportanteil	71%

Im weltweiten Vergleich zeigt sich Europa mit einer Umsatzquote von 75% nach wie vor als umsatzstärkster Markt für Böhler Edelstahl. Bei Betrachtung der Geschäftsfelder ist ersichtlich, dass die Sonderwerkstoffe vor Werkzeugstählen und Schnellarbeitsstählen für den relativ größten Umsatzanteil verantwortlich sind (Abbildung 1-1).

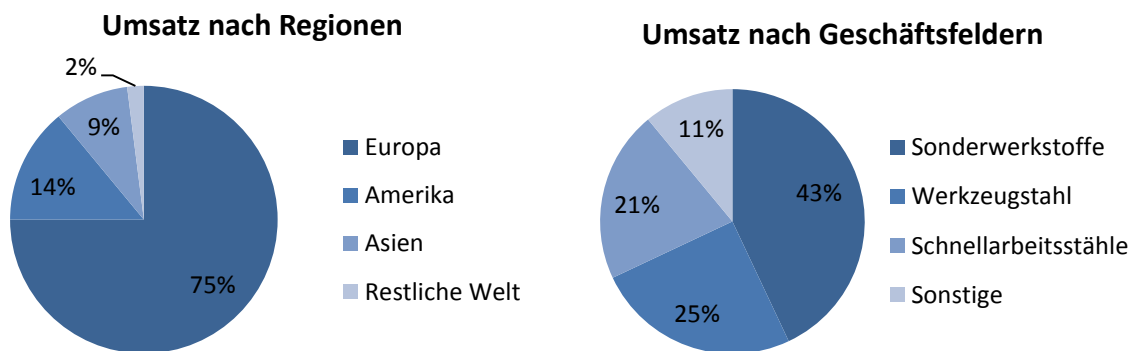


Abbildung 1-1: Marktmix, (nach [BÖH14b])

Durch die Übernahme der Böhler-Uddeholm Gruppe durch die voestalpine AG im Jahr 2008 wurde Böhler Edelstahl organisatorisch in die Division „Special Steel“ der voestalpine AG eingegliedert. Die voestalpine erwirtschaftete im Geschäftsjahr 2013/14 mit ihren über 500 Konzerngesellschaften und Standorten in über 50 Ländern einen Umsatz von 11.228 Mio. EURO, wovon 23% in der Division „Special Steel“ zuzurechnen sind [VOE14].

1.2 Ausgangssituation

Das vorliegende Projekt wird am Ende der Wertschöpfungskette der Böhler Edelstahl & Co KG im Prüf- und Adjustagebereich der Produkte durchgeführt. Dazu ist zu sagen, dass sich der Gesamtprozess von der Erschmelzung des Stahls bis zum versandbereiten Produkt auf zwei Standorte aufteilt: das Böhler Stammwerk und das sogenannte Werk IV Deuchendorf, welches sich etwa 4km vom Stammwerk entfernt befindet.

Die Produktion der Edelstähle beginnt im Stammwerk, wo im Stahlwerk die Erschmelzung im Elektrolichtbogenofen oder – im Falle pulvermetallurgischer

Erzeugnisse – im Induktionsofen stattfindet. Das Pulver wird im Anschluss an die Erschmelzung im Induktionsofen durch Verdüsen erzeugt. Im Elektrolichtbogenofen wird hingegen über das Anlegen einer Spannung Schrott geschmolzen. Diese nicht-pulvermetallurgischen Stähle werden in der folgenden Sekundär-Metallurgie durch Vakuumbehandlung oder im Pfannenofen nachbehandelt, um die geforderte Reinheit erreichen zu können. Anschließend wird das Material im Blockguss- oder Strangguss-Verfahren in seine feste Form gebracht und damit für die weitere Bearbeitung in der Walz- bzw. Schmiedelinie vorbereitet. Nach Abschluss dieser Warmverformung werden die Stähle in das Werk IV transportiert, wo sie nach abschließender Wärmebehandlung, mechanischer Fertigbearbeitung und Abschlussprüfung bereit für das Zentrallager bzw. den Versand gemacht werden (Abbildung 1-2).



Abbildung 1-2: Vereinfachte Prozesskette (nach [BÖH14b])

Wie eingangs schon erwähnt, ist dieses Projekt im letzten Teilbereich der in Abbildung 1-2 abgebildeten Prozesskette angesiedelt, nämlich im Prüf- und Adjustagebereich für gewalzte Flachstähle. Die dazugehörigen Prozessschritte werden in der Produktionshalle „Halle 8“ durchgeführt und sind in Abbildung 3-5 überblicksmäßig angeführt. Diese Prozessschritte zu analysieren und zu optimieren ist Gegenstand der vorliegenden Masterarbeit.

1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Aufgabe dieser Masterarbeit ist es, das System „Halle 8“ auf seine Eigenschaften hin zu untersuchen, eine umfassende Bestandsaufnahme aufzuzeichnen und schließlich durch simulationsgestützte Materialflussanalysen sinnvolle Optimierungskonzepte abzuleiten. Dazu sind im Speziellen folgende Punkte zu nennen:

1. Umfassende Analyse der Systemelemente
2. Umfassende Analyse der Auftragsdatenstruktur
3. Untersuchung von Optimierungskonzepten und Abschätzung ihrer Potentiale hinsichtlich zukünftiger Investitionen mittels Simulation
4. Visualisierung der Materialflüsse von Plan- und Ist-Prozessen

ad1) Durch die Analyse der Systemelemente werden die Eigenschaften der Einzelstationen im System sichtbar gemacht. Dazu zählen vor allem Bearbeitungszeiten, Verfügbarkeiten oder Auslastungen von Maschinen oder Arbeitsstationen. Diese Untersuchungen werden unter anderem später dazu benötigt, um das System im Simulationsmodell beschreiben zu können.

ad2) Eine genaue Aufschlüsselung der Auftragszusammenstellungen hinsichtlich Kenngrößen wie zum Beispiel Werkstoff, Dimensionen oder Masse wird aufzeigen, welchen Input das Produktionssystem zu erwarten hat.

ad3) Die unter Punkt 1 und 2 erwähnten Analysen und Datenextraktionen werden in das Simulationsmodell implementiert. Zum Einsatz kommt die

Materialfluss- und Optimierungssoftware „Plant Simulation“ der Firma Siemens AG. Durch die Simulation unterschiedlicher Optimierungskonzepte sollen im Hauptteil der Arbeit Optimierungspotentiale quantifizierbar gemacht werden. Im Speziellen legt das Unternehmen Böhler Edelstahl und vor allem die mit dem Produktionssystem betrauten Abteilungen großen Wert darauf, dass die durch die Masterarbeit gewonnen Erkenntnisse ihre Liefertreue-Entwicklung im System Halle 8 positiv beeinflussen können.

ad4) Nicht zuletzt durch die Größe des Unternehmens Böhler Edelstahl bedingt, ist das Wissen über die Materialflüsse und Prozessvorgänge in der Halle 8 nicht in allen Bereichen des Unternehmens gleich. Da dennoch viele unterschiedliche Abteilungen direkt oder zumindest indirekt mit dem System konfrontiert sind, ist es zudem erklärtes Ziel der Arbeit, die Materialflüsse im System in Sankey-Diagrammen zu visualisieren. Dadurch werden die Abläufe transparenter und Mitarbeitern, die das System eventuell weniger oder überhaupt nicht kennen, wird ein schneller Überblick über die Abläufe ermöglicht.

2 Problemanalyse

Der Anspruch von Böhler Edelstahl, auch in Zukunft zu den Top-Unternehmen am internationalen Edelstahlmarkt zu gehören, wird erst durch eine ständige Selbstreflexion über die Vorgänge und Strategien im eigenen Unternehmen ermöglicht. Der weiterhin steigende Kostendruck auf produzierende Unternehmen führt deswegen immer öfter dazu, sich mit modernen Prinzipien wie „Lean Management“ oder „Lean Production“ zu befassen. Das erklärte Ziel ist es dabei, Verschwendung jeglicher Art zu aufzudecken und anschließend nachhaltig zu eliminieren. Durch kontinuierliche Verbesserungen kann somit an stetig steigender Effizienz gearbeitet werden. Diese Arbeit konzentriert sich dabei als Teil des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) auf die Effizienzsteigerung eines freigeschnittenen Systems im abschließenden Bereich der Wertschöpfungskette. Dieses Kapitel soll sich nun mit den theoretischen Grundlagen der später in die Praxis umgesetzten Überlegungen und Methoden befassen.

2.1 Ökonomische Betrachtung

Im Zentrum einer jeden gewinnorientierten Unternehmung steht das große Ziel, Profit für seinen Eigentümer und das Wachstum der Unternehmung selbst zu generieren. Eine Auseinandersetzung mit den ökonomischen Aspekten der Produktionssysteme ist daher auch in dieser Arbeit unumgänglich. Dieses Unterkapitel orientiert sich dabei an den Darstellungen von [KUG13].

2.1.1 Produktionssystem und Produktionsfaktoren

Die Produktion eines Unternehmens stellt einen wichtigen Teil der betrieblichen Leistungserstellung dar und bezeichnet jenen Bereich, in dem der Ausgangsstoff durch den Einsatz von Arbeitskraft, Betriebsmitteln und Energie in ein fertiges Produkt umgewandelt wird. Diese Transformation ist daher als Wertschöpfungsprozess aufzufassen, in dem durch Input – beispielsweise Material, Personal oder Betriebsmittel – ein wirtschaftlich rentabler Output generiert wird (Abbildung 2-1).

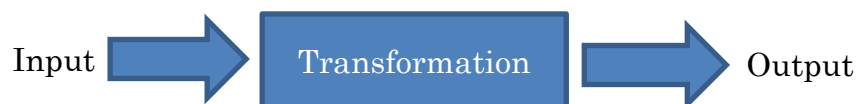


Abbildung 2-1: Das Produktionssystem, (nach [KUG13])

Der Input der Transformation wird dabei durch die Produktionsfaktoren dargestellt, die je nach Auffassung unterschiedlich gegliedert und bezeichnet werden. Eine gängige Klassifizierung lieferte der deutsche Betriebswirt Prof. Erich Gutenberg, indem er zwischen zwei grundsätzlichen Gruppen der Produktionsfaktoren unterschied: Elementarfaktoren und dispositive Produktionsfaktoren. Die Elementarfaktoren beinhalten dabei die objektbezogene menschliche Arbeitsleistung, die verwendeten Betriebsmittel

und die benötigten Werkstoffe. Die dispositiven Faktoren stellen die zugehörige Planung, Organisation und Geschäfts- bzw. Betriebsleitung dar.

Die Transformation als Bindeglied zwischen Input und Output ist für die Kombination der Produktionsfaktoren (Input, r_1, r_2, \dots, r_n) verantwortlich. Dies ist Forschungsgebiet der traditionellen Produktionstheorie, die durch Aufstellen von Produktionsfunktionen die Zusammenhänge von Produktionsfaktoren-Kombinationen und Output (x , entspricht im Fall der Sachgüterproduktion dem fertigen Produkt) darzustellen versucht:

$$x = f(r_1, r_2, \dots, r_n)$$

Gl. 2-1

Dabei werden in der Produktionstheorie zwei Arten der Faktorkombination unterschieden:

- **Substitutionalität:** Wenn Produktionsfaktoren der Substitutionalität zugrunde liegen, bedeutet das, dass ein geringerer Einsatz eines Produktionsfaktors durch einen erhöhten Einsatz eines anderen Produktionsfaktors ausgeglichen werden kann. Als Beispiel sei die Anschaffung einer neuen Maschine als Ersatz für menschliche Arbeitsleistung genannt. Eine Sonderform der Substitutionalität ist die partielle Faktorsubstitution, die unterstellt, dass jeder Produktionsfaktor stets mit einer gewissen Mindestmenge eingesetzt werden muss.
- **Limitationalität:** Bei Produktionsfunktionen, die der Limitationalität unterliegen, können Produktionsfaktoren nur in einem speziellen Verhältnis zueinander eingesetzt werden. Ein Beispiel hierfür wäre eine Tischproduktion, bei der Tischbeine und Tischplatten stets in einem Verhältnis von 4:1 eingesetzt werden müssen. Wenn lediglich die Anzahl der Tischbeine erhöht wird, kann sich keine Erhöhung des Outputs ergeben. Üblicherweise sind in einem Produktionssystem nicht alle Produktionsfaktoren in uneingeschränktem Maße vorhanden, wodurch es zu einem Limit im Output kommt. In dem Beispiel der Tischproduktion wären bei einem Lagerbestand von 4 Tischplatten und 14 Tischbeinen die Tischbeine der sogenannte limitationaler Produktionsfaktor, da insgesamt 16 Tischbeine gebraucht würden um 4 Tische zu produzieren.

Das Verständnis der im System auftretenden Produktionsfaktoren und deren Zusammenspiel ist ein essentieller Bestandteil bei der Optimierungskonzeptbildung. Der Output – im Falle dieses Projekts sind das die Flachstähle der Walzlinie – ist dabei stets als eine Funktion der eingesetzten Produktionsfaktoren zu sehen. Die Analyse der Produktionsfaktoren ist die Hauptaufgabe der Ist-Analyse im 3. Kapitel dieser Masterarbeit.

2.1.2 Maßeinheiten der Effizienz

Das Ziel, ein effizienteres Produktionssystem zu schaffen, hängt nun von einem optimierten Einsatz der zur Verfügung stehenden Produktionsfaktoren ab. Um schnell zu einem möglichst umfassenden Eindruck der ökonomischen Gegebenheiten eines produzierenden Umfelds zu gelangen, ergibt sich der Wunsch, die System-Effizienz in Zahlenwerte zu fassen. Diese quantitative

Betrachtungsweise erlaubt schließlich auch für betriebsferne Personen eine objektive Einschätzung der Lage und macht eine sinnvolle Bewertung von etwaigen Umgestaltungsmaßnahmen jeglicher Art erst möglich. Meistens wird die Effizienz dabei in Kennzahlen wie Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Rentabilität gemessen (siehe Gl. 2-2 bis Gl. 2-4).

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \quad \text{Gl. 2-2}$$

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Erträge}}{\text{Aufwendungen}} \quad \text{Gl. 2-3}$$

$$\text{Umsatzrentabilität} = \frac{\text{Gewinn}}{\text{Umsatz}} \quad \text{Gl. 2-4}$$

Die Produktivität setzt somit den mengenmäßigen Output (z.B. die Anzahl der Fertigerzeugnisse) ins Verhältnis mit den eingesetzten Produktionsfaktoren. So kann zwischen den einzelnen Faktoren differenziert werden und unterschiedliche Gesichtspunkte beleuchtet werden. Ein Beispiel hierfür wäre die Arbeitsproduktivität als Verhältnis von Produktionsmenge und Anzahl der Arbeitsstunden.

Die Wirtschaftlichkeit ist ein quantitatives Maß für den monetären Nutzen eines Systems. Dabei können laut dem ökonomischen Prinzip drei unterschiedliche Ansätze verfolgt werden: das Minimalprinzip (ein fixer Output wird durch möglichst geringen Input hergestellt), das Maximalprinzip (bei fixem Input soll ein möglichst großer Output entstehen) und das Extremumprinzip (Input und Output sind variabel und es wird ein optimales Verhältnis der beiden angestrebt).

Auch die Rentabilität kann auf mehrere Unternehmenszahlen Bezug nehmen. Neben der oben angeführten Umsatzrentabilität ist auch die Eigenkapitalrentabilität ein gängiges Maß für die Verzinsung des eingesetzten Kapitals.

Um der begrenzten Aussagekraft einzelner Kennwerte etwas entgegenwirken zu können, wurden Kennzahlen-Systeme geschaffen, die einen weit umfassenderen Eindruck von der ökonomischen Struktur eines Unternehmens erlauben. Ein weit verbreitetes System ist das Return-on-Investment (ROI) System, welches die Zusammenhänge wirtschaftlicher Kennzahlen gut strukturiert aufzeigt.

$$\text{ROI} = \frac{\text{Gewinn}}{\text{Umsatz}} \times \frac{\text{Umsatz}}{\text{Kapital}} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Das ROI-Kennzahlensystem und seine Zusammensetzung wird auf Seite 55 im Unterkapitel „Zielsetzung“ detaillierter vorgestellt und damit gezeigt, wie die gezielte Veränderung einer Kennzahl den Unternehmenserfolg positiv beeinflussen kann.

2.2 Technische Betrachtung

Neben der Betrachtung der ökonomischen Einflussgrößen ist auch eine umfassende Auseinandersetzung mit den technischen Eigenheiten von Produktions- und Materialflusssystemen nötig, um in weiterer Folge sinnvolle Optimierungskonzepte entwickeln zu können.

Das auf Seite 13 dargestellte, generalisierte Produktionssystem kann für das vorliegende Projekt wie in Abbildung 2-2 gezeigt spezifiziert werden. Die Flachstähle werden in nicht versandbarem Zustand angeliefert. Im System selbst wird durch Einsatz von unterschiedlichen Ressourcen und Stammdaten ein Wertsteigerungsprozess am Material durchgeführt. Der Output ist ein versandbares Produkt.

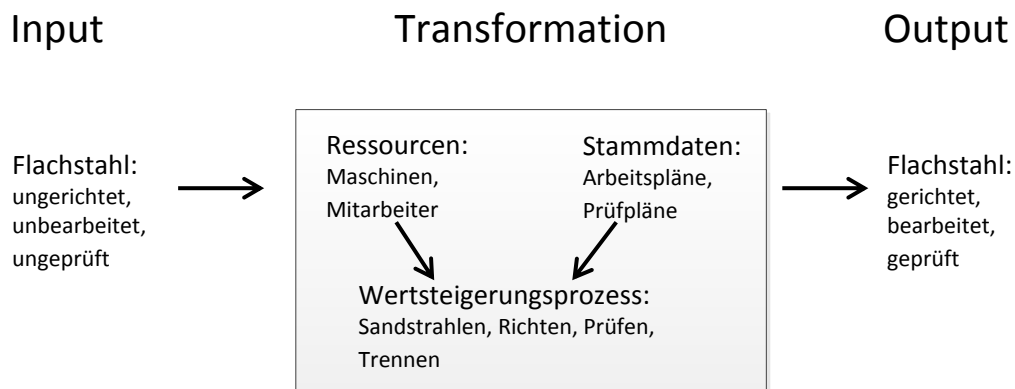


Abbildung 2-2: Das Produktionssystem Halle 8, (in Anlehnung an [KUG13])

Der Bereich der Transformation enthält all jene Produktions- und Prozessschritte, die in dem Projekt betrachtet werden und umfasst verschiedenste Bearbeitungsstationen, Prüfstationen und Transportvorgänge, deren Eigenschaften im Folgenden diskutiert werden sollen.

2.2.1 Der Systembegriff

Der Begriff „System“ leitet sich aus dem Griechischen Wort „systema“ ab, was so viel wie „das Zusammengestellte“ bedeutet. Grundsätzlich wird unter einem System eine Gesamtheit von Elementen verstanden, die miteinander durch Beziehungen verbunden sind [KG95].

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen, die sich - bis auf Unterschiede in der Formulierung – jedoch recht ähnlich sind. So wird etwa das System nach [DIN25424] als „die Zusammenfassung von technisch – organisatorischen Mitteln zur autonomen Erfüllung eines Aufgabenkomplexes“ definiert.

Eine weitere Definition durch Prof. Patzak ([PAT92]) sieht das System als „eine Menge von Komponenten, welche Eigenschaften besitzen und welche durch Beziehungen miteinander zur Verfolgung gesetzter Ziele verknüpft sind“.

Dabei kann jedes beliebige System durch vier unterschiedliche Blickwinkel beschrieben werden [ROP75]:

- Attribute: beschreiben den System-Input- (z.B. Rohstoffe) und Output (z.B. Produkte), sowie die jeweiligen Systemzustände (z.B. Bearbeitung)
- Funktionen: stellen den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen her. Die Funktion „sägen“ des Systems Trennsäge verknüpft beispielsweise den Systeminput Stabstahl mit dem Systemoutput Sägeabschnitt.
- Hierarchie: definiert die hierarchische Ordnung von Subsystemen innerhalb des Gesamtsystems. So kann etwa das System „Trennsäge“ als Subsystem des Gesamtsystems „Produktionshalle“ gesehen werden.
- Struktur: legt die Beziehungen zwischen den Systemelementen und Subsystemen fest und definiert deren Anzahl und Art.

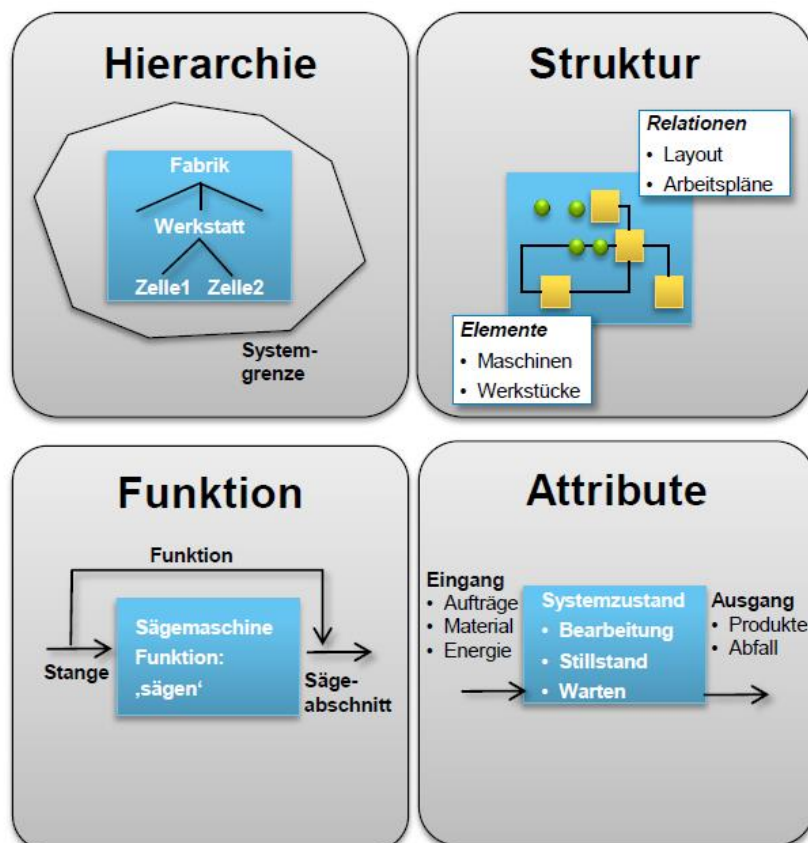


Abbildung 2-3: Unterschiedliche Systembetrachtungen (nach [ROP75])

Das System wird stets durch die Festlegung seiner Systemgrenzen definiert. Elemente offener Systeme treten mit den Komponenten der Umwelt in Beziehung, während geschlossene Systeme dies nicht tun. Durch das Verschieben der Systemgrenzen können offene Systeme auch in geschlossene umgewandelt werden. Entscheidend für die Lage dieser Systemgrenze ist der Zweck der Systemuntersuchung. Eine genauere Beschreibung des vorhandenen Systems kann über die in Tabelle 2-1 angeführten Systemmerkmale und deren Ausprägungen erfolgen.

Tabelle 2-1: Systemmerkmale und deren Ausprägungen

Merkmals	Ausprägung	
Verhältnis zur Umwelt	geschlossen	offen
Zeitabhängigkeit	statisch	dynamisch
Grad der Bestimmtheit	deterministisch	stochastisch
Struktur-Freiheitsgrad	starr	flexibel
Komplexität	einfach	komplex

Produktionssysteme können in Teilsysteme zerlegt werden, die drei unterschiedlichen Aufgabengebieten zuzuordnen sind: Bearbeitungs- bzw. Montagesysteme, Materialflusssysteme und Informationsflusssysteme. [HAR90] teilt diesen Teilsystemen unterschiedliche Funktionen, Objekte und Hauptkomponenten zu (Tabelle 2-2)

Tabelle 2-2: Teilsysteme komplexer Produktionssysteme (nach [KG95])

Teilsystem	Funktion	Objekte	Hauptkomponenten
Bearbeitungs- bzw. Montagesystem	Unmittelbarer Produktionsfortschritt	Werkstücke (Produkte)	Betriebsmittel (Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen), Hilfsstoffe (Schmiermittel,...)
Materialfluss- system	Handhaben, Transportieren	Werkstücke, Werkzeuge, Hilfszeuge,...	Fördermittel (Fahrzeuge, Hebezeuge,...), Förderhilfsmittel (Paletten, Aufnahmeelemente)
Informationsfluss- system	Speichern, Verwalten und Bearbeiten von Informationen	Daten	Hardware, Software

[GUD12] definiert den Begriff Leistungssysteme als „Netzwerke von einzelnen Leistungsstellen, die von Material und Daten durchlaufen werden und bestimmte Leistungen erzeugen“. In einer Leistungsstelle wiederum „werden nach Aufträgen oder Anweisungen unter Einsatz von Material und Ressourcen, wie Personen, Flächen, Gebäuden, Einrichtungen, Maschinen und andere Betriebsmittel, materielle Produkte erzeugt oder immaterielle Leistungen erbracht“. Leistungsstellen, die sich räumlich zusammenfassen lassen, werden dann auf einem höheren Hierarchieniveau als Leistungsbereiche organisiert. Diese Leistungsbereiche lassen sich – gleichartige Leistungen vorausgesetzt – wiederum als Organisationseinheiten zusammenfassen. Komplexe Systeme – denen auch das zu untersuchende Produktionssystem dieser Masterarbeit zuzurechnen ist – bestehen charakteristisch aus einer großen Anzahl von Elementen, die eine starke Verknüpfung untereinander aufweisen. Diese Verknüpfungen sind jedoch nicht statischer Natur, sondern verändern sich über die Zeit, d.h. sie sind dynamisch.

2.2.2 Grundelemente der Materialflusssysteme

Dieses Unterkapitel orientiert sich stark an den Darstellungen von Gudehus [GUD12] und Arnold & Furmans [AF09]

Die von Gudehus definierten Leistungssysteme – zu denen auch Produktionssysteme zählen – sind aus Einzelstationen und deren Verbindungen zueinander aufgebaut und bilden daher ein Netzwerk, durch welches Logistikobjekte und Informationsobjekte laufen. Zu den Logistikobjekten (LO) zählen dabei Material, Produkte, Personen und Transporteinheiten. Informationsobjekte dagegen fassen all jene Informationen zusammen, die zur Leistungserbringung benötigt werden, so zum Beispiel Aufträge, Belege oder andere Daten.

Die Gesamtleistung eines Produktionssystems wird nun durch die Leistungsfähigkeit aller Einzelstationen und deren Verbindungen zueinander bestimmt. Hohe Bestandsbildung in den Puffern bzw. Zwischenlagern oder auf den Förderstrecken erhöhen die Wartezeit der Produkte und damit auch die Durchlaufzeiten. Um nun Aussagen über die Gesamtleistung oder Durchsatzleistung eines Gesamtsystems tätigen zu können, müssen zuvor die Grenzleistungen und Staueffekte der Einzelstationen und Verbindungen untersucht werden. Wenn eine Einzelstation nun einen größeren Zulauf erfährt, als es die Grenzleistung zulassen würde, so kommt es zur Bildung einer Warteschlange, eines Rückstaus oder sogar zu einer Blockierung der vorgelagerten Station.

2.2.2.1 Leistungsdurchsatz

Ein allgemeines Leistungssystem lässt sich aus Eingangsstationen ES_i , Leistungsstationen LS und Ausgangsstationen AS_j zusammensetzen (siehe Abbildung 2-4). Die Eingangsstationen erfahren über die Systemgrenze jeweils Einlaufströme λ_{Ei} [LO/ZE], die sie an eine oder mehrere Leistungsstationen weiterführen. Schlussendlich laufen die Logistikobjekte in die Ausgangsstationen AS_j , die ihrerseits wieder Auslaufströme λ_{Aj} über die Systemgrenze erzeugen. Wenn die Logistikobjekte, die anfangs über den Einlaufstrom das System betreten, anders beschaffen sind als jene Logistikobjekte, die schlussendlich das System über den Auslaufstrom verlassen, so handelt es sich beim vorliegenden Leistungssystem um ein Produktionssystem. Diese Produktionssysteme sind zu unterscheiden von Logistiksystemen (die eintretenden materiellen Logistikobjekte bleiben bis zum Systemaustritt technisch unverändert) und Transportsystemen (die eintretenden Logistikobjekte sind Lade- oder Transporteinheiten, die das System mit demselben Inhalt wieder verlassen).

Die Leistungsfähigkeit eines solchen Leistungssystems wird nun durch eines oder wenige Engpasselemente begrenzt. Diese Engpasselemente sind dadurch charakterisiert, dass diese bei einem vorgegebenen Durchsatz am höchsten ausgelastet sind. Bei der Neudimensionierung eines Leistungssystems ist daher darauf zu achten, dass der geforderte Leistungsbedarf zu den Peak-Zeiten durch die Leistungsstellen bewerkstelligt werden kann. Weiters muss auch die Beschaffenheit der Durchsatzströme berücksichtigt werden. Diese können etwa entweder stationär oder dynamisch, getaktet oder stochastisch sein. Weiters

muss zwischen rekurrenten (Logistikobjekte treten einzeln und unabhängig voneinander in das System ein) und schubweisen (Pulk-Bildung) Strömen unterschieden werden.

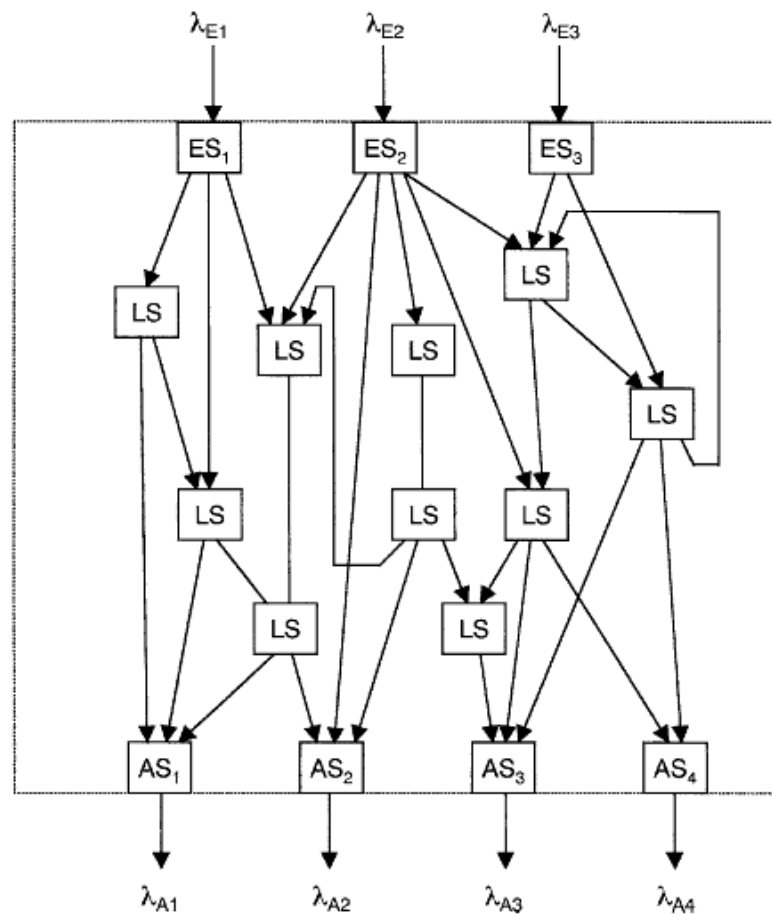


Abbildung 2-4: Allgemeine Struktur eines Leistungssystems (Quelle: [GUD12])

2.2.2.2 Grenzleistungen

Wenn man an der Berechnung der Grenzleistung eines Systems oder der Beurteilung dessen Stauwirkungen interessiert ist, so müssen die Leistungsstationen dieses Systems betrachtet werden. Zu diesem Zweck werden zwei Arten von Leistungsstationen unterschieden:

- **Elementarstationen:** diese verfügen über eine zentrale Abfertigungszone mit einer genau zugewiesenen Funktion. Das Material betritt diese Abfertigungszone, wird dessen Funktion unterzogen und verlässt die Abfertigungszone wieder. Eine Elementarstation lässt sich nicht weiter zerlegen.
- **Zusammengesetzte Stationen:** diese bestehen aus mehreren seriell oder parallel geschalteten Elementarstationen und lassen sich somit auch weiter zerlegen.

Die zusammengesetzten Stationen können selbst auch wieder als Gesamtsystem betrachtet werden, dessen Grenzdurchsatz an die Leistungsfähigkeit seiner Elementarstationen geknüpft ist. Aus diesem Grund wird nun die

Elementarstation näher betrachtet und deren unterschiedlichen Typen analysiert.

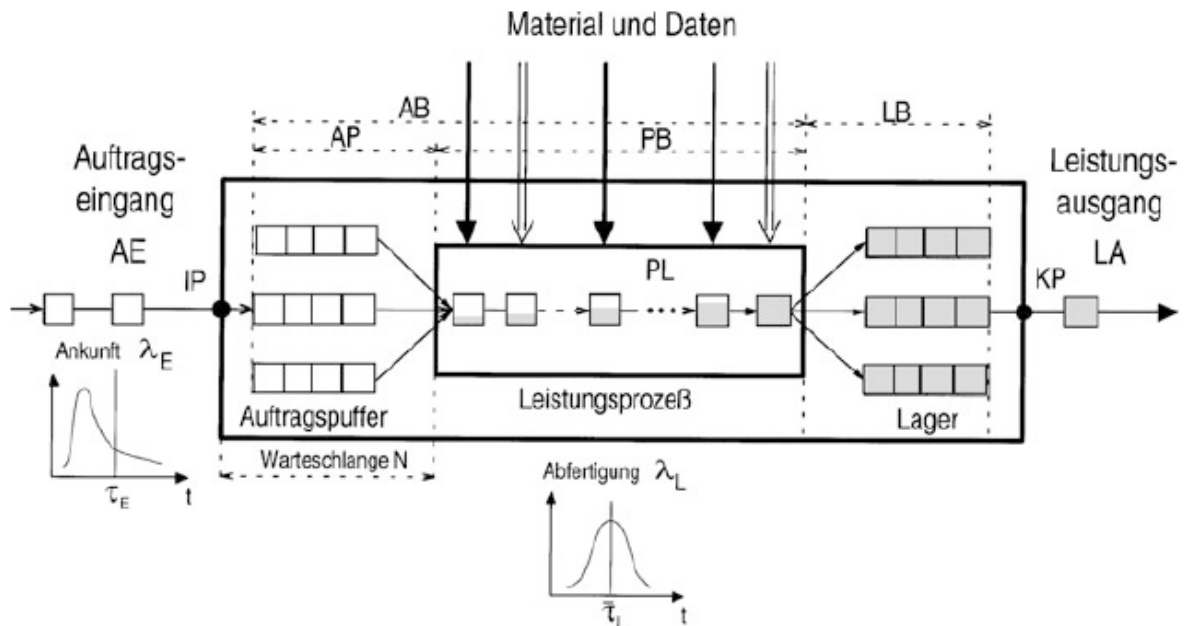


Abbildung 2-5: Darstellung einer Leistungsstelle (Quelle: [GUD12])

Eine allgemeine Elementarstation vom Typ (n, m) verfügt über eine Ordnung $o = n + m$, wobei n die Anzahl unterschiedlicher Einlaufströme $\lambda_{Ei} [LO_i/h]$ und m die Anzahl unterschiedlicher Auslaufströme $\lambda_{Aj} [LO_j/h]$ darstellt. Die Logistikobjekte treten dabei durch die Eingangsstellen E_i in die Abfertigungszone ein und verlassen diese an den Ausgangsstellen A_j . Die drei Basisfunktionen von Materialflusssystemen (Fördern, Verzweigen, Zusammenführen) lassen sich als Elementarstationen darstellen und sind in Abbildung 2-6 zusammengefasst.

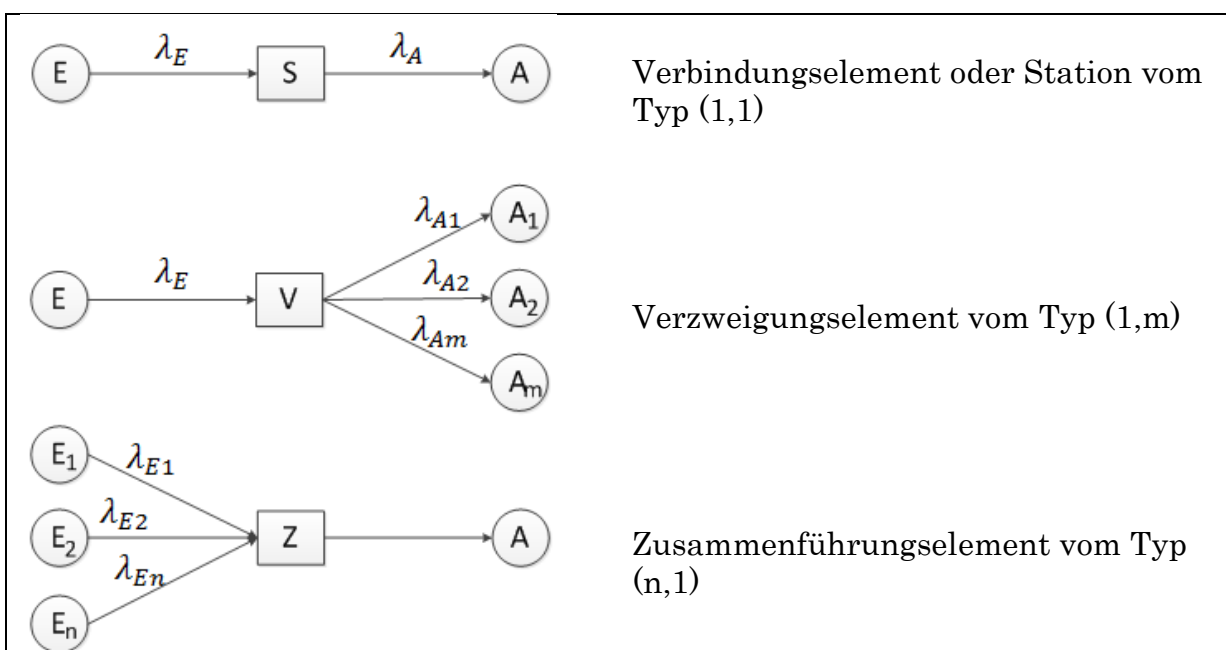


Abbildung 2-6: Einfache Systemelemente (nach [GUD12])

Die einfachsten Elementarstationen sind Quellen, Senken und Bedienstationen: Grundsätzlich – sofern eventuell vorhandene Einlaufströme unberücksichtigt bleiben – sind Quellen Elementarstationen vom Typ $(0, m)$ und geben einen oder mehrere Auslaufströme an die Folgestationen ab. Diese Auslaufströme werden über den Takt τ [s] und die Anzahl der Objekte c [LO], die in einem Pulk erzeugt werden, definiert. Sollte das Leistungssystem nach dem Push-Prinzip funktionieren, so ist die maximale Leistungsanforderung an die Elementarstationen durch die Grenzleistung der Quelle begrenzt. Das Gesamtsystem ist demnach ebenfalls in Bezug auf das Quellverhalten auszulegen. Die Grenzleistung der Quellstation wird über die minimale Taktfrequenz definiert und ergibt sich zu

$$\rho(c) = \lambda_{max}(c) = 3600 \cdot \frac{c}{\tau_{min}} \text{ [LO/h]} \quad \text{Gl. 2-6}$$

Senken sind als das exakte Gegenteil der Quelle definiert. In ihnen werden die Logistikobjekte „eliminiert“. Dies entspricht formal einer Elementarstation vom Typ $(n, 0)$. Die Grenzleistung wird ebenfalls gemäß Gl. 2-6 durchgeführt und ist für Leistungssysteme, die nach dem Pull-Prinzip funktionieren, für die maximale Leistungsanforderung an die Elementarstationen verantwortlich. Die Systemauslegung für solche Systeme muss stets bei der Senke beginnen und sich entgegen den Materialstrom hin zu den Eingangsstationen orientieren.

Bedienstationen sind als Elementarstationen zweiter Ordnung definiert, die über jeweils einen Eingangsstrom und einen Ausgangsstrom verfügen. Dies entspricht dem Typ $(1, 1)$. Die Grenzleistung einer Bedienstation ist gegeben durch

$$\rho(c) = \lambda_{max}(c) = 3600 \cdot \frac{c}{\tau_{ab}} \text{ [LO/h]} \quad \text{Gl. 2-7}$$

und wird daher bei gegebener Anzahl der Logistikobjekte c durch die mittlere Abfertigungszeit τ_{ab} [s] begrenzt. Diese Abfertigungszeit (Taktzeit) ist nur bei getakteter Bearbeitung konstant. Wenn der Abfertigungsprozess jedoch stochastischer Natur ist, so schwankt τ_{ab} um einen Mittelwert.

Für Elementarstation höherer Ordnung mit mehr als einem Eingangsstrom λ_{Ei} und/oder mehr als einem Ausgangsstrom λ_{Aj} wird es sinnvoll erscheinen Materialflussbilanzen zu erstellen. Die n Einlaufströme

$$\lambda_{Ei} = \sum_j \lambda_{ij} \quad \text{Gl. 2-8}$$

werden in der Abfertigungszone in die m Auslaufströme

$$\lambda_{Aj} = \sum_i \lambda_{ij} \quad \text{Gl. 2-9}$$

umgewandelt. Die Gesamtbelastung der Elementarstation ergibt sich somit zu

$$\lambda = \sum_{ij} \lambda_{ij} = \sum_i \lambda_{Ei} = \sum_j \lambda_{Aj} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Wie in den Gleichungen ersichtlich können bei n Eingangsströmen und m Ausgangsströmen insgesamt $n \cdot m$ unterschiedliche Partialströme unterschieden werden. All diese Partialströme sind dem partiellen Grenzleistungsgesetz unterstellt, wonach alle partiellen Auslastungen ρ_{ij} maximal den Wert ihrer zulässigen Maximalbelastung aufweisen können:

$$\rho_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\mu_{ij}} \leq 1 \quad \text{Gl. 2-11}$$

2.2.2.3 Warteschlangen-Theorie

Dieses Kapitel orientiert sich an den Ausführungen von Arnold und Furmans (vgl. [AF09]).

Häufig kommt es bei der Analyse von Leistungssystemen vor, dass der Anteil der tatsächlichen wertschöpferischen Tätigkeit einen äußerst geringen Prozentsatz an der Gesamtdurchlaufzeit ausmacht. Den größten Anteil an der Durchlaufzeit haben sehr oft geplante oder ungeplante die Wartezeiten. Dies kann [AF09] zufolge mehrere Gründe haben:

- Lagerhaltung aufgrund von Schwankungen in Produktion- und Nachfrage
- prozessbedingte Wartezeit (z.B. zum Trocknen oder Kühlen eines Werkstoffs)
- Staubildung durch Störungen von Betriebsmitteln
- schwankende (stochastische) Bearbeitungszeiten
- ablaufbedingte Änderungen wie Überprüfungen oder Nacharbeit

Bei der Gestaltung oder Umstrukturierung eines Materialflusssystems wird die Minimierung von Wartezeiten stets das wichtigste Ziel darstellen. Auch wenn gewisse (z.B. störungsbedingte) Wartezeiten nicht ausgeschlossen werden können, so ist es durch ein durchdachtes Materialflusskonzept dennoch möglich, Wartezeiten von Leistungsobjekten zu reduzieren. Dadurch sinken die Bestände in den vorgelagerten Materialfluss-Puffern, was wiederum einer Verringerung des gebunden Kapitals im Unternehmen gleichbedeutend ist. Durch die Reduktion des Umlaufvermögens – zu denen die Bestände zählen – wird auch die Rentabilität in Form des ROI positiv beeinflusst.

In Abbildung 2-7 werden die einzelnen Bereiche eines Wartesystems schematisch wiedergegeben. Die in der Quelle (Q) erzeugten Förderelemente (FE) überschreiten mit einer Ankunftszeit t_a – die eine wahrscheinlichkeitsverteilte Zufallsgröße darstellt – die Systemgrenze der Elementarstation. Diese wahrscheinlichkeitsverteilte Ankunftszeit besitzt einen gewissen Erwartungswert $E(t_a)$, der zur Berechnung der Ankunftsrate λ an der Systemgrenze herangezogen wird:

$$\lambda = \frac{1}{E(t_a)} \quad \text{Gl. 2-12}$$

Wenn die Fördereinheiten nun über die Systemgrenzen eingetreten sind, beginnt für sie der Warteprozess. Anschließend werden die Fördereinheiten im Bedienprozess abgefertigt. In der Regel folgt die Bedienzeit t_b ebenfalls einer

Wahrscheinlichkeitsverteilung, weswegen auch hier ein Erwartungswert der Bedienzeit $E(t_b)$ existiert. Durch die Kehrwertbildung wird wiederum die Kennzahl der Bedienrate μ berechnet, die Aussagen darüber trifft, wie viele Fördereinheiten pro Zeiteinheit das System nach der Bedienung im Mittel wieder verlassen:

$$\mu = \frac{1}{E(t_b)} \quad \text{Gl. 2-13}$$

Der Auslastungsgrad ρ gibt das Verhältnis von Ankunfts- und Bedienrate in der Elementarstation an:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad \text{Gl. 2-14}$$

Sofern die Zwischenankunftszeit t_a des Ankunftsprozesses $A(t)$ und die Bedienzeit t_b des Bedienprozesses $B(t)$ einem regelmäßigen Takt folgen und falls

$$t_a < t_b \Leftrightarrow \mu > \lambda \Leftrightarrow \rho < 1 \quad \text{Gl. 2-15}$$

gilt, so ist es nicht möglich, dass sich eine Warteschlange entwickelt. Die Bedingung, dass $\rho < 1$ gelten muss ist notwendig – nicht jedoch hinreichend – für die Aussage, dass sich keine Warteschlange bilden kann. Sofern mindestens einer der beiden Prozesse $A(t)$ oder $B(t)$ stochastischer Natur ist, so kann sich auch bei einem Auslastungsgrad kleiner 1 eine Warteschlange entwickeln. Die Beschreibung des Warteprozesses $W(t)$ als Ergebnis des Zusammenspiels von Ankunftsprozess und Bedienprozess ist Aufgabe der Warteschlangentheorie. Dieser Warteprozess wird für Auslastungsgrade kleiner 1 nach einer Anlaufphase einen eingeschwungenen Zustand annehmen, der sich ebenfalls durch eine Verteilungsfunktion beschreiben lässt und somit auch über einen Erwartungswert N_W der Warteschlangenlänge verfügt. Die Entstehung der Warteschlange – die eben angesprochene Einschwingphase also – wird üblicherweise nicht mit den analytischen Berechnungen der Warteschlangentheorie betrachtet. Dieses Teilgebiet lässt sich jedoch gut mittels Simulationsmethodik handhaben.

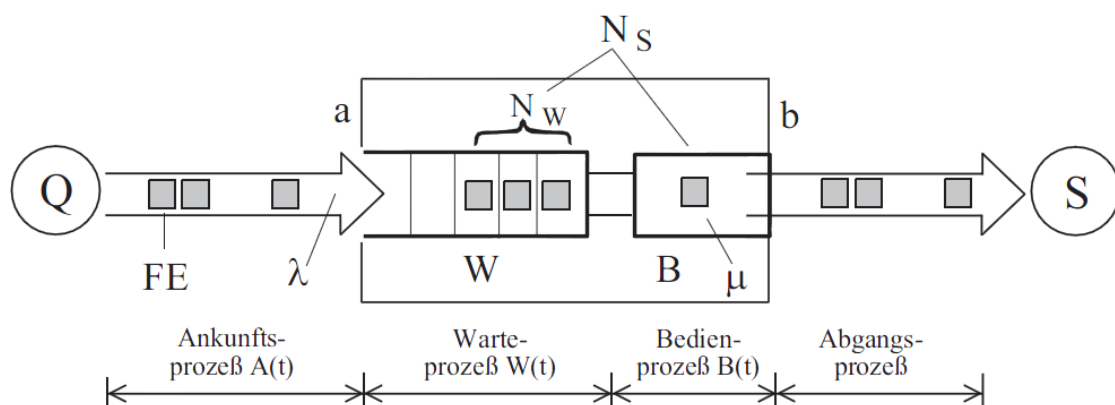


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung eines Wartesystems (Quelle: [GUD12])

Die Klassifizierung von Warteschlangen erfolgt nach der Kendall'schen Notation:

$A | B | m | xxxx$

Gl. 2-16

Dabei gilt für die Platzhalter:

- A Beschreibt den Ankunftsprozess $A(t)$ durch Angabe der statistischen Verteilung, die der Zwischenankunftszeit t_a zugrunde liegt.
- B Beschreibt den Bedienprozess $B(t)$ durch Angabe der statistischen Verteilung, die der Bedienzeit t_b zugrunde liegt.
- m Anzahl identischer, paralleler Bedienstationen
- xxxx Abfertigungsdisziplin

Für die Beschreibung des Ankunfts- und Bedienprozesses (Platzhalter A und B) werden häufig folgende Verteilung verwendet:

- M Exponentialverteilung (bezeichnet nach Markov)
- E_k Erlang-Verteilung
- D Konstanter Wert (Diracverteilung; für fix getaktete Prozesse)
- G Beliebige Verteilung (General Distribution), die nicht mathematisch beschrieben werden kann. Erwartungswert und Varianz sind jedoch bekannt.

Für die Anzahl identischer, paralleler Bedienstationen m kann generell jeder beliebige Wert eingesetzt werden.

Die Abfertigungsstrategien sollten auf die Ziele des Gesamtsystems abgestimmt sein und können unter anderem folgende Formen annehmen:

- FIFO First In – First Out. Dies entspricht der klassischen Warteschlange. Je früher ein Element gespeichert wird, desto früher wird es diesem Speicher auch wieder entnommen.
- LIFO Last In – First Out. Dies entspricht dem Stapel-Prinzip: Jenes Element, das zuletzt auf den Stapel gelegt wird, wird auch zuerst wieder diesem Stapel entnommen.
- Random Zufällige Elementauswahl

Sofern keine Abfertigungsstrategie angegeben ist gilt automatisch FIFO.

Anhand des $M | M | 1$ – Modells soll exemplarisch die Berechnung der Warteschlangenkenngößen gezeigt werden:

Nach der Kendall-Notation ist das $M | M | 1$ – Modell so festgelegt, dass sowohl der Ankunftsprozess als auch der Bedienprozess einer Exponentialverteilung unterstellt sind und nur eine Bedienstation vorhanden ist. Durch das Vorliegen der Exponentialverteilungen lässt sich eine Aussage über die Anzahl der Ankünfte je Zeiteinheit und über die Anzahl an Bedienungen je Zeiteinheit treffen. Diese folgen aufgrund der jeweiligen Exponentialverteilung von $A(t)$ und $B(t)$ nämlich der Poisson-Verteilung, was als Markov-Eigenschaft bezeichnet wird. Die Markov-Eigenschaft bedeutet, dass der Prozess „gedächtnislos“ ist, das heißt, dass nur der aktuelle Zustand des Systems über dessen weiteren Prozessverlauf bestimmt und die Vergangenheit, die zum aktuellen Zustand

geführt hat, keine Bedeutung mehr hat. Diese Zustände lassen sich durch einen Zustandsgraphen der Markov-Kette illustrieren (Abbildung 2-8).

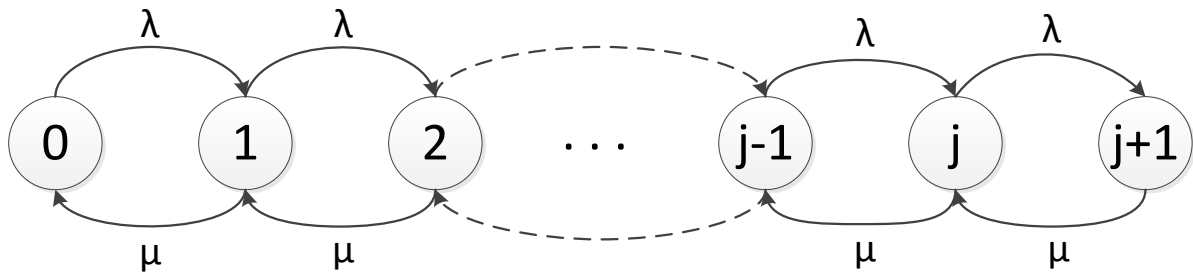


Abbildung 2-8: Markov-Kette eines Wartesystems (nach [AF09])

Die Anzahl der Fördereinheiten, die sich im Wartesystem befinden ist durch den Zustand j gegeben. Das System startet beim Zustand $j = 0$, bei dem sich keine Fördereinheiten im Wartesystem befinden. Nach einer gewissen Anlaufphase wird sich eine Warteschlange vor der Bedieneinheit bilden. Nun kommt es auf die Ankunftsrate λ und die Bedienrate μ an, in welchen Zustand sich das System weiterentwickelt und ob die Warteschlange wächst oder kleiner wird. Die Wahrscheinlichkeiten $p(j)$ der Systemzustände j lassen sich als Histogramm darstellen (Abbildung 2-9).

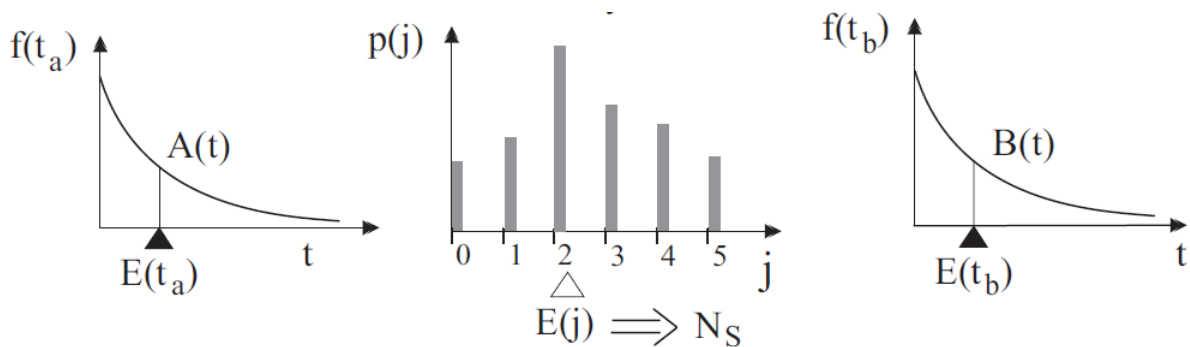


Abbildung 2-9: Ankunftsprozess, WK der Systemzustände, Bedienprozess (Quelle: [AF09])

Eine Zustandsänderung der Warteschlange kann nur erfolgen, wenn entweder ein Element mehr in das System eintritt, oder ein Element das System verlässt. Dadurch ergeben sich zwei Fragestellungen:

- Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit $p_1^a(\Delta t)$, dass während einer sehr kleinen konstanten Zeitdauer Δt genau ein Element das System betritt?
- Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit $p_1^b(\Delta t)$, dass während einer sehr kleinen konstanten Zeitdauer Δt genau ein Element das System verlässt?

Laut der Poisson-Verteilung gilt für die Wahrscheinlichkeit, dass i Elemente in einem Zeitintervall t eintreffen, folgender Zusammenhang:

$$p_i(t) = \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \quad \text{Gl. 2-17}$$

Der Ankunftsprozess kann daher allgemein folgendermaßen beschrieben werden:

$$p_i^a(t) = \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \quad \text{Gl. 2-18}$$

Für die Ankunft von nur einem Element gilt daher:

$$p_1^a(t) = \lambda t e^{-t\lambda} \quad \text{Gl. 2-19}$$

Für kleine Zeitintervalle:

$$p_1^a(\Delta t) = \lambda \Delta t e^{-\Delta t \lambda} \quad \text{Gl. 2-20}$$

Durch Einsatz der Taylorreihenentwicklung für den Term $e^{-\Delta t \lambda}$ und nachfolgendem Kürzen der vernachlässigbaren Terme bei sehr kleinem Δt kann die Gleichung durch Approximation weiter vereinfacht werden zu:

$$p_1^a(\Delta t) \cong \lambda \Delta t \quad \text{Gl. 2-21}$$

Die Herleitung für den Bedienprozess geschieht analog und führt zu:

$$p_1^b(\Delta t) \cong \mu \Delta t \quad \text{Gl. 2-22}$$

Mit Gl. 2-21 und Gl. 2-22 kann nun die Wahrscheinlichkeit eines jeden Systemzustands j berechnet werden. Dies soll nun exemplarisch am Zustand $j = 0$ (kein Element befindet sich im System) gezeigt werden. Dieser Zustand tritt auf wenn folgende Punkte zutreffen:

- Das System befindet sich bereits im Zustand $j = 0$ und während des Zeitfensters Δt tritt kein Element ein
- Das System befindet sich im Zustand $j = 1$. Es tritt während des Zeitfensters Δt kein zusätzliches Element ein UND es wird während Δt ein Element abgefertigt.
-

Diese Markov-Kette wird in Abbildung 2-10 dargestellt:

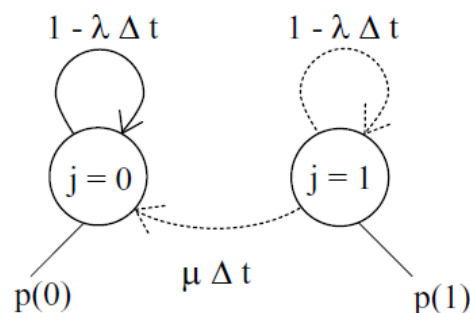


Abbildung 2-10: Markov-Kette für den Zustand $j=0$ (Quelle: [AF09])

Dabei bezeichnet der Ausdruck $1 - \lambda \Delta t$ die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb von Δt kein neues Element das System betritt und $\mu \Delta t$ die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb von Δt ein Element abgefertigt wird. Die Wahrscheinlichkeit des Zustands $j = 0$ ergibt sich somit zu

$$p(0) = p(0) \cdot (1 - \lambda \Delta t) + p(1) \cdot (1 - \lambda \Delta t) \cdot \mu \Delta t \quad \text{Gl. 2-23}$$

Durch Ausmultiplizieren ergibt sich:

$$p(0) = p(0) - p(0) \cdot \lambda \Delta t + p(1) \cdot \mu \Delta t - p(1) \cdot \lambda \cdot \mu \cdot \Delta t^2 \quad \text{Gl. 2-24}$$

Der Term $p(1) \cdot \lambda \cdot \mu \cdot \Delta t^2$ wird bei kleinen Δt vernachlässigbar. Nach Umformung auf $p(1)$ ergibt sich:

$$p(1) = p(0) \cdot \frac{\lambda}{\mu} = p(0) \cdot \rho \quad \text{Gl. 2-25}$$

Wenn diese Herleitungen auch für alle anderen System-Zustände j durchgeführt werden, ergibt sich folgende Rekursion:

$$\begin{aligned} p(2) &= p(0) \cdot \rho^2 \\ p(3) &= p(0) \cdot \rho^3 \\ &\dots \\ p(j) &= p(0) \cdot \rho^j \end{aligned} \quad \text{Gl. 2-26}$$

Die Summe dieser Wahrscheinlichkeiten muss wiederum 1 ergeben:

$$p(0) \sum_{j=0}^{\infty} \rho^j = 1 \quad \text{Gl. 2-27}$$

Wenn man für den Ausdruck $\sum_{j=0}^{\infty} \rho^j$ dessen Wert $1/(1 - \rho)$ einsetzt, so erhält man die Wahrscheinlichkeit für den Zustand des leeren Systems $j = 0$:

$$p(0) = 1 - \rho \quad \text{Gl. 2-28}$$

Da nun die Wahrscheinlichkeit für jeden Systemzustand j beschrieben werden kann, ist es auch möglich eine Aussage über den Erwartungswert der Verteilung zu treffen.

$$E(j) = \sum_{j=0}^{\infty} j p(j) = \sum_{j=0}^{\infty} j p(0) \rho^j \quad \text{Gl. 2-29}$$

Durch Verwendung der Summenformel der Reihe

$$\sum_{j=0}^{\infty} j \rho^j = \frac{\rho}{1 - \rho^2} \quad \text{Gl. 2-30}$$

und mit Gl. 2-28 ergibt sich schließlich für die mittlere Anzahl von Elementen im Wartesystem N_S (siehe Abbildung 2-7) der folgende Ausdruck:

$$E(j) = \frac{\rho}{1 - \rho} \equiv N_S \quad \text{Gl. 2-31}$$

Durch Verwendung des Zusammenhangs $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ kann auch geschrieben werden:

$$N_S = \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \quad \text{Gl. 2-32}$$

Da nun die wichtigste Kennzahl der Warteschlange für das $M | M | 1$ – Modell hergeleitet wurde, kann auch noch eine Aussage über die mittlere Anzahl von Elementen im Warteraum berechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich kein Element im Wartesystem befindet ist durch Gl. 2-28 gegeben. Durch Bildung der Gegenwahrscheinlichkeit wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass die Bedienstation momentan ein Teil abfertigt. Diese ist somit gegeben durch

$$1 - p(0) = \rho \quad \text{Gl. 2-33}$$

Die mittlere Anzahl der Elemente im Warteraum ergibt sich mit der Wahrscheinlichkeit, dass die Bedienstation besetzt ist (Gl. 2-33) und Gl. 2-32 zu:

$$N_W = N_S - \rho = \frac{\rho}{1 - \rho} - \rho = \frac{\rho^2}{1 - \rho} \quad \text{Gl. 2-34}$$

Die Verweilzeit t_S im Wartesystem wird durch das Gesetz von *LITTLE* bestimmt:

$$t_S = N_S \cdot E(t_a) = \frac{N_S}{\lambda} \quad \text{Gl. 2-35}$$

Für $M | M | 1$ - Warteschlangen kann dies noch vereinfacht werden zu:

$$t_S = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad \text{Gl. 2-36}$$

Die Verweilzeit t_W im Warteraum lässt sich durch Umformen von *LITTLE's* Gesetz berechnen:

$$t_S = \frac{N_S}{\lambda} = \frac{N_W + \rho}{\lambda} = \frac{N_W}{\rho} + \frac{1}{\mu} = t_W + E(t_b) \quad \text{Gl. 2-37}$$

$$t_W = t_S - E(t_b) \quad \text{Gl. 2-38}$$

Für $M | M | 1$ - Warteschlangen kann dies noch vereinfacht werden zu:

$$t_W = \frac{1}{\mu - \lambda} - \frac{1}{\mu} = \frac{N_S}{\mu} = \frac{N_W}{\lambda} \quad \text{Gl. 2-39}$$

Die Entwicklung von N_W und N_S in Abhängigkeit von ρ ist in Abbildung 2-11 ersichtlich. Der starke Anstieg bei höheren Werten von ρ ist bezeichnend für dieses Modell.

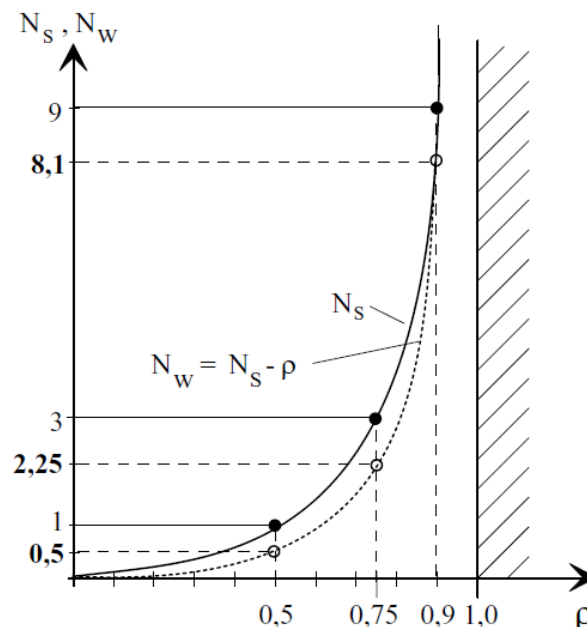


Abbildung 2-11: N_W und N_S in Abhängigkeit von ρ im $M | M | 1$ - Wartesystem (Quelle: [AF09])

Für andere Warteschlangenmodelle führt die Herleitung der Kennwerte naturgemäß zu anderen Ergebnissen. Diese Herleitungen würden an dieser Stelle allerdings den Rahmen der Masterarbeit sprengen und werden daher nicht weiter angeführt.

2.2.2.4 Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit

Meist werden im täglichen Sprachgebrauch die beiden Wörter Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit synonym gebraucht. Bei exakter Betrachtung muss jedoch eine klare Unterscheidung der beiden Bedeutungen gemacht werden, da sie mathematisch gesehen verschiedene Aussagen über ein System tätigen.

Nach [STR02] ist die Zuverlässigkeit als „Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, eine vorgegebene Funktion innerhalb vorgegebener Grenzen und für eine gegebene Zeitdauer zu erfüllen“ definiert. Dabei sind werden unter vorgegebenen Grenzen gewisse Umweltbedingungen wie beispielsweise Temperaturbereiche oder Messgenauigkeiten verstanden, innerhalb denen das System arbeiten muss um funktionsfähig zu sein. Verfügbarkeit dagegen ist „die Wahrscheinlichkeit, eine Betrachtungseinheit zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem funktionsfähigen Zustand anzutreffen“. Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit sind daher sich ergänzende Begriffe. Ein System mit hoher Verfügbarkeit ist nicht zwangsläufig ein sehr zuverlässiges System und umgekehrt. In Abbildung 2-12 ist im oberen Bildbereich ein System dargestellt, das zwar über eine hohe Zuverlässigkeit verfügt (MTBF = 5,5 Jahre), jedoch nur über eine geringe Verfügbarkeit (5,5 Jahre von 9,5 Jahren; 58%). Im unteren Bildbereich ist ein System abgebildet, welches zwar eine hohe Verfügbarkeit aufweist (1 Jahr von 1,1 Jahren, 91%), aber nur eine geringe Zuverlässigkeit (MTBF = 1 Jahr).

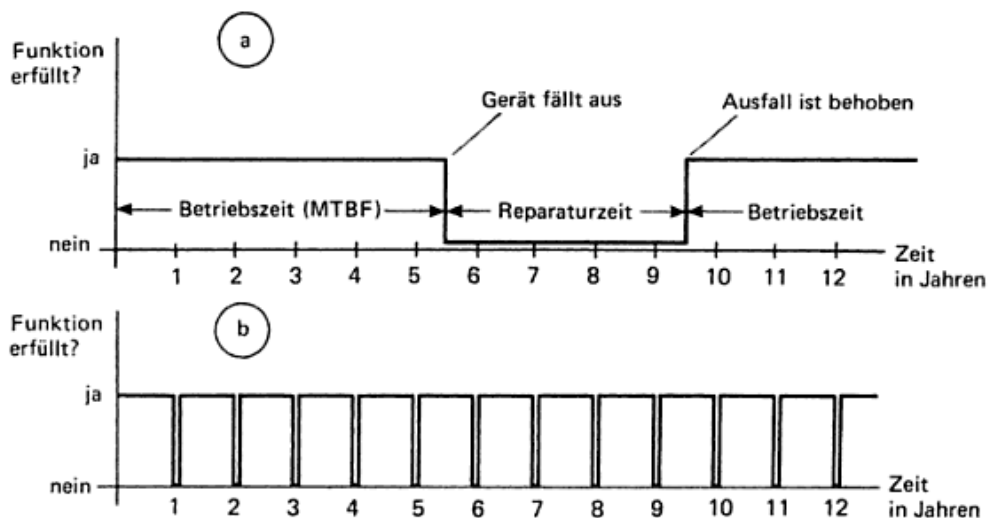


Abbildung 2-12: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Systemen (Quelle: [STR02])

Die Darstellung der Ausfälle kann erneut mittels Poisson-Verteilung erfolgen, solange zwei Voraussetzungen erfüllt sind:

- Die Wahrscheinlichkeit eines Systemausfalls ist abhängig von der Größe des betrachteten Zeitintervalls.
- Die Wahrscheinlichkeit eines Systemausfalls ist für disjunkte Zeitabschnitte statistisch unabhängig.

Die Verwendung der Poisson-Verteilung erlaubt daher – wie bereits in 2.2.2.3 erläutert wurde – die Schlussfolgerung, dass die Zeiten zwischen zwei Ausfällen

exponentialverteilt sind [AF09]. Die Zuverlässigkeitsfunktion kann daher geschrieben werden als:

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{MTBF}} \quad \text{Gl. 2-40}$$

Sofern die Ausfallrate λ bekannt ist, kann durch die Zuverlässigkeitsfunktion die Überlebenswahrscheinlichkeit einer gegebenen Zeitdauer berechnet werden. Die Bestimmung der Ausfallrate λ wird meist durch die Analyse historischer Systemdaten bestimmt. Der Verlauf von $R(t)$ ist in Abbildung 2-13 ersichtlich.

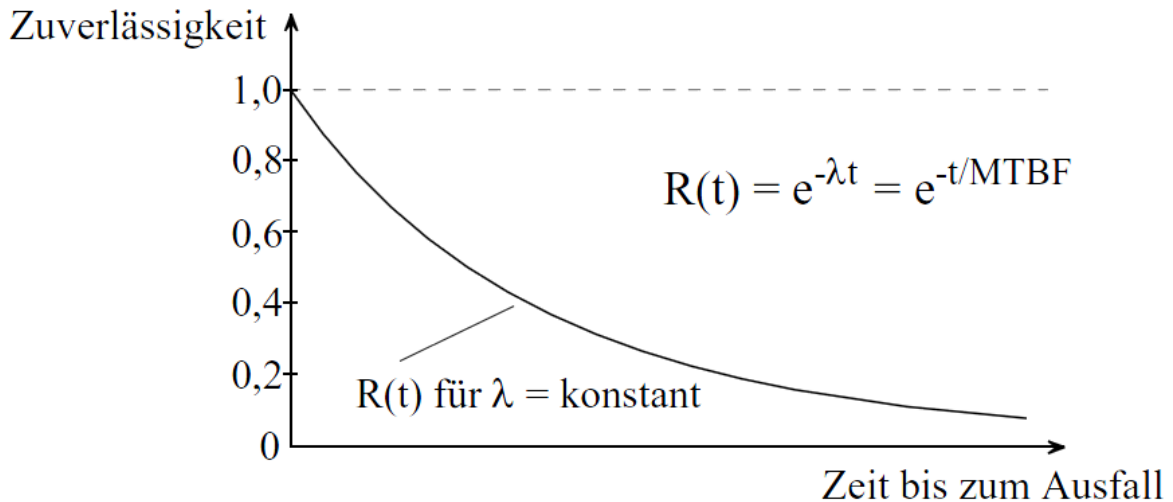


Abbildung 2-13: Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ für ein konstantes λ (Quelle: [AF09])

Ein System kann prinzipiell nur die beiden dichotomen Zustände „funktionsfähig“ und „nicht funktionsfähig“ annehmen. Dies kann wiederum als Markov-Kette in einem Zustandsgraphen dargestellt werden (Abbildung 2-14).

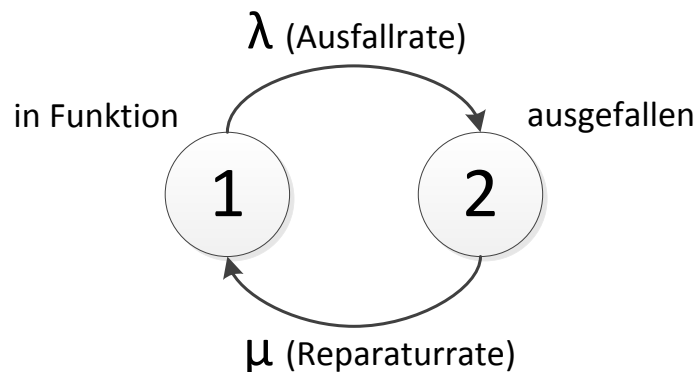


Abbildung 2-14: Markov-Kette der Verfügbarkeit

Um nun die Verfügbarkeit als Wahrscheinlichkeit mathematisch formulieren zu können werden in Bezug auf die Markov-Kette folgende drei Prämissen festgelegt:

- Das System kann sich nur in einem Zustand gleichzeitig befinden.
- Ausfallrate und Reparaturrate sind konstant.
- Markov-Eigenschaft („Gedächtnislosigkeit“): Der aktuelle Zustand ist ein Ergebnis früherer Zustände. Diese früheren Zustände sind für die weitere Entwicklung irrelevant.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das System in Zustand 1 befindet, soll mit $P_1(t)$ bezeichnet werden und ist somit eine Funktion der Zeit. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das System zum Zeitpunkt $t = 0$ im Zustand 1 befindet sei mit $P_1(0) = \alpha$ gegeben, wobei $0 \leq \alpha \leq 1$ gilt. Die Verfügbarkeit – die ja der Wahrscheinlichkeit $P_1(t)$ entspricht – ergibt sich zu:

$$P_1(t) = V(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \left(\alpha - \frac{\mu}{\mu + \lambda}\right) \cdot e^{-(\mu + \lambda)t} \quad \text{Gl. 2-41}$$

Die Zeitabhängigkeit der Funktion wird dann vernachlässigbar, wenn man den Grenzwert $t \rightarrow \infty$ bildet:

$$V = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad \text{Gl. 2-42}$$

Dieser konstante Wert für die Verfügbarkeit stellt sich demnach als Folge eines Gleichgewichts-Zustandes ein, das nach „unendlich“ langer Zeit eintritt. Durch diesen Umstand können auch die nun statistisch gesicherten Werte MTBF und MTTR zur Berechnung der Verfügbarkeit verwendet werden. Die MTBF ist als Erwartungswert der störungsfreien Einsatzzeitdauer t_E und die MTTR als Erwartungswert der Ausfallszeitdauer t_A definiert.

$$MTBF = E(t_E) = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Gl. 2-43}$$

$$MTTR = E(t_A) = \frac{1}{\mu} \quad \text{Gl. 2-44}$$

Dadurch kann man die aus der Literatur bekannte Gleichung zur Berechnung der Verfügbarkeit definieren:

$$V = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \text{Gl. 2-45}$$

2.2.3 Modellierung logistischer Systeme

Ein Aufgabenbereich, der in verschiedensten ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen immer wieder anzutreffen ist, ist die Abstraktion realer Systeme und deren korrekte Überführung in analytisch handhabbare Modelle. Im Bereich der Materialflusstechnik ist die Modellbildung ein wichtiges Instrument, das oft zur Planung zukünftiger oder aber auch zur Analyse und Optimierung bestehender Systeme eingesetzt wird. Die Kunst dabei ist es, die Realität auf genau dem Abstraktionsniveau zu modellieren, das für die Beantwortung der gegebenen Problemstellung zielführend ist. An dem entstandenen Modell werden dann qualitative und quantitative Erkenntnisse getroffen, die auf das Realsystem übertragbar sind (siehe Ablauf in Abbildung 2-15). Einige Möglichkeiten, Materialflüsse und Produktionssysteme modellieren zu können werden in diesem Kapitel vorgestellt.

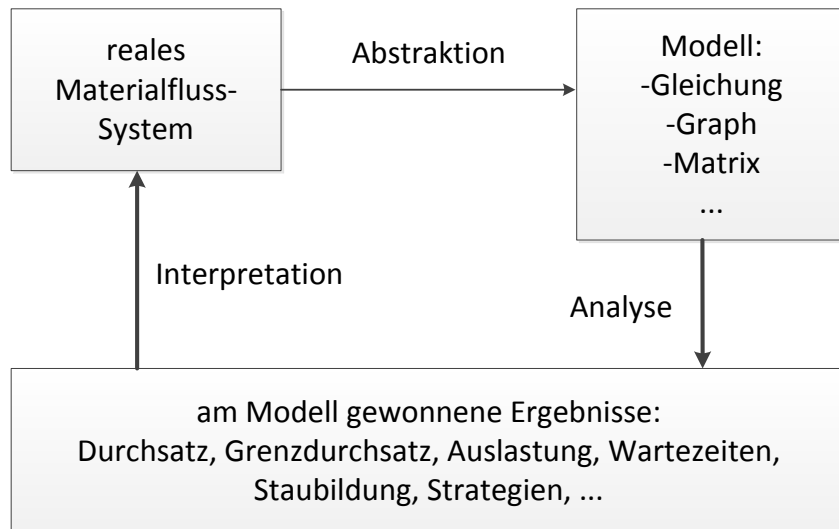


Abbildung 2-15: Modellierung materialflusstechnischer Systeme (nach [AF09])

2.2.3.1 Darstellung des Materialflusses nach VDI 3300

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) schlägt in seiner Richtlinie VDI 3300 eine Systematik zur Darstellung von Materialflüssen vor. Diese besteht aus einem Zusammenspiel zweier Teilbereiche. Einerseits werden in einem Materialflussbogen alle Arbeitsschritte tabellarisch erfasst. Jeder Arbeitsschritt erhält eine eindeutige Nummer und wird einem von sechs Tätigkeitsbereichen zugeordnet, die grafisch durch je ein Symbol repräsentiert werden. Weiters können je Arbeitsschritt zusätzliche Informationen erfasst werden. So enthält der VDI Materialflussbogen Möglichkeiten zum Erfassen von Fördermengen, Fördermitteln, Transportstreckeninformationen und vieles mehr. Andererseits werden die Arbeitsschritte in der Materialflussskizze abgebildet. Dazu dienen meist maßstabsgetreue Layoutpläne als Grundlage, auf der unter Zuhilfenahme der Symbole aus dem Materialflussbogen die Materialflüsse und Produktionsprozesse abgebildet werden.

Durch die vom VDI vorgeschlagene Systematik, lassen sich Materialflüsse überblicksartig darstellen und erlauben einen ersten schnellen Einblick in die Vorgänge des abgebildeten Systems.

2.2.3.2 Flussdiagramme

Die Verwendung von Flussdiagrammen hat sich in unterschiedlichsten Bereichen und Fachdisziplinen erfolgreich etabliert. Vor allem in der Informationstechnologie sind Flussdiagramme ein beliebtes Mittel zur Systemdarstellung. Durch sie lassen sich zeitliche Abfolgen von Prozessen darstellen und ermöglichen somit eine Analyse der Ablaufgestaltung. Durch die Verwendung von Schnittstellenelementen können dabei Detailprozesse ausgegliedert werden oder unterschiedliche hierarchische Ebenen betrachtet werden. Die gängigste Darstellung erfolgt gemäß [DIN66001] (Abbildung 2-16).

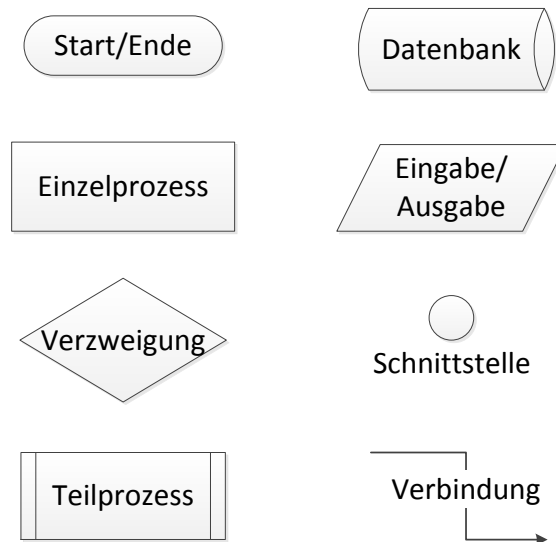


Abbildung 2-16: Beispiel-Symbole für Flussdiagramme nach [DIN66001]

2.2.3.3 Graphen

Die Darstellung von Materialflussstrukturen durch Graphen ermöglicht eine grundsätzliche Darstellung der Beziehungen zwischen Leistungsstellen. Ein Graph G besteht aus einer Menge V (engl. vertex) von Knoten und einer Menge E (engl. edge) von Kanten bzw. Pfeilen:

$$G = G(V, E) \quad \text{Gl. 2-46}$$

$$V = \{1, 2, \dots, i, j, \dots, n\} \quad \text{Gl. 2-47}$$

Jedem Element aus E wird dabei ein Knotenpaar aus V zugewiesen. Sofern die Reihenfolge der Knoten unerheblich ist und (i, j) also gleichbedeutend ist mit (j, i) wird von einem ungerichteten Graphen gesprochen und die Elemente aus E werden als Kanten k_i bezeichnet. Wenn die Reihenfolge der Knoten jedoch eine Rolle spielt, so spricht man von einem gerichteten Graphen oder Digraphen. Die Elemente aus E werden dann Pfeile p_i genannt.

$$E = \{k_1, k_2, \dots, k_m\} \dots \text{Kanten} \quad \text{Gl. 2-48}$$

$$E = \{p_1, p_2, \dots, p_m\} \dots \text{Pfeile} \quad \text{Gl. 2-49}$$

Sofern alle Knoten eines Graphen miteinander verbunden sind, so wird im Falle von Kanten von vollständigen ungerichteten Graphen gesprochen. Die Anzahl der Kanten lässt sich somit berechnen mit

$$m = \frac{n(n-1)}{2} \quad \text{Gl. 2-50}$$

Wenn es sich jedoch um einen vollständigen Digraphen ohne Schlingen und Parallelpfeile handeln, so wird die Pfeilanzahl folgendermaßen berechnet:

$$m = n(n-1) \quad \text{Gl. 2-51}$$

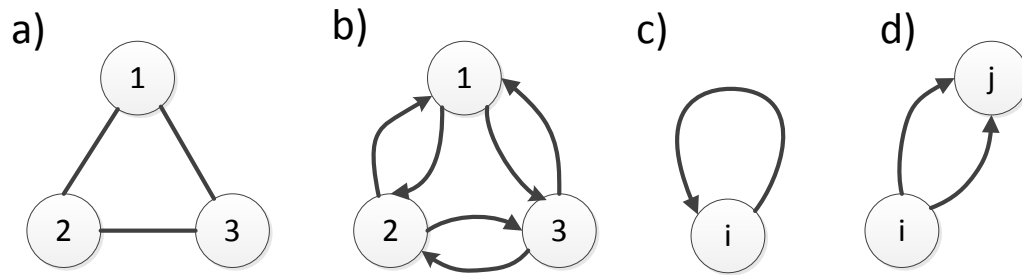


Abbildung 2-17: Graphen: a) vollständiger ungerichteter Graph
b) vollständiger Digraph c)Schlinge d)Parallelpfeil

In der Abstraktion von Materialflusssystemen kommen ausschließlich gerichtete Graphen zum Einsatz. Abbildung 2-18 zeigt etwa das Modell eines Produktionssystems mit Quelle und Senke. Dazwischen liegen Einzelstationen, die unterschiedliche Verbindungen zueinander aufweisen. Dabei gibt es keine direkte Verbindung von Quelle und Senke, wie sie in Produktionssystemen auch meist wenig sinnvoll erscheint, und auch die Knoten 2 und 4 sind nicht direkt miteinander gekoppelt. Es handelt sich bei der vorliegenden Abstraktion also um einen unvollständigen Graphen.

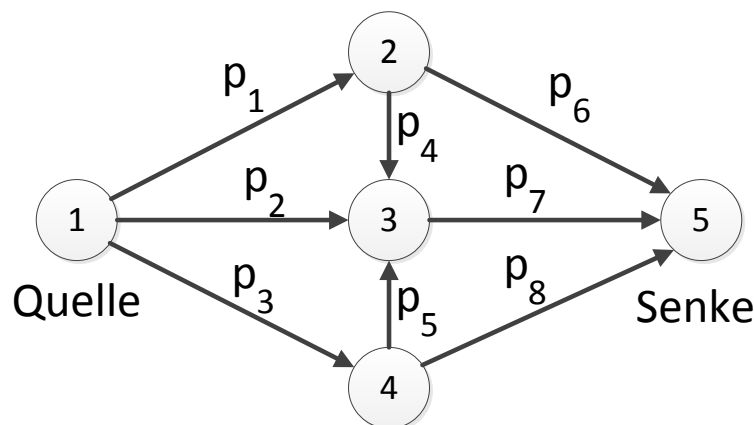


Abbildung 2-18: Graph eines Produktionssystems (nach [AF09])

Um jedoch quantitative Aussagen über das System machen zu können, muss noch eine Bewertung der jeweiligen Pfeile erfolgen. Als Bewertung sind unterschiedliche Kennzahlen denkbar, so zum Beispiel Grenzdurchsätze, Entfernungen, Zwischenankunftszeiten oder andere logistische Kennwerte. Die Bezeichnung des Graphen wird in diesem Fall erweitert zu

$$G = G(V, E, c)$$

Gl. 2-52

Um diese zusätzlichen Informationen in eine mathematisch handhabbare Form zu bekommen, werden die Daten in Materialflussmatrizen umgewandelt. Ein paar dieser Matrizen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

2.2.3.4 Materialflussmatrizen

Das Arbeiten mit Matrizen hat sich in der Materialflussrechnung durchaus bewährt. Mit ihrer Verwendung können Informationen, die aus dem Realsystem übernommen werden, mathematisch abgebildet werden und werden somit

analytisch besser handhabbar. Je nach Informationsgehalt werden verschiedene Materialflussmatrizen unterschieden.

Adjazenzmatrix $A(G)$

Die Adjazenzmatrix gibt den Informationsgehalt der Graphendarstellung in Matrizenform wieder und macht somit Aussagen darüber, welche Stationen „benachbart“ sind und welche nicht, d.h. zwischen welchen Knoten Pfeile vorhanden sind und zwischen welchen nicht. Neben dieser strukturellen Information können durch Adjazenzmatrizen außerdem die Flussrichtung zwischen den Knoten abgeleitet werden. Die Einträge α_{ij} dieses Matrixtyps bestehen lediglich aus den Werten 1 und 0 und werden wie folgt definiert:

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls ein Pfeil } \langle i, j \rangle \text{ existiert} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 2-53}$$

Die Anzahl der $\alpha_{ij} = 1$ -Elemente muss dabei der Anzahl der Pfeile im Graphen entsprechen. Abbildung 2-19 zeigt die zum Graphen aus Abbildung 2-18 gehörige Adjazenzmatrix. Die Flussrichtung ist dabei $i \rightarrow j$.

i / j	1	2	3	4	5
1	0	1	1	1	0
2	0	0	1	0	1
3	0	0	0	0	1
4	0	0	1	0	1
5	0	0	0	0	0

Abbildung 2-19: Beispiel für Adjazenzmatrix

Aus der Analyse dieser Adjazenzmatrix lassen sich bereits einige Schlüsse ziehen. Da die Spalte des Knoten 1 lediglich „0“-Werte aufweist, ist die Aussage zulässig, dass es sich hier um eine Quelle handeln muss. Einen ähnlichen Schluss lassen die Einträge der Zeile 5 zu. Diese enthalten ebenfalls nur „0“-Werte, was den Knoten 5 zur Senke macht. Der Knoten 3 ist ein Zusammenführungselement, da es von 3 Knoten Elemente empfängt, diese jedoch nur an einen Knoten weitergibt. Es gibt im ganzen System keine Schlingen, da die Diagonale der Matrix nur mit „0“-Werten besetzt ist und daher keine Materialflüsse zwischen ein und demselben Element auftreten. Zuletzt kann noch geschlussfolgert werden, dass es sich nicht um einen topologisch sortierten Digraphen handelt. Bei topologisch sortierten Digraphen dürfen „1“-Werte nur oberhalb der Diagonale auftreten, d.h. wenn gilt $\alpha_{ij} = 1 (i < j)$ ([AF09]).

Bewertungsmatrix $C(G)$

Die Bewertungsmatrix enthält im Gegensatz zur Adjazenzmatrix zusätzliche Informationen über das abgebildete Materialflusssystem. Es wird der Graph aus Gl. 2-52 beschrieben, d.h. es werden Aussagen über dessen Pfeilbewertungen getroffen. Die binären Werte α_{ij} der Adjazenzmatrix werden durch folgende Elemente der Bewertungsmatrix ersetzt:

$$c_{ij} = \begin{cases} c(i,j) & \text{für alle Pfeile } \langle i,j \rangle \\ 0 & \text{für } i = j, \text{ sofern keine Schlingen erlaubt sind} \\ \infty & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 2-54}$$

Meistens werden für die Bewertungen der Pfeile Kennwerte wie Entfernungen oder Transportzeiten zwischen den Knoten verwendet. Für die Bewertung des Transportaufkommens oder der Durchsatzbelastungen werden andere Matrizen aufgestellt.

Belastungsmatrix $B(G)$

Die Belastungsmatrix ist ein Spezialfall der Bewertungsmatrix, die die tatsächliche Belastung zwischen den Knoten angibt. Diese Belastung wird dabei in Stückzahlen (Fördergütern) pro Zeiteinheit angegeben. Belastungsmatrizen sind ein wichtiger Bestandteil in der Planung von neu entstehenden Materialflusssystemen, da die Zeilen- bzw. Spaltensummen wichtige Aussagen über die zu errichtenden Kapazitäten der Knotenelemente tätigen. Die Elemente der Belastungsmatrix sind wie folgt:

$$b_{ij} = \begin{cases} b(i,j) & \text{für Materialflüsse von } i \rightarrow j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 2-55}$$

Die Belastungsmatrix macht jedoch noch keine Aussagen über den Transport der Stückgüter. Oft werden diese in Ladeeinheiten zusammengefasst und auf diese Weise durch das System geführt. Diese Matrix ist somit vor allem als Dimensionierungstool der Einzelstationen im System zu verstehen.

Transportmatrix $A(G)$

Die Transportmatrix berücksichtigt im Gegensatz zur Belastungsmatrix das Zusammenfassen von Stückgütern (Fördergüter FG) mit Ladungsträgern LT zu Fördereinheiten FE. Exemplarisch wird das in Abbildung 2-20 gezeigt.

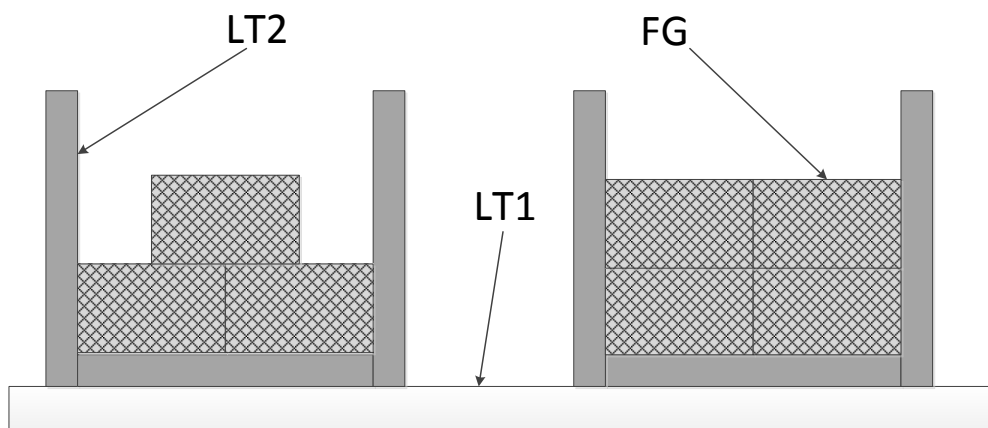


Abbildung 2-20: Exemplarische Zusammensetzung einer Fördereinheit FE aus Ladungsträgern und Fördergütern

Die Fördereinheit in diesem Beispiel besteht damit aus 2 unterschiedlichen Ladungsträgern LT1 und LT2 die jeweils die Fördergüter beinhalten.

$$FE = LT1 + 2[LT2 + n \cdot FG] \quad \text{Gl. 2-56}$$

Die Elemente der Transportmatrix werden folgendermaßen definiert:

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} \lambda(i,j) & \text{falls FE von } i \text{ nach } j \text{ transportiert werden} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 2-57}$$

Die Matrix entsteht dabei aus der Bildung von FE aus den Elementen der Belastungsmatrix. Weiters kann jetzt auch der Fluss leerer Ladungsträger betrachtet werden. Die so entstehenden Durchsätze haben oft dasselbe Belastungsniveau wie die Durchsatzraten der vollen FE. Transportmatrizen enthalten stets nur Informationen für ein gegebenes Zeitintervall, da λ ja die Einheit [FE/Zeiteinheit] aufweist. Daher sollten Transportmatrizen oft für mehrere Betriebszustände erstellt werden. Vor allem die Aufnahme der kritischen Systemzustände spielt eine wichtige Rolle beim Erfassen von Informationen. Abbildung 2-21 zeigt exemplarisch eine Transportmatrix des Graphen aus Abbildung 2-18.

i / j	1	2	3	4	5	H_Q	N	A
1	0	60	10	60	0	130	130	0
2	0	0	20	0	40	60	0	0
3	0	0	0	0	60	60	0	0
4	0	0	30	0	30	60	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	130
H_S	0	60	60	60	130			

Abbildung 2-21: Exemplarische Darstellung einer Transportmatrix $\Lambda(G)$ (nach [AF09])

Durch Summation von Zeilen- bzw. Spalteneinträgen werden die Quellenhäufigkeit H_Q und die Senkenhäufigkeit H_S eines jeden Knoten gebildet. Die Saldobildung der beiden ergibt dann jeweils die Kennwerte Nachfrage N bzw. Angebot A. Durch Verwendung von Transportmatrizen können die tatsächlich anfallenden Transportaufwendungen eines Systems abgeschätzt werden.

2.2.3.5 Sankey-Diagramme

Sankey-Diagramme sind ein beliebtes Mittel zur graphischen Darstellung von Materialflüssen. Dabei ist einerseits die Flussrichtung durch das Vorhandensein von Pfeilstrukturen ersichtlich und andererseits kann die Intensität der Materialflüsse aufgrund der Pfeilbreite abgeschätzt werden. Diese Breite ist nämlich stets proportional zum Gesamtaufwand. Sankey-Diagramme sind vor allem aufgrund der übersichtlichen Darstellung und der intuitiven Interpretation sehr weit verbreitet. Auch betriebsfremden Personen kann so ein schneller Überblick über die materialflusstechnischen Gegebenheiten eines Produktionssystems gegeben werden.

2.2.3.6 Beschreibung dynamischer Prozesse durch Verteilungen

Reale Materialflusssysteme werden oft durch das Vorhandensein nicht deterministischer Kenngrößen charakterisiert. Nur für den Sonderfall exakter Taktzeiten kann von determinierten Größen gesprochen werden, bei denen einem Input im Vorhinein ein exakt definierter Output zugeschrieben werden

kann. In der Regel arbeitet man in der Modellierung realer Systeme meist mit Zufallsvariablen, die durch ihre zugrunde liegenden mathematischen Verteilungen gewissen Rahmenbedingungen folgen. Dadurch wird es möglich, dynamische Prozesse abzubilden und analytisch zu betrachten.

Generell wird zwischen stetigen und diskreten Verteilungen unterschieden. Diskrete Verteilungen kommen immer dann zum Einsatz, wenn eine Anzahl von Ereignissen innerhalb eines Zeitintervalls betrachtet wird. Bei stetigen Verteilungen können die Zufallsvariablen innerhalb gesetzter Grenzen jeden beliebigen Wert annehmen. Deshalb werden stetige Verteilungen oft verwendet um Zufallsgrößen wie Ankunftszeiten oder Bearbeitungszeiten abzubilden. Die Definition der Begriffe Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsfunktion und Dichtefunktion ist folgendermaßen festgelegt:

- Eine Verteilungsfunktion gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Zufallsvariable X kleiner gleich einem Wert x ist. Sie kumuliert daher die Werte der Dichtefunktion (stetiger Fall) oder der Wahrscheinlichkeitsfunktion (diskreter Fall)

$$F(x) = P(X \leq x) \quad \text{Gl. 2-58}$$

$$P(X \leq x) = \sum_{x_i}^x P(X = x_i) \text{ im diskreten Fall} \quad \text{Gl. 2-59}$$

$$P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \text{ im stetigen Fall} \quad \text{Gl. 2-60}$$

- Die Wahrscheinlichkeitsfunktion gibt im diskreten Fall die Punktwahrscheinlichkeit für ein Ereignis an.

$$f = P(X = x) \quad \text{Gl. 2-61}$$

- Oft können Wahrscheinlichkeiten nicht mit diskreten Ereignissen beschrieben werden. Ein Beispiel hierfür wäre etwa die Körpergröße. Mehrere Personen werden niemals exakt groß sein, da es sich um eine reelle Zahl handelt. Es wird daher die Wahrscheinlichkeit für ein Intervall berechnet. Dies geschieht mittels einer Dichtefunktion, weil jeder einzelne der unendlich vielen Werte innerhalb dieses Intervalls eine Wahrscheinlichkeit von 0 aufweist. Die Dichtefunktion selbst kann dabei Werte über 1 annehmen, da sie selbst keine Wahrscheinlichkeiten angibt. Erst die Integration der Dichte liefert die Wahrscheinlichkeit, dass eine Zufallsvariable innerhalb gewisser Grenzen liegt. Der Flächeninhalt unter der Kurve deckt alle möglichen Ergebnisse ab und muss daher einen Wert von 1 haben:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad \text{Gl. 2-62}$$

Einige wichtige Verteilungen beider Gruppen (diskret und stetig) werden im Folgenden kurz vorgestellt.

2.2.3.6.1 Diskrete Verteilungen

Die Binomialverteilung

Die Binomialverteilung ist eine der wichtigsten diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Sie beschäftigt sich mit den

Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen bei Zufallsexperimenten mit nur zwei möglichen Ergebnissen (gut oder schlecht). Dies lässt sich anschaulich am Beispiel einer gezinkten Münze erklären. Sei die Wahrscheinlichkeit bei einem Wurf „Zahl“ (Z) zu bekommen mit der Wahrscheinlichkeit p gegeben. Die Wahrscheinlichkeit „Kopf“ (K) zu erhalten ist damit gegeben durch Bilden der Gegenwahrscheinlichkeit $q = 1 - p$. Wenn nun die Wahrscheinlichkeit von Interesse ist, zweimal Kopf und einmal Zahl zu werfen kann dies durch die Binomialverteilung berechnet werden. Da die Würfe unabhängig voneinander sind, kann geschrieben werden:

$$P(KKZ) = P(K)P(K)P(Z) \quad \text{Gl. 2-63}$$

Weil es nicht von Interesse ist, in welcher Reihenfolge Kopf und Zahl auftreten, sondern nur die Wahrscheinlichkeit, dass genau zweimal Kopf (Zufallsvariable X) geworfen wird kann durch additive Verknüpfung der Einzelwahrscheinlichkeiten die Gesamtwahrscheinlichkeit berechnet werden:

$$P(X = 2) = P(KKZ) + P(KZK) + P(ZKK) \quad \text{Gl. 2-64}$$

$$P(X = 2) = p^2q + pqp + qp^2 \quad \text{Gl. 2-65}$$

$$P(X = 2) = 3 p^2 q = 3 p^2 (1 - p) \quad \text{Gl. 2-66}$$

In Gl. 2-66 scheint nun die Anzahl der möglichen Wurfkombination (3) auf, die sich aus dem additiven Zusammenhang der einzelnen unterschiedlichen Reihenfolgen ergibt. Der Faktor p^2 ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis Kopf genau zweimal auftritt und q die Wahrscheinlichkeit, dass Zahl genau einmal auftritt. Generell kann die Anzahl der Möglichkeiten k Objekte aus n Objekten auszuwählen (ohne Zurücklegen und ohne Beachtung der Reihenfolge) unter Verwendung des Binomialkoeffizienten berechnet werden. Allgemein kann die Binomialverteilung deswegen geschrieben werden als:

$$P(X = x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x} \quad \text{Gl. 2-67}$$

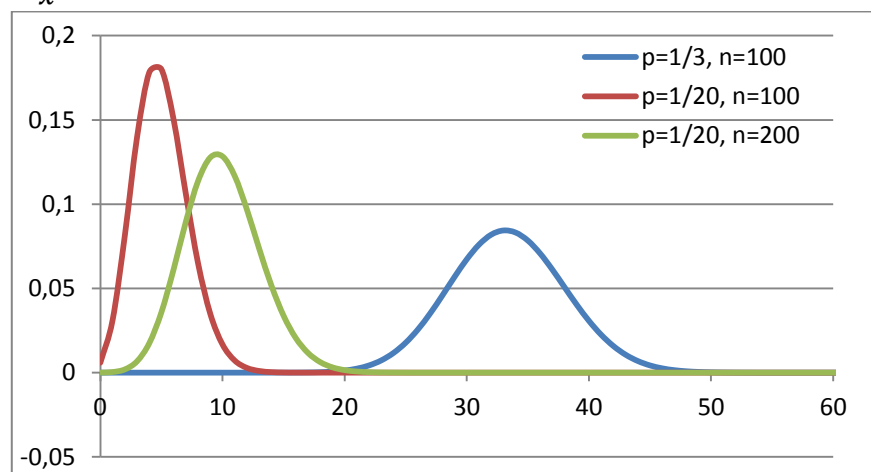


Abbildung 2-22: Die Binomialverteilung

Der Erwartungswert und die Varianz der Binomialverteilung berechnen sich durch:

$$E(X) = n p \quad \text{Gl. 2-68}$$

$$Var(X) = n p q = n p (1 - p) \quad \text{Gl. 2-69}$$

Die Poissonverteilung

Die Poissonverteilung wurde bereits im Kapitel 2.2.2.3 „Warteschlangentheorie“ bei der Betrachtung von Markov-Ketten angesprochen. Oft wird die Poissonverteilung auch als die Verteilung seltener Ereignisse bezeichnet, da mit ihr Ereignisse mit sehr kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit p beschrieben werden, die aber viele Eintrittsmöglichkeiten haben (hoher Wert n). Die Poissonverteilung lässt sich daher aus der Binomialverteilung herleiten indem der Grenzwert von $n \rightarrow \infty$ und $p \rightarrow 0$ gebildet wird. Sie ergibt sich dann zu

$$P(X = x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \quad \text{Gl. 2-70}$$

wobei sowohl der Erwartungswert λ als auch die Varianz $Var(X)$ berechnet wird durch

$$\lambda = Var(X) = n p \quad \text{Gl. 2-71}$$

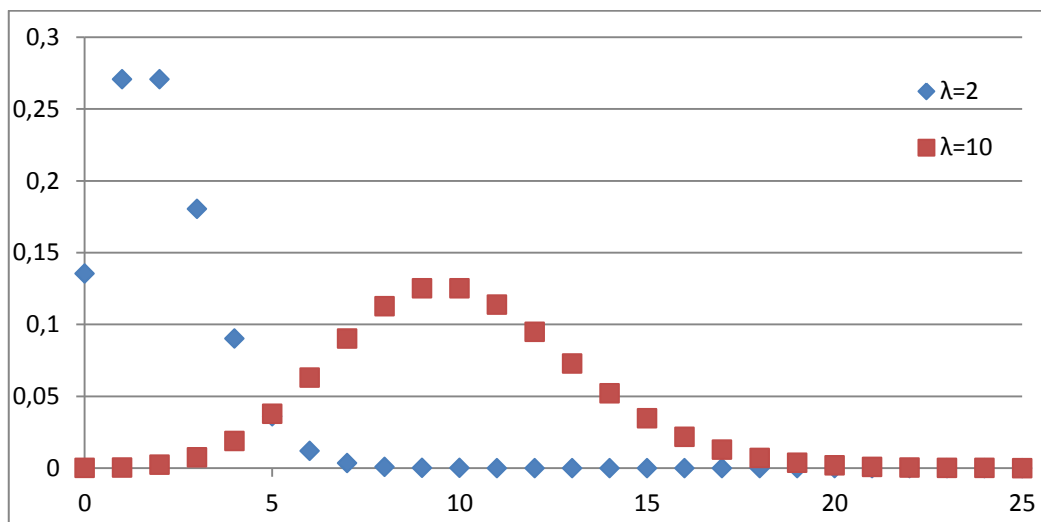


Abbildung 2-23: Die Poissonverteilung

2.2.3.6.2 Stetige Verteilungen

Die stetige Gleichverteilung

Bei der stetigen Gleichverteilung – es gibt auch eine diskrete Gleichverteilung – ist die Wahrscheinlichkeit für jeden Wert innerhalb des Verteilungsbereiches $[a,b]$ gleich groß und somit keine Funktion von x . Die Dichtefunktion der Gleichverteilung ist definiert durch:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{für } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 2-72}$$

Die Verteilungsfunktion ergibt sich durch Integration der Dichtefunktion und lautet daher:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{für } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{für } x \geq b \end{cases} \quad \text{Gl. 2-73}$$

Die Dichtefunktion und die Verteilungsfunktion der stetigen Gleichverteilung werden in Abbildung 2-24 abgebildet.

Der Erwartungswert und die Varianz ergeben sich durch:

$$E(X) = \frac{a + b}{2} \quad \text{Gl. 2-74}$$

$$\text{Var}(X) = \frac{(b - a)^2}{12} \quad \text{Gl. 2-75}$$

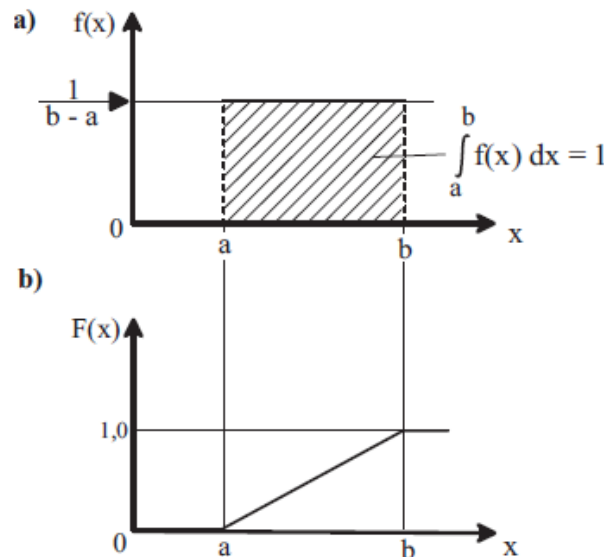


Abbildung 2-24: Die stetige Gleichverteilung (Quelle: [AF09])

Die Exponentialverteilung

Innerhalb der Materialflusslehre stellt die Exponentialverteilung wahrscheinlich die am häufigsten verwendete und daher wichtigste Wahrscheinlichkeitsverteilung dar. Sie wird oft verwendet um Kenngrößen wie Bearbeitungszeiten oder Zwischenankunftszeiten möglichst realitätsnah zu modellieren. Die Exponentialverteilung ist mit der diskreten Poissonverteilung verbunden. Wenn beispielsweise in einem Modell gewisse Ereignisse poissonverteilt sind (z.B. die Anzahl der Ankünfte innerhalb eines Zeitintervalls), so sind die Zeitdifferenzen zwischen diesen Ereignissen exponentialverteilt und umgekehrt.

Die Dichtefunktion der Exponentialverteilung ist definiert durch:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0 \\ \lambda e^{-\lambda x} & \text{für } x \geq 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 2-76}$$

Durch Integration erhält man die Verteilungsfunktion der Exponentialverteilung:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < 0 \\ 1 - e^{-\lambda x} & \text{für } x \geq 0 \end{cases} \quad \text{Gl. 2-77}$$

Der Erwartungswert $E(X)$ und die Varianz $\text{Var}(X)$ werden berechnet durch:

$$E(X) = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Gl. 2-78}$$

$$\text{Var}(X) = \frac{1}{\lambda^2} \quad \text{Gl. 2-79}$$

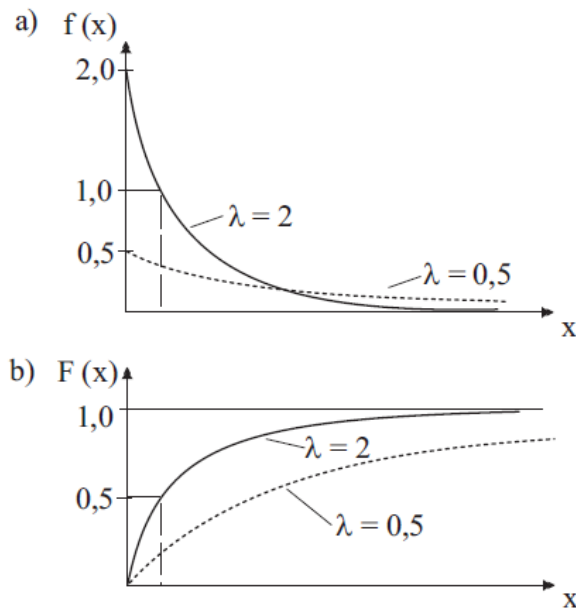


Abbildung 2-25: Dichtefunktion und Verteilungsfunktion der Exponentialverteilung (Quelle: [AF09])

Die Normalverteilung

Die Normalverteilung ist wahrscheinlich die bekannteste stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung. Ein großer Anwendungsbereich der Normalverteilung ist die Beschreibung von Systemen, auf die viele voneinander unabhängige Einflüsse einwirken. Die Dichtefunktion der Normalverteilung ist bestimmt durch:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{Gl. 2-80}$$

Der Mittelwert μ bestimmt dabei die Lage der Verteilung und die Standardabweichung σ die Form der Kurve (siehe Abbildung 2-26). In einem Bereich von $\mu \pm 3\sigma$ sind 99,73% aller Werte zu finden.

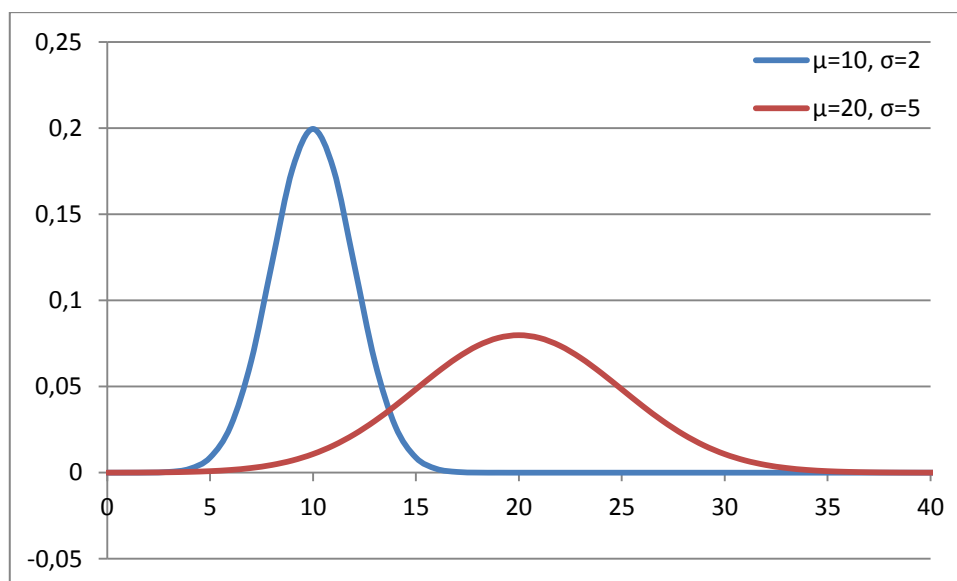


Abbildung 2-26: Die Normalverteilung

2.2.4 Layoutplanung

Bei der Layoutplanung von Materialflusssystemen geht es darum, die Teilsysteme des Gesamtsystems innerhalb gewisser Rahmenbedingungen so anzuordnen, dass ein möglichst geringer Transportaufwand entsteht. Dies kann als Zielfunktion nach [GRU09] folgendermaßen formuliert werden (m_{ij} sind die Transportmengen zwischen i und j ; s_{ij} ist die Strecke zwischen i und j):

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{i=j}^n m_{ij} s_{ij} \rightarrow \text{Minimum} \quad \text{Gl. 2-81}$$

Um den Wert dieser Zielfunktion zu minimieren, gibt es mehrere mögliche Ansätze. Einige dieser als Zuordnungsverfahren bezeichneten Modelle lösen die Zielfunktion exakt, andere Verfahren sind heuristischer Natur und daher Näherungslösungen.

Exakte Verfahren

Analytische Verfahren ermöglichen das Finden einer exakten Lösung der Zielfunktion. In der Praxis spielen sie jedoch oft eine eher untergeordnete Rolle, da bei einer vollständigen Berechnung eines jeden möglichen Zustandes der Rechenaufwand nicht mehr wirtschaftlich zu bewältigen ist. Weiters tendiert das Verfahren oft zu Ergebnisüberfeinerung, die mit einer realistischen Betrachtung der Gegebenheiten nichts mehr zu tun hat. Beispiele für exakte Verfahren sind (nach [AF09]):

- Branch & Bound Verfahren: Durch Frühzeitiges Aufzeigen von nicht-optimalen Lösungsräumen wird eine Verkürzung der Rechenzeit erreicht.
- Schnittebenen-Verfahren
- Relaxationen

Heuristische Verfahren

Heuristische Verfahren haben den Vorteil, dass sie im Gegensatz zu exakten Verfahren einen deutlich geringeren Zeitbedarf aufweisen. Jedoch wird die Zielfunktion nur näherungsweise gelöst und die Abschätzung, wie weit die gefundene Lösung vom tatsächlichen Optimum entfernt liegt, ist nicht einfach nachzuweisen. Dennoch werden sie aufgrund ihrer guten Handhabbarkeit in der Praxis bevorzugt eingesetzt. [AF09] führt folgende Gruppen als Beispiele für heuristische Verfahren an:

- Konstruktionsverfahren: beschäftigen sich mit der schrittweisen Erstellung von Layouts. Das bekannteste Beispiel für ein Konstruktionsverfahren ist wahrscheinlich das Dreiecksverfahren nach Schmigalla, das später noch näher vorgestellt wird.
- Verbesserungsverfahren: verbessern durch Umstrukturierungen im Layout die Anfangslösung, die etwa durch das Konstruktionsverfahren entstanden ist oder durch den Ist-Zustand vorgegeben war. Das CRAFT- und das LAPEX-Verfahren gehören zu dieser Gattung von Optimierungsverfahren.
- Mehrzielverfahren: Oft kommt es vor, dass bei der Layoutplanung nicht nur eine Zielfunktion vorhanden ist, sondern mehrere konkurrierende Ziele das Layout beeinflussen sollen.

Weiters werden auch noch Kontraktionsverfahren, graphentheoretische Verfahren oder Expertensysteme angeführt.

Das Dreieckverfahren nach Schmigalla

Da es im Zuge dieses Projektes Verwendung finden wird, soll an dieser Stelle das Dreieckverfahren nach Schmigalla – welches der Gruppe der Konstruktionsverfahren zuzuordnen ist – vorgestellt werden:

Grundgedanke des Schmigalla-Verfahrens ist es, jene Einzelstationen mit der größten Intensität nebeneinander anzuordnen. Dazu wird im ersten Schritt die Transportmatrix so umstrukturiert, dass alle Transporte zwischen den Stationen summiert über der Matrix-Diagonale stehen.

i / j	A	B	C	D
A	0	2	4	2
B	1	0	12	1
C	1	3	0	6
D	0	0	2	0

→

i / j	A	B	C	D
A	0	3	5	2
B	0	0	15	1
C	0	0	0	8
D	0	0	0	0

Abbildung 2-27: Aufsummieren der Transportanzahl

Nun wird begonnen, die Einzelstationen auf einem Dreieckraster (es gibt auch eine Variante, die Viereckraster verwendet) anzuordnen. Am Anfang werden jene beiden Stationen platziert, zwischen denen das höchste Transportaufkommen vorhanden ist. In dem Beispiel aus Abbildung 2-27 wären das die Stationen B und C, die somit als erstes im Dreiecksraster nebeneinander positioniert werden.

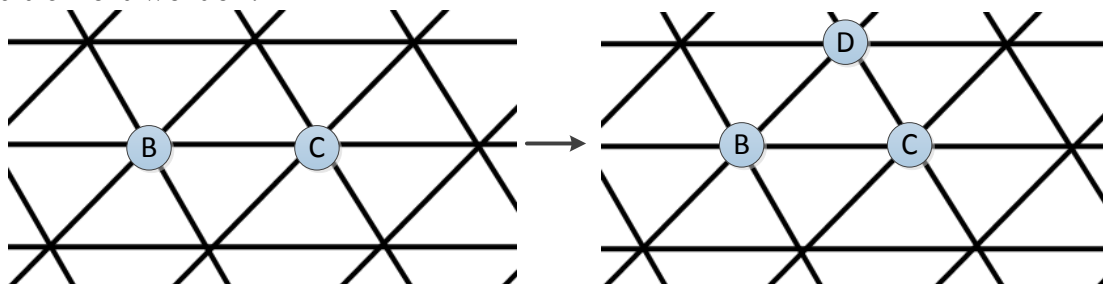


Abbildung 2-28: Schmigalla, 1. und 2. Schritt

Im nächsten Schritt wird berechnet, welche Einzelstation in Summe die stärkste Transportbeziehung mit den Stationen B und C aufweist:

$$\text{Station A: } I_{AB} + I_{AC} = 3 + 5 = 8$$

Gl. 2-82

$$\text{Station D: } I_{BD} + I_{CD} = 8 + 1 = 9$$

Station D weist daher die höhere Transportintensität auf und wird somit als nächstes im Raster positioniert. Dabei ist es prinzipiell egal, ob dies oberhalb oder unterhalb der beiden bereits gesetzten Stationen geschieht. Für die letzte Station A stehen nun drei unterschiedliche Plätze zur Verfügung. Der optimale Platz wird nun durch Summenbildung der Transportintensitäten für jede Möglichkeit berechnet:

$$\text{Position 1: } I_{AB} + I_{AC} = 8$$

$$\text{Position 2: } I_{AB} + I_{AD} = 5$$

$$\text{Position 3: } I_{AC} + I_{AD} = 7$$

Gl. 2-83

Daher muss die Station A an Position 1 gesetzt werden. Das Schmigalla-Verfahren ist ein Konstruktionsverfahren und liefert nur eine Näherungslösung. Sie bietet sich jedoch an, um bei Neuplanungen einen Ausgangspunkt für weitere Optimierungen und erste Strukturen zu schaffen. Auf Rahmenbedingungen wie Abmessungen und Platzierungsmöglichkeiten wird hier noch keine Rücksicht genommen.

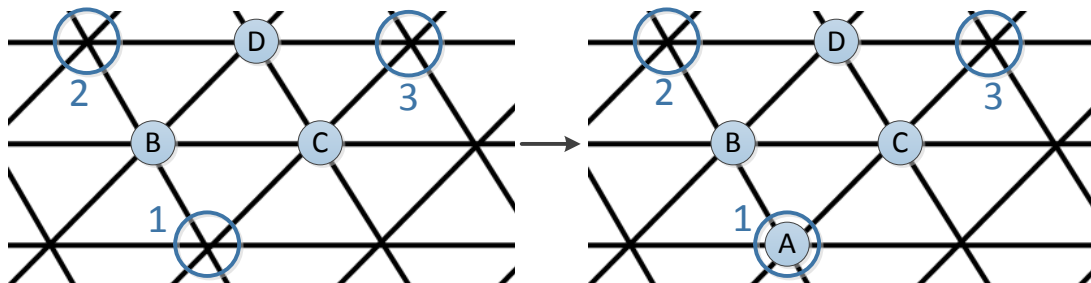


Abbildung 2-29: Schmigalla, 3. Schritt

2.2.5 Simulation logistischer Systeme

Der Begriff Simulation leitet sich aus dem lateinischen Verb „simulare“ ab, was so viel bedeutet wie „darstellen“ oder „nachbilden“. Nach [VDI3633] ist Simulation folgendermaßen definiert: „Simulation ist die Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

Unabhängig vom jeweiligen Fachgebiet ist es das Ziel einer jeden Modellierung bzw. Simulation, ein Abbild der Realität zu schaffen, das diese Realität gerade in dem Ausmaß widerspiegelt, dass sinnvolle Schlüsse daraus gezogen werden können. Die Kunst ist es daher, das zu Modell genauso zu erstellen, damit die zu untersuchende Fragestellung adäquat beantwortet werden kann. Bei komplexen Realsystemen versagen analytische Modelle relativ schnell. Dies ist durch mehrere Faktoren begründet. So sind etwa die Vielfalt der auf das System wirkenden Einflüsse und deren Zusammenhänge untereinander oft zu umfassend. Dynamische Strukturen der Teilsysteme verstärken diese Probleme und machen analytische Ansätze damit unwirtschaftlich oder einfach unmöglich.

In den letzten Jahren hat ein drastischen Aufschwung der Simulationstechnik im Bereich Produktionsplanung und Produktionssteuerung stattgefunden. Die Simulationstechnik ermöglicht auf diesem Gebiet die wirtschaftliche Auseinandersetzung mit produktionsbezogenen Problemstellungen. So können neue Systeme ökonomisch und effizient geplant oder bereits bestehende Systeme optimiert werden. Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der simulationsgestützten Optimierung eines bestehenden Produktionssystems.

2.2.5.1 Grundprinzip der Simulationsmethodik

Der Simulationsprozess besteht grundsätzlich aus vier unterschiedlichen Arbeitskomplexen. Zu Beginn der Untersuchungen wird das Realsystem abgegrenzt und abstrahiert, um es dann als Simulationsmodell in die Software

integrieren zu können. Dabei ist stets darauf zu achten, sich nicht in Details zu verlaufen, die die zu untersuchende Problemstellung nicht oder nur vernachlässigbar beeinflussen. An diesem Simulationsmodell werden dann gezielte Simulationsexperimente durchgeführt und deren Ergebnisse interpretiert, d.h. es werden für das Realsystem Schlüsse daraus gezogen. Falls das Ziel der Simulationsstudie noch nicht erreicht sein sollte, wird das Simulationsmodell durch eine Parameter-Variation nochmals angepasst (Variantenbildung). Die Folgerungen auf das Realsystem werden schlussendlich durch die Anwendung der Erkenntnisse auf die Realität umgesetzt (Abbildung 2-30).

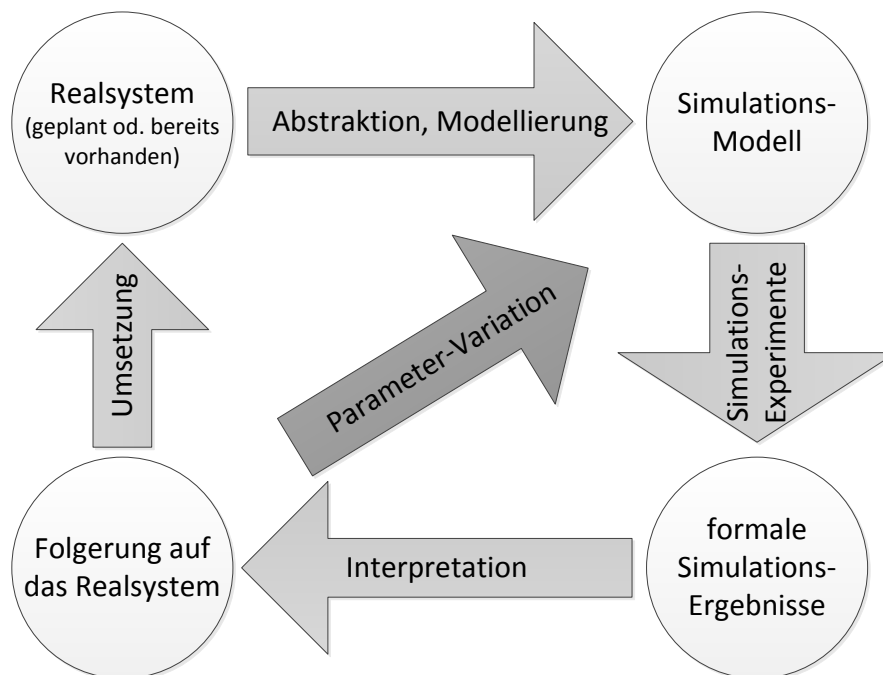


Abbildung 2-30: Grundprinzip der Simulationemethode (nach [KUH93])

[GRU09] meint, dass das allgemeine Ziel der Prozessoptimierung „im Kern in einer positiven Beeinflussung von Warteprozessen, d.h. in einer gezielten Einflussnahme auf die Warteschlangenbildung und –abbau durch Maßnahmen der Systemgestaltung (Fabrikplanung) bzw. der Systemorganisation (Fabrikbetrieb)“ besteht. Er schlussfolgert weiters, dass bei komplexen Produktionssystemen die Dynamik der Materialflussvernetzung empirisch nicht abgeschätzt werden kann bzw. eine analytische Betrachtungsweise nicht möglich und somit der Weg über die Simulationemethode vorgegeben ist. Zur Bewertung der Simulationsergebnisse werden meistens folgende Verhaltensgrößen herangezogen (vgl. [GRU09]):

- Zeitverhalten: Stillstands-, Liege-, Durchlaufzeiten
- Mengenverhalten: Warteschlangengrößen, Durchsatz-, Bestands- und Puffer-, Lagergrößen
- Terminverhalten: Terminabweichung, Termineinhaltung

Durch diese Kenngrößen des Zeit-, Mengen- und Terminverhaltens (ZMT-V) werden die Erfolge oder Misserfolge der Simulationsexperimente bewertet und quantifizierbar gemacht.

2.2.5.2 Vor- und Nachteile der Simulationstechnik

Nachdem die Problemstellung und konkrete Zielfestlegung erfasst wurde, muss entschieden werden, wie die festgelegten Ziele erreicht werden sollen. Die Entscheidung, ob die Simulation ein sinnvoller Weg zu sein scheint ist von mehreren Aspekten abhängig. Das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand ist wahrscheinlich die wichtigste Frage, die man sich bei Simulationsprojekten stellen muss. Diese Wirtschaftlichkeitsüberlegung wird natürlich durch den Schwierigkeitsgrad der Aufgabe beeinflusst. Daher ist es wichtig, sich einen möglichst großen Überblick über die Systemkomplexität und die benötigte Datenstruktur zu verschaffen. Die Bewertung der Systemkomplexität bedarf einer exakten Begutachtung des Systemverhaltens. Abhängig von der Zielsetzung des Projektes muss das System mehr oder weniger exakt abgebildet werden. Falls dieser Detaillierungsgrad aufgrund unterschiedlicher Probleme nicht in Einklang mit der Zielsetzung zur bringen ist, muss die Sinnhaftigkeit des Simulations-Projektes überdacht oder gegebenenfalls die Zielfestlegung auf ein realistischeres Niveau gesetzt werden. Der erreichbare Detaillierungsgrad ist dabei stark abhängig von den zur Verfügung stehenden Daten. Diese müssen bezüglich ihrer Menge, Qualität und Relevanz realistisch bewertet werden.

Sofern die Wahl auf eine Untersuchung der Problemstellung mittels Simulation fällt, können vielseitige und überzeugende Vorteile erzielt werden:

- Es ist möglich, Systeme zu gestalten, die in der Realität noch nicht vorhanden sind. Dies ermöglicht eine bereits optimierte Systemauslegung in einer sehr frühen Projektphase und somit erhebliche Kostenvorteile.
- Bereits existente Systeme können durch die Simulationsmethode ohne realen Systemeingriff auf die Auswirkungen möglicher Optimierungsansätze hin überprüft werden.
- Ist das Simulationsmodell erst einmal fertig erstellt, können unterschiedliche Simulationsvarianten und Simulationsszenarien mit meist relativ geringem Zusatzaufwand erstellt werden.
- Es ist möglich, lange Zeiträume in nur sehr kurzen Simulationszeiten zu simulieren.
- Oft liegen spezielle Betriebszustände im Zentrum der Betrachtung. Die Simulation ermöglicht beispielsweise eine Betrachtung und Bewertung von Systemeinschwingphasen oder Fehlerstrategien.

Diesen wirtschaftlichen Vorteilen stehen aber auch gewisse Nachteile entgegen, die nicht unbeachtet werden dürfen:

- Die Vorbereitungsphase stellt den weitaus größten relativen Zeitanteil am Simulationsprojekt dar. Dies betrifft vor allem die Teilbereiche Datenerhebung und Datenaufbereitung, die keinesfalls überstürzt beendet werden dürfen.
- In der Regel ist der Weg zum passenden Simulationsmodell recht aufwändig, da viele Modelle die Realität nicht im geforderten Maße darstellen können und somit unbrauchbar sind. Es ist stets zu hinterfragen, in welchem Maße die Modellierung von Details die

Problemlösung positiv beeinflusst und ob es sich nicht möglicherweise um unwirtschaftlichen Programmieraufwand handelt, der das Simulationsmodell nur unnötig kompliziert und fehleranfällig macht.

- Oft ist eine Verifizierung und Validierung sehr aufwändig oder auch nur begrenzt möglich. Dies ist besonders bei noch nicht realisierten Systemen zu beachten.
- In der Regel gehen Simulationsstudien mit relativ hohen Kosten für Software und Zeitdauer einher.

2.2.5.3 Die Wahl des geeigneten Simulationswerkzeuges

Bei [KG95] wird die historische Entwicklung der Simulationethodik in Materialflusssystemen in vier Phasen gegliedert. Die erste Phase ist gekennzeichnet durch die Entwicklung spezieller Simulationssoftware, die den Anwender vor allem in der Modellerstellung unterstützen sollte. Simulationsmodelle der Materialflusstechnik sind in der Regel diskrete Modelle, deren Zustandsänderungen nur zu diskreten Zeitpunkten erfolgen. Das System wird daher nur für diese Zeitpunkte gelöst (z.B. Auftragseingang oder Beginn eines Bearbeitungsprozesses). Prinzipiell wurden Softwarekonzepte für drei unterschiedliche Betrachtungsweisen der diskreten Systeme erstellt (Abbildung 2-31).

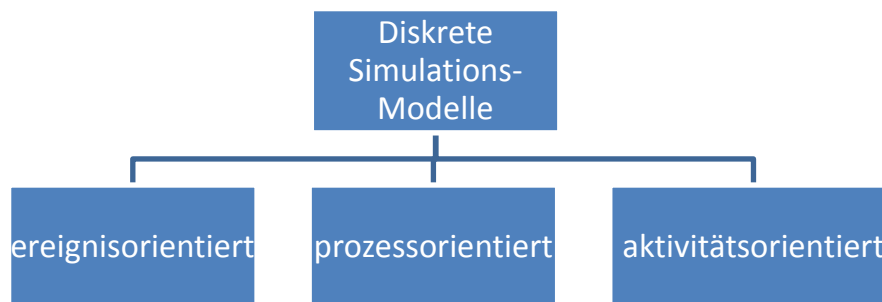


Abbildung 2-31: Klassifizierung diskreter Simulationsmodelle (nach [KG95])

Die ereignisorientierte Sichtweise ist heute der gängige Ansatz moderner Simulationssoftware. Das Simulationsmodell wird durch eine Reihe möglicher Ereignisse definiert, die wiederum Zustandsänderungen des Systems bewirken. Der Anwender muss daher für alle möglichen Ereignisse eine passende Logik programmieren. Die ereignisorientierte Programmierung erlaubt ein Höchstmaß an Flexibilität, verlangt aber auch nach guten Programmierkenntnissen. Die Prozessorientierung dagegen stellt das Modell als eine Zusammenfassung von Prozessen dar, wobei ein Prozess aus mehreren Ereignissen besteht. Der Materialfluss wird dann als Fluss des Produktes durch die Prozesse beschrieben. Bei der Aktivitätsorientierung werden Bedingungen definiert, die zum Starten bzw. Stoppen einer Aktivität führen.

Die zweite Phase der Entwicklung wird durch die Kombination der unterschiedlichen drei Sichtweisen in den Softwarepaketen charakterisiert. Vor allem die Kombination aus Ereignis- und Prozessorientierung bewirkte eine deutliche Verbesserung auf dem Gebiet, da sich die Einfachheit der Prozessorientierung bezüglich der Systemgestaltung sehr gut mit der Flexibilität der ereignisorientierten Programmierung verbinden lässt.

Die dritte Phase ist durch eine Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit charakterisiert. Dies betrifft vor allem Hilfsmittel bezüglich Modellerstellung, Datenmanagement und Aufbereitung der Simulationsergebnisse.

Die vierte Phase der Entwicklung ist durch vollständig integrierte Simulationssysteme gekennzeichnet, die eine umfassende Projektbetreuung ermöglichen. So wird der Anwender bereits in der Phase der Datenaufbereitung durch die Software unterstützt. Ebenso ist eine Unterstützung des Anwenders in den Bereichen Modellierung, Simulationsversuchsplanung und Ergebnisauswertung möglich.

[KG95] nennt bei der Wahl der geeigneten Simulationssoftware fünf wichtige Aspekte, die der Anwender bzw. das Unternehmen unbedingt bei der Wahl der richtigen Simulationssoftware in Betracht ziehen sollte:

1. Unterstützung bei der Datenvorbereitung und Dateneingabe: Schnittstellen zu externen Systemen wie BDE oder PPS; statistische Datenanalyse; Überprüfung der Datenqualität und Datenvollständigkeit.
2. Unterstützung bei der Modellerstellung: graphischer Modellaufbau durch Verwendung von Grundbausteinen; Anpassung der Grundeigenschaften der Bausteine; Objektorientierung; Unterstützung bei der Fehlersuche; hierarchische Strukturen; Programmierung der Bausteine
3. Unterstützung bei der Vorbereitung der Simulationsexperimente: Variantenbildung und Planung der Simulationsexperimente; Parametervariationen.
4. Unterstützung bei der Simulationsdurchführung: Möglichkeit zur Simulationsinteraktion während des Simulationslaufes; Änderungen am Modell während der Simulation; Animation; Debugger.
5. Unterstützung bei der Ergebnisauswertung: statistische Datenanalyse; graphische Aufbereitung der Ergebnisse; Schnittstellen zu externen Softwarepaketen (Tabellenkalkulation, Datenbanken, Graphik...).

Eine umfangreiche Auflistung moderner Simulationssoftware findet sich bei [ELE12] und [KÜH06]. Die Simulationswerkzeuge werden nach ihrem Spezialisierungsgrad klassifiziert, von allgemeinen Programmiersprachen bis zu sogenannten „Spezial Simulatoren“. Während die Verwendung allgemeiner Programmiersprachen wie etwa C++ praktisch keine Einschränkungen in der Programmierung verursacht, so ermöglicht der Einsatz von spezialisierter Software einen schnellen und übersichtlichen Modellaufbau und problembezogene Unterstützung. Allgemeine Programmiersprachen haben aber den gravierenden Nachteil, dass die Modellerstellung einen erheblichen Zeitaufwand darstellt und ein umfangreiches Know-How bezüglich der Programmiersprache von Nöten ist. Dieser Umstand wird in Abbildung 2-32 dargestellt und sollte bei der Auswahl der Simulationsumgebung stets bedacht werden.

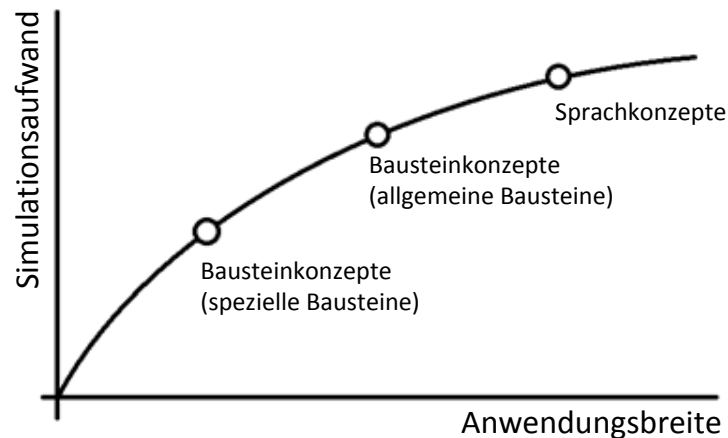


Abbildung 2-32: Simulationsaufwand unterschiedlicher Simulationskonzepte (nach: [KÜH06])

An dieser Stelle sollen die am Institut für Technische Logistik der TU Graz eingesetzten Simulationswerkzeuge kurz vorgestellt werden.

Plant Simulation

Plant Simulation ist Bestandteil der Tecnomatix Suite – ein Portfolio unterschiedlicher Software zur Thematik „Digitale Fabrik“ – von Siemens PLM Software. Es handelt sich dabei um eine Software zur Analyse und Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen. Durch den Modellaufbau mittels vordefinierten Bausteinen wird auch Simulationsanfängern ein Einstieg in die Produktionsprozesssimulation ermöglicht. So können einfache Systemstrukturen durch den Einsatz von Transport- oder Bearbeitungsbausteinen mittels Drag & Drop ohne großen Aufwand abgebildet und mittels vordefinierter Analysewerkzeuge untersucht werden. Seine Stärken spielt Plant Simulation dann aus, wenn es sich um die Modellierung komplexer Produktionssysteme handelt. Dies wird durch die Implementierung einer eigenen objektorientierten Programmiersprache („SimTalk“) ermöglicht. Durch die Verwendung dieser Programmiersprache kann das Verhalten der allgemeinen Bausteine mittels Methoden-Programmierung an die tatsächlichen Systembedürfnisse angepasst werden. Die Modellierung komplexer Produktionssysteme wird somit ebenfalls ermöglicht. [KÜH06] führt als Ziele des Einsatzes von Plant Simulation unter anderem folgende Punkte an:

- Reduktion der Investitionskosten bei der Planung neuer Anlagen
- Entdeckung von Engpässen und anderen Systemschwachstellen
- Geringeres Investitionsrisiko durch frühes Proof-of-Concept
- Maximierung des Einsatzes von Fertigungsressourcen
- Verringerung von Lager- und Durchsatzzeit
- Leistungsoptimierung

Die Software zeichnet sich nach [KÜH06] durch folgende Leistungsmerkmale aus:

- Simulation komplexer Produktionsprozesse
- Objektorientierung und hierarchische Modellierung
- Effiziente Modellierung durch Bibliotheken von Anwendungsobjekten

- Umfassende Analysetools (Engpassanalyse, Sankey-Diagramme, grafische Darstellung von Systemauslastungen)
- 2D-Visualisierung. 3D-Visualisierung ist ebenfalls möglich, jedoch eher eingeschränkt benutzerfreundlich
- Verwendung genetischer Algorithmen zur Optimierung von Systemparametern
- Offene Systemarchitektur (ActiveX, Oracle, SQL, ODBC, XML, DDE)

Plant Simulation entspricht den Anforderungen dieses Masterarbeitsprojektes vor allem wegen der Flexibilität der Programmierung und den umfassenden Analysemöglichkeiten und wurde daher für diese Simulationsstudie ausgewählt.

AutoMod

AutoMod ist eine Simulationssoftware des amerikanischen Unternehmens Applied Materials. Im Gegensatz zu Plant Simulation liegt der Fokus dieser Software im Bereich der 3D-Visualisierung.

Laut Herstellerangaben [SIM15a] werden die Zielsetzungen von AutoMod-basierten Simulationsprojekten folgendermaßen zusammengefasst:

- Ermittlung von Anlagenleistungen wie Durchsatzzahlen, Pickleistungen oder Palletierleistungen
- Ermittlung der auftretenden Maschinenauslastungen
- Ermittlung von Schwachstellen und Engpässen
- Ermittlung von Puffergrößen
- Erarbeitung von Steuerstrategien
- Ermittlung benötigter Ressourcen
- Untersuchung von Störungsauswirkungen

AutoMod verfügt ebenfalls über umfangreiche Standard-Bibliotheken zum Modellaufbau (Kräne, Fahrzeugsysteme, Lagersysteme, usw.). Das Modell wird dabei meist maßstabsgetreu und in 3D aufgebaut. Eine CAD-ähnliche Oberfläche erleichtert diesen Prozess. Die einzelnen Objekte können dann entweder direkt in der Software erstellt oder aus externen CAD-Systemen implementiert werden. Eine einfache Programmiersprache und die Möglichkeit zur Verwendung von Erweiterungsmodulen erlauben die Erstellung komplexer Abläufe und Produktionssteuerungen.

Die Kommunikation mit externen Systemen wird durch Schnittstellen wie ActiveX oder OLE ermöglicht. Mittels ODBC lassen sich außerdem große Datenmengen in die Software importieren bzw. exportieren.

Demo3D

Demo3D ist eine leistungsstarke Software zur dreidimensionalen Modellierung und Präsentation von Produktions- und Materialflusssystemen. Dabei wird das abzubildende System innerhalb einer Virtual Reality Umgebung modelliert und kann anschließend während der Simulation frei betrachtet werden. Dies ermöglicht es, einen möglichst realitätsnahen Eindruck von dem System zu bekommen, was vor allem in der Anlagenplanungsphase einen erheblichen Mehrwert darstellt. Die Modelle werden dabei mehrheitlich durch Drag & Drop

aus umfangreichen Objekt-Katalogen zusammengestellt. Weiters ist es möglich 3D-CAD-Daten zu importieren und das Modell somit optisch an die realen Gegebenheiten anzupassen. Die Simulation berücksichtigt zur realitätsgetreuen Darstellung ebenfalls physikalische Gegebenheiten wie Reibung, Gravitation oder Stöße.

Demo3D eignet sich im Gegensatz zu den beiden bereits vorgestellten Simulationsprogrammen nicht zur Analyse oder Optimierung von Produktionsprozessen, sondern spezialisiert sich auf deren optische Darstellung. Die Animationsmethodik von Demo3D erlaubt eine realitätsnahe Begehung von Anlagen, die sich meist noch in der Planungsphase befinden. Mittlerweile ist es unter Zuhilfenahme eines 3D-fähigen Bildschirms bzw. Beamers und den dazugehörigen Shutterbrillen auch möglich, die Simulationsmodelle in der dritten Dimension zu betrachten.

Sofern eine ähnliche Analyse- bzw. Optimierungsmöglichkeit wie in Plant Simulation oder AutoMod gewünscht ist, kann auf die Simulationssoftware Sim3D zurückgegriffen werden, die auf der Demo3D Technologie basiert und diese erweitert (vgl. [SIM15b]).



Abbildung 2-33: Beispiel eines Demo3D-Modells (Quelle: [SIM15b])

3 Entwicklung von Maßnahmen

Nach der theoretischen Abhandlung der relevantesten Masterarbeitsthematiken in Kapitel 2, beschäftigt sich dieser dritte Abschnitt der Masterarbeit mit dem tatsächlichen Gegebenheiten des Realsystems Halle8 der Böhler Edelstahl GmbH & Co KG und beschreibt schrittweise den durchgeführten Projektablauf.

Die Vorgehensweise orientiert sich dabei an den in der Literatur – vor allem durch [KÜH06] – vorgeschlagenen Projektphasen für Simulationsstudien. Eine detaillierte Anpassung an das Masterarbeits-Projekt war jedoch selbstverständlich sinnvoll und auch notwendig. Der dabei entstandene Projektplan ist in Abbildung 3-1 ersichtlich.

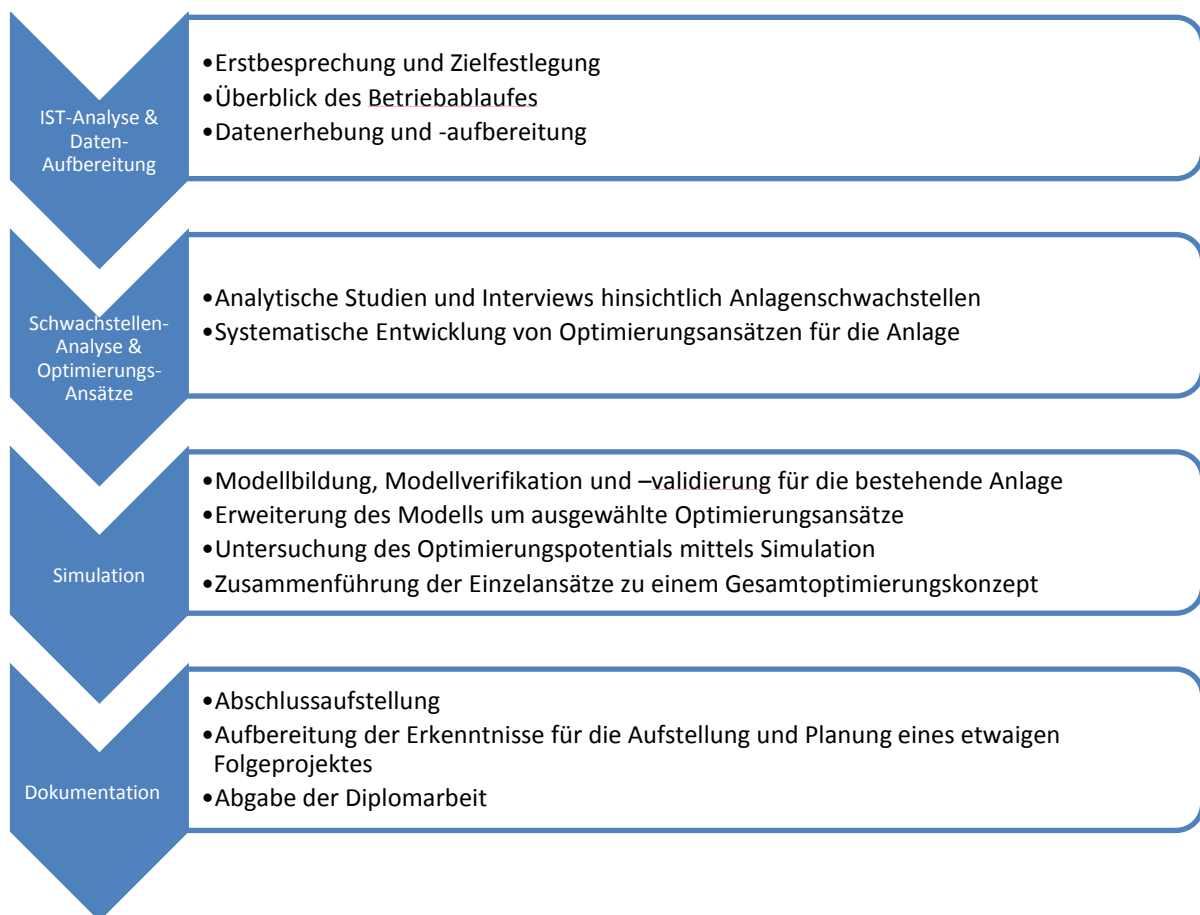


Abbildung 3-1: Projektplan

Wie in der Abbildung ersichtlich, gliedert sich das gesamte Projekt in insgesamt vier Phasen, die jeweils mit vier Meilensteinen abschließen. Die Meilensteine waren in diesem Fall die Präsentationen der jeweiligen Projektphasen und deren Ergebnissen vor Ort in Kapfenberg.

Die erste Projektphase beschäftigt sich nach der erfolgten Zielfestlegung mit dem Kennenlernen und Verstehen des zu untersuchenden Systems. Dazu gehört eine auf die spätere Simulation zielgerichtete Datenextraktion und Datenaufbereitung genauso wie das Kennenlernen der Produktionsprozesse vor Ort – sei es durch Mitarbeitergespräche oder einfaches Beobachten der Abläufe.

In der zweiten Projektphase werden die Eigenschaften des Systems genau hinterfragt um so in weitere Folge Systemschwachstellen aufzeigen zu können. Die diesbezüglich geführten Mitarbeiter-Interviews sind in dieser Phase der entscheidende Input für eine umfassende Schwachstellenanalyse. Um auf die aufgezeigten Schwachstellen reagieren zu können, werden gezielte Optimierungspakete zusammengestellt, die aus jeweils mehreren Optimierungsvarianten bestehen. Die Bildung des Ist-Simulationsmodells und anschließende Verifikation und Validierung desselben stellt den Beginn der dritten Projektphase dar. In Absprache mit Böhler Edelstahl werden neun unterschiedliche Optimierungskonzepte durch Variation der in Projektphase 2 erstellten Optimierungsvarianten gebildet und deren Optimierungspotentiale mittels Simulation in Plant Simulation ermittelt. Das Projekt schließt mit der vierten Projektphase, in der die Ergebnisse der Simulationen zu wenigen Schlüsselaussagen übersichtlich zusammengefasst werden und somit als Input für ein etwaiges Folgeprojekt genutzt werden können.

Die geschätzten relativen Zeitanteile der jeweiligen Projektphasen am gesamten Zeitaufwand ergeben sich wie in Tabelle 3-1 angeführt.

Tabelle 3-1: Relative Zeitanteile der einzelnen Projektphasen

Ist-Analyse & Datenaufbereitung	40%
Schwachstellenanalyse und Optimierungsansätze	10%
Simulation	30%
Dokumentation	20%

3.1 Ist-Analyse und Datenaufbereitung

3.1.1 Zielfestlegung

Erklärtes Gesamtziel der Simulationsstudie ist es, unterschiedliche Optimierungspotentiale der Produktionsprozesse auszuarbeiten und quantitativ abschätzbar zu machen, um in weiterer Folge auf eine fundierte Grundlage für zukünftige Investitionsentscheidungen zurückgreifen zu können. Dieses Gesamtziel wird durch eine Reihe von Teilzielen gestützt, die hier kurz diskutiert werden sollen.

Als erster Schritt ist eine umfassende Analyse der Systemeigenschaften und ihrer Input-Variablen gefragt. Dies wird einerseits gewünscht um einen strukturierten Überblick der Produktionsprozesse in der Halle zu erlangen und betriebsfernen Personen – die eventuell nur eingeschränkt mit dem System zu tun haben – möglichst schnell einen signifikanten Eindruck von den Gegebenheiten der Prozesse zu vermitteln. Andererseits fließen diese Analysen später in die Bildung des Simulationsmodells ein.

Für Böhler Edelstahl ist es von großer Wichtigkeit, mittels der in Projektphase 2 („Systemschwachstellen und Optimierungskonzepte“) erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen ihre Auftrags-Liefertreue-Statistik zu verbessern. Ein Auftrag ist dabei dann als pünktlich („gut“) zu werten, wenn einer der folgenden Punkte erfüllt ist:

- Der Auftrag verlässt das System vor dem definierten Liefertermin.
- Der Auftrag verlässt das System exakt zum definierten Liefertermin.
- Der Auftrag verlässt das System spätestens innerhalb einer Toleranz von 5 Tagen nach dem definierten Liefertermin.

Alle Aufträge, die das System nach dieser Toleranz verlassen, sind zu spät („schlecht“).

$$\text{Liefertreue} = \frac{\text{Anzahl Aufträge "gut"}}{\text{Anzahl Aufträge "gut"} + \text{Anzahl Aufträge "schlecht"}} * 100 \quad \text{Gl. 3-1}$$

Die in Abbildung 3-2 dargestellte Entwicklung der Liefertreue zeigt die historischen Daten von Februar 2013 bis Februar 2014. Die Werte schwanken dabei zwischen 95% und 71% und ergeben ein arithmetisches Mittel von 82,1% Liefertreue.

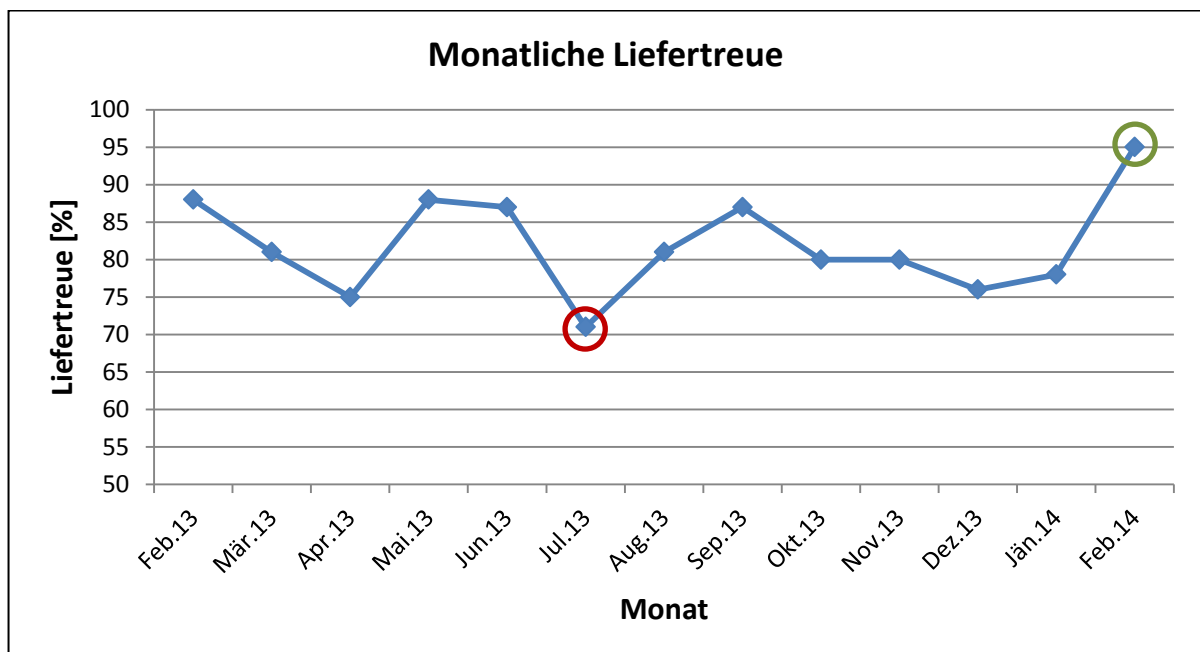


Abbildung 3-2: Monatliche Liefertreue des Produktionssystems Halle 8

Langfristiges Ziel von Böhler Edelstahl ist es, die Liefertreue auf einen durchschnittlichen Wert von etwa 87% zu erhöhen. Möglichkeiten dieses Ziel zu erreichen sollen in dieser Arbeit entwickelt und deren Potential quantifiziert werden.

Weiters hat Böhler Edelstahl durch die Analyse ihrer Kostenstruktur einen entscheidenden Kostenblock im Bereich des Umlaufvermögens festgestellt. Zu diesem Kostenblock zählen auch sämtliche Lagerbestände im Unternehmen, seien es Rohstoffe, Halbzeuge oder fertige Produkte. Diese Bestände stellen eine Bindung wertvollen Unternehmenskapitals dar, welches somit nicht in wichtigen Bereichen zur Verfügung steht und sind als kalkulatorische Kosten zu werten. Eine Verringerung dieser Bestände würde – wie in Abbildung 3-3 schematisch dargestellt – die Rentabilität des Unternehmens maßgeblich positiv beeinflussen (vgl. [KUG13]). Eine wichtige Kennzahl dafür ist der Return on

Investment (ROI), der sich als Produkt von Umsatzrentabilität und Kapitalumschlag ergibt. Die Rentabilität durch senken der Bestände zu erhöhen, ist ebenfalls Ziel des Projekts.

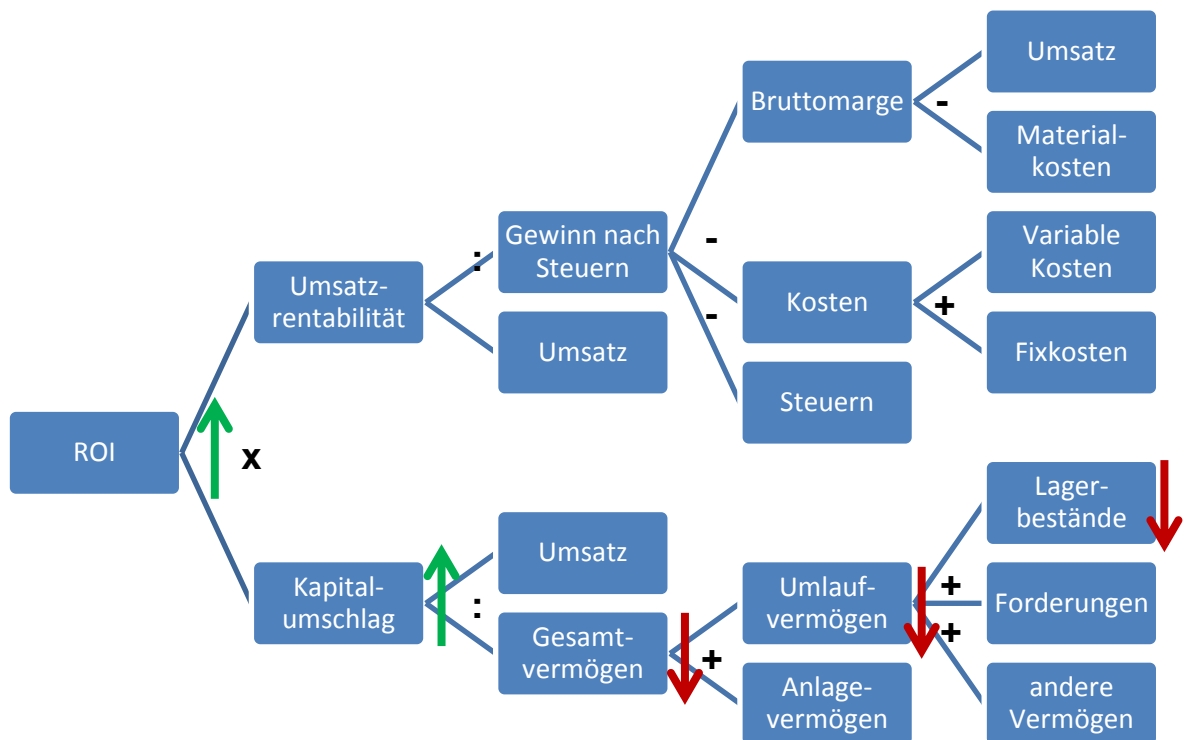


Abbildung 3-3: Positive Einflussnahme sinkender Bestände auf den ROI, nach [KUG13]

3.1.2 Überblick des Betriebsablaufs

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, ist es zunächst wichtig, den Betriebsablauf zu verstehen und in Einzelprozesse zu zerlegen. Gegenstand der Untersuchungen ist die Prüf- und Adjustagelinie für gewalzte Flachstähle, die sich in der sogenannten Halle 8 im Werk Deuchendorf befindet.

Gesamtprozess

Die Stähle werden aus dem Stammwerk mittels LKW-Transport in das Werksgelände angeliefert, wo sie entweder zuerst zur Wärmebehandlung in die benachbarte Halle 6 gelangen oder direkt in die Halle 8 gebracht werden, wo sie in die für den Versand zulässige Form gebracht werden. Es ist ebenfalls möglich, dass das Produkt nach der Bearbeitung in Halle 8 zur Wärmebehandlung in die Halle 6 transportiert wird. Wenn die Prozessschritte in Halle 6 und Halle 8 abgeschlossen sind, werden die Produkte entweder zuerst in das Zentrallager oder direkt in den Versand gebracht (Abbildung 3-4).

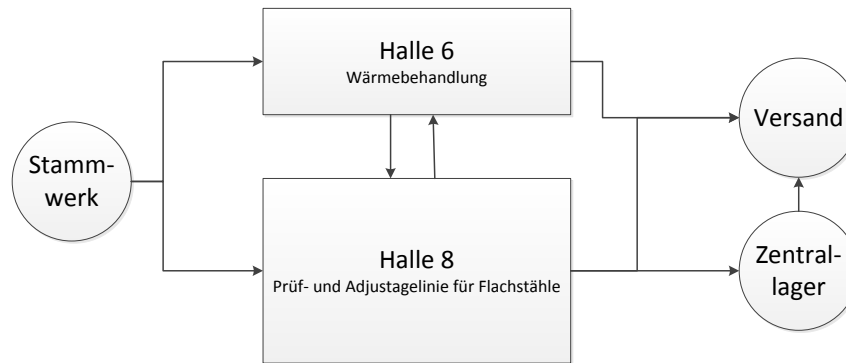


Abbildung 3-4: Mögliche Transportwege der Flachstähle

Produktionssystem Halle 8

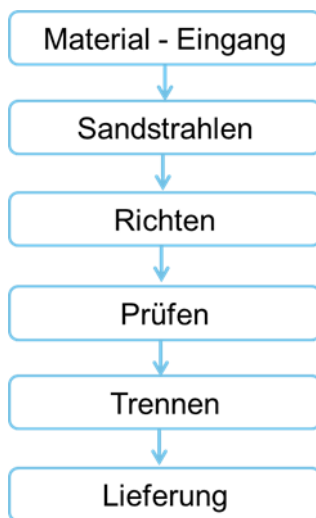


Abbildung 3-5:
Prozessabfolge Halle 8

Nach erfolgter Materialübernahme an der Systemgrenze werden die Flachstähle – sofern vom Kunden gewünscht – sandgestrahlt. Anschließend wird das Material durch Rollenrichtmaschinen und Richtpressen gerichtet. Dies ist nötig um den durch die vorhergehende Wärmebehandlung entstandenen Verzug rückgängig zu machen. Die folgende Prüfung des Materials auf etwaige Fehler erfolgt durch unterschiedliche Prüf- und Messverfahren. Schlussendlich werden die Flachstähle an den Trennsägen auf die gewünschte Länge gebracht und entweder an den Versand oder das Zentrallager geliefert. Diese Prozesskette stellt eine stark vereinfachte Übersicht der Vorgänge im System dar, da je nach Material und Kundenwunsch andere Arbeitspläne abgearbeitet werden müssen.

3.1.3 Datenerhebung und -aufbereitung

In diesem dritten und letzten Schritt der ersten Projektphase werden sämtliche zur Zielerreichung benötigte Daten extrahiert und aufbereitet. Dies stellt den aufwendigsten Teil des Projekts dar. Der Übersicht halber wird dieser Teil in zwei Unterpunkte gegliedert, nämlich in die Datenaufbereitung bezüglich des System-Inputs und des Systems an sich (Abbildung 3-6). Für beide Bereiche stehen Daten aus dem Zeitraum Jänner 2013 bis April 2014 zur Verfügung.

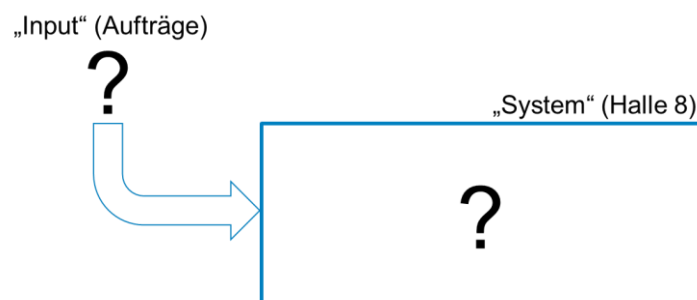


Abbildung 3-6: Gliederung der Datenaufbereitung in zwei Bereiche

Die Daten stammen dabei aus drei Bereichen, die in Abbildung 3-7 in Bezug auf ihren Umfang dargestellt sind. Die breite Basis der verwerteten Daten stellt selbstverständlich die IT-Systemlandschaft von Böhler Edelstahl dar. Darin werden sämtliche Informationen von Zeitdaten, Auftragsdaten, Arbeitsplänen, usw. gespeichert. Zum Abgleich der aus diesen Rohdaten extrahierten Erkenntnisse und zum Beseitigen von Unklarheiten der Prozessabläufe werden Interviews mit Mitarbeitern aus verschiedenen Unternehmensbereichen geführt bzw. die Vorgänge im Betrieb auch selbstständig beobachtet.

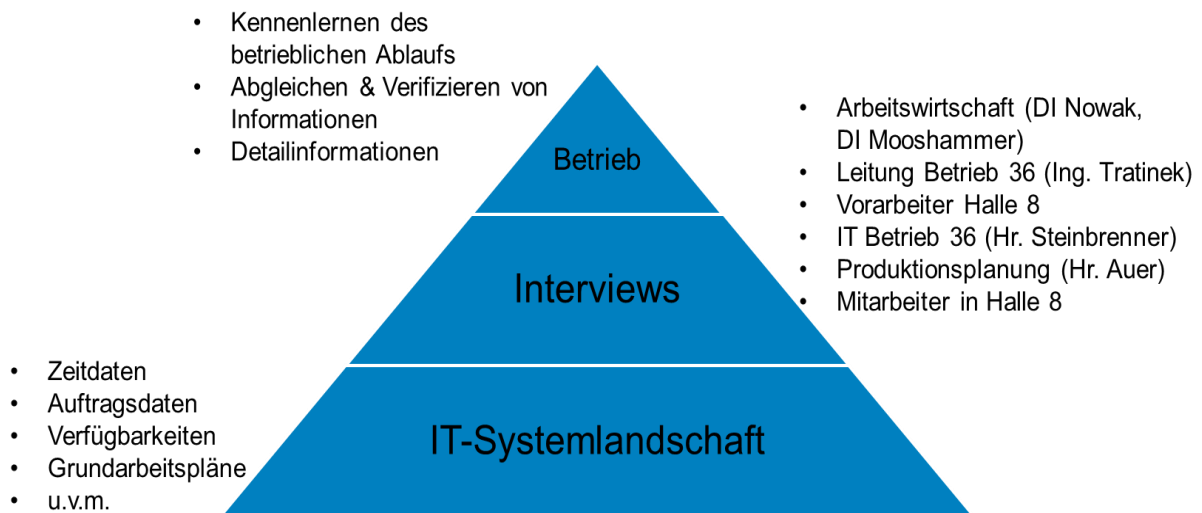


Abbildung 3-7: Datenherkunft

Die Böhler Edelstahl IT-Systemlandschaft ist dabei als gewachsenes Enterprise-Resource-Planning (ERP) System zu verstehen, das in mehrere Bereiche gegliedert werden kann. Eine vereinfachte Darstellung des für die Masterarbeit relevanten Systembereiches wird in Abbildung 3-8 gezeigt.

Der Informationsfluss gestaltet sich dabei so, dass der Auftrag an jeder Einzelstation im System durch den Arbeiter am Maschinterminal zur Bearbeitung oder Prüfung angemeldet und nach Fertigstellung wieder abgemeldet wird. Die so aufgezeichneten Daten werden gemeinsam mit den Auftragsdaten an das Wärmebehandlungs- und Adjustage-System (WAS) weitergeleitet. Das WAS leitet die Aufzeichnungen der einzelnen Bearbeitungsstationen an das Produktionsverfolgungssystem (PVS) weiter. Die Prüfarbeitsplätze melden ihre Ergebnisse dem Qualitätssystem (QIS). Im Gegensatz zu den im QIS gespeicherten Daten – die Informationen über Qualitätsprüfungen und Ausschüsse enthalten – beinhalten die PVS-Daten Zeitaufzeichnungen, die später für die Analyse der Bearbeitungsstationen herangezogen werden. Diese PVS-Daten werden einmal täglich an das ZKPD übermittelt, wo sie gewartet und gegebenenfalls korrigiert werden. Die Abteilung Arbeitswirtschaft wertet die Daten dann – unter anderem zum Zweck der Prämienberechnung – aus. Die zur Verfügung stehenden Daten werden schlussendlich ebenfalls in einem Umfang von über 85.000 Datensätzen dem ZKPD entnommen.

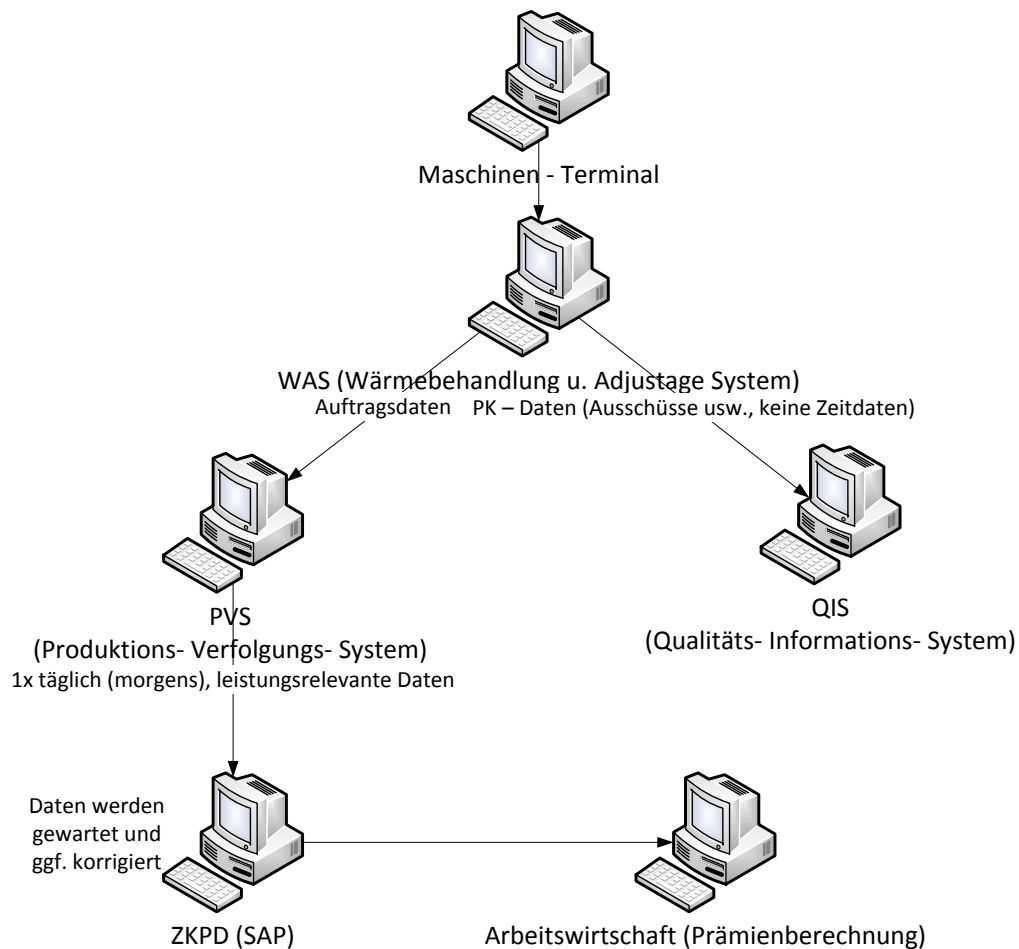


Abbildung 3-8: Informationsfluss der IT-Systemlandschaft

Eine umfassende Auswertung dieser Datensätze ist vorhanden, würde an dieser Stelle aber einen mengenmäßig zu großen Teil einnehmen um hier vollständig dargelegt zu werden. Diese Auswertungen werden dem Unternehmen Böhler Edelstahl in Form von Analysen, Diagrammen und Tabellen digital übergeben und umfassen folgende Bereiche:

- Anzahl der Aufträge pro Jahr
- Anzahl der Aufträge pro Monat
- Anzahl der Aufträge pro Einzelstation und Jahr
- Auswertung der Auftragszusammensetzung hinsichtlich
 - Werkstoffqualitäten
 - Werkstoffmarken innerhalb der Werkstoffqualitäten
 - Produktdimensionen (Querschnitt, Länge, Höhe, Breite)
 - Produktmasse
 - Anzahl der Flachstähle je Auftrag
- Auswertung der Einzelstationen im System hinsichtlich
 - Bearbeitungszeiten
 - Verfügbarkeiten
 - Störzeitverhalten
 - Schichtkalender
 - Technische Grenzen hinsichtlich Bearbeitungsdimensionen

Ein kurzer Auszug der wichtigsten Auswertungen wird im Folgenden wiedergegeben. Die Datenaufbereitung wurde mittels folgenden Softwarepaketen durchgeführt: Microsoft Access, Microsoft Excel, Microsoft Visio, IBM SPSS und Siemens Plant Simulation.

3.1.3.1 Datenanalyse des System-Inputs

Als System-Input ist in diesem Fall der Produktionsauftrag an sich gemeint, wobei ein Auftrag im Folgenden definiert wird über seine Fertigungsauftrags-, Los- und Splitnummer. Prinzipiell gäbe es auch die Möglichkeit, die Stückgüter selbst als Systeminput heranzuziehen, was in Zuge dieses Projekts allerdings als die klar schlechtere Wahl zu sehen ist. Die Betrachtung auf Auftragsebene ermöglicht eine kompaktere und einfacher handhabbare Herangehensweise im Hinblick auf die Simulationsstudien, ohne Einbußen in der Ergebnisauswertung hinnehmen zu müssen.

Die in der Halle bearbeiteten Flachstähle können die in Tabelle 3-2: Produktabmessungen der gewalzten Flachstähle zusammengefassten Dimensionen aufweisen:

Tabelle 3-2: Produktabmessungen der gewalzten Flachstähle (nach [BÖH14b])

	Breite [mm]	Dicke [mm]
Quadratisch	15 – 150	
Flach	15 – 60	5 – 41
	60 – 200	5 – 86
	100 – 300	15 – 80

Produktionsumfang

Zunächst ist es wichtig, den Umfang der jährlich zu erledigenden Aufträge abschätzen zu können. Diese Zahl war seit 2011 leicht rückläufig und lag 2013 bei 9581 Aufträgen (Tabelle 3-3: Anzahl der erledigten Aufträge seit 2011).

Tabelle 3-3: Anzahl der erledigten Aufträge seit 2011

Jahr	Anzahl der erledigten Aufträge
2011	10505
2012	9708
2013	9581

Um die Fluktuationen in der Systemauslastung über das Jahr besser abschätzen zu können, wird die Anzahl der Aufträge pro Monat abgeleitet. Dabei wird jeder Auftrag pro Monat nur einmal gezählt, auch wenn er an mehreren Einzelstationen abgearbeitet wird. Sollte ein und derselbe Auftrag in mehr als einem Monat bearbeitet werden, so scheint dieser Auftrag in jedem dieser Monate einmal auf. Auf diese Weise lassen sich jährliche Tendenzen abschätzen und wiederkommende Regelmäßigkeiten werden aufgezeigt (Abbildung 3-9). Durch die Visualisierung lässt sich erkennen, dass die monatliche Systemauslastung jährlich einen sehr ähnlichen Verlauf aufweist (bis auf kleine Ausreißer Anfang 2011). Weiters wird deutlich, dass im Juli ein starker Rückgang der gemeldeten Aufträge auftaucht – was sich durch den

jährlichen dreiwöchigen Betriebsurlaub im Sommer erklären lässt - und dass auch um die Weihnachtszeit die Zahl rückläufig ist.

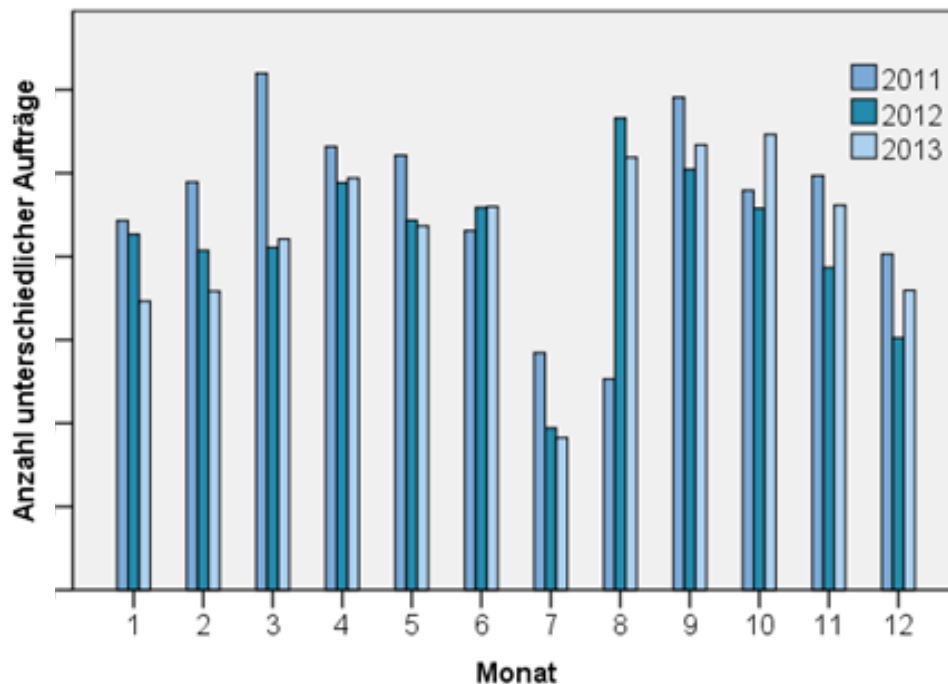


Abbildung 3-9: Monatliche Entwicklung der Auftragslage, 2011-2013

Es kann also zusammengefasst werden, dass sowohl die jährliche Gesamtbelastung, als auch deren monatliche Verteilung einen sehr konstanten Verlauf aufweisen.

Auftragszusammenstellung

Da nun die Systembelastung im Sinne der Auftragszahlen abgeschätzt werden kann, ist es außerdem von Interesse zu wissen, wie sich diese Aufträge zusammensetzen, d.h. um welches Produkt es sich im Endeffekt handelt. Die Entität „Auftrag“ besteht dabei aus einer Vielzahl von Attributen, die teilweise direkt vorliegen und teilweise aus den vorhandenen Daten berechnet werden müssen. Dabei sind nicht alle dieser (direkt vorliegenden) Attribute relevant und werden an dieser Stelle auch nicht weiter diskutiert. Um den Auftrag später in der Simulation exakt abzubilden können, werden die in Tabelle 3-4 ersichtlichen Attribute aus den Rohdaten extrahiert. Die farblich hinterlegten Attribute werden im Folgenden kurz näher erläutert.

Tabelle 3-4: Attribute eines Produktionsauftrags

Auftrag				
Fertigungsauftrags-Nr.	Marke	Länge	Querschnitt	Auftraggeber
Los-Nr.	Qualität	Breite	Masse	Anzahl Stäbe
Split-Nr.	Dichte	Höhe	Fabrikat	Jahr

Wie in Tabelle 3-4 ersichtlich, ist eines der Auftrags-Attribute die Werkstoff-Qualität. Diese gibt an, um welche Art von Werkstoff es sich handelt. Die Werkstoff-Marke hingegen gibt die spezifische Zusammensetzung der Legierungselemente an und definiert somit den Werkstoff eindeutig. Ein Beispiel hierfür wäre die Qualität K (Kaltarbeitsstahl) mit der Marke K110 (definierter Werkstoff). Eine Visualisierung der in Auftrag gegebenen Werkstoff-Qualitäten (siehe Abbildung 3-10) zeigt, dass jährlich deutlich über 50% des Auftragsaufkommens die K-Stähle ausmachen. Der prozentuelle Anteil der weiteren Qualitäten fällt dann annähernd negativ-exponentiell ab. Eine ABC-Analyse zeigt, dass die Werkstoff-Qualitäten K, T, S, N (entspricht 25% der möglichen Qualitäten) bereits mehr als 90% der Aufträge ausmachen.

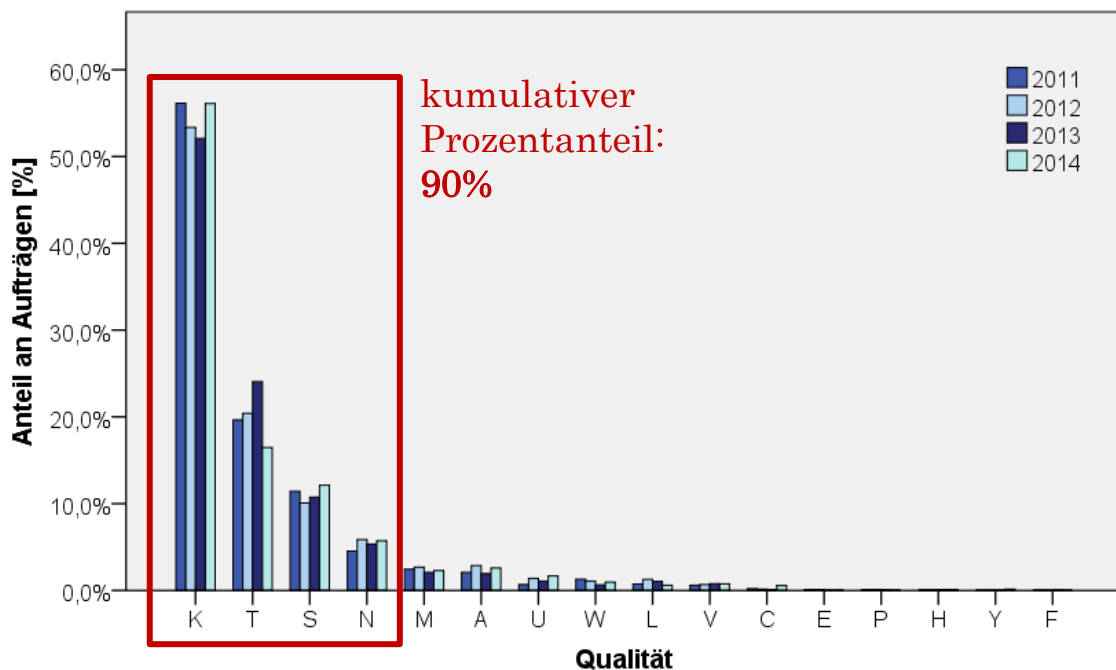


Abbildung 3-10: Prozentuelle Anteile der Werkstoff-Qualitäten

Ein Produktionsauftrag umfasst jeweils mehrere Flachstäbe. Diese Anzahl der Einzelstäbe pro Auftrag beeinflusst selbstverständlich die Bearbeitungszeit an den Einzelstationen immens. Aus diesem Grund wird untersucht, wie viele Stäbe pro Auftrag zu erwarten sind (siehe Abbildung 3-11). Auch hier zeigt sich ein negativexponentieller Verlauf (90% der Aufträge bestehen aus weniger als 110 Einzelstäben).

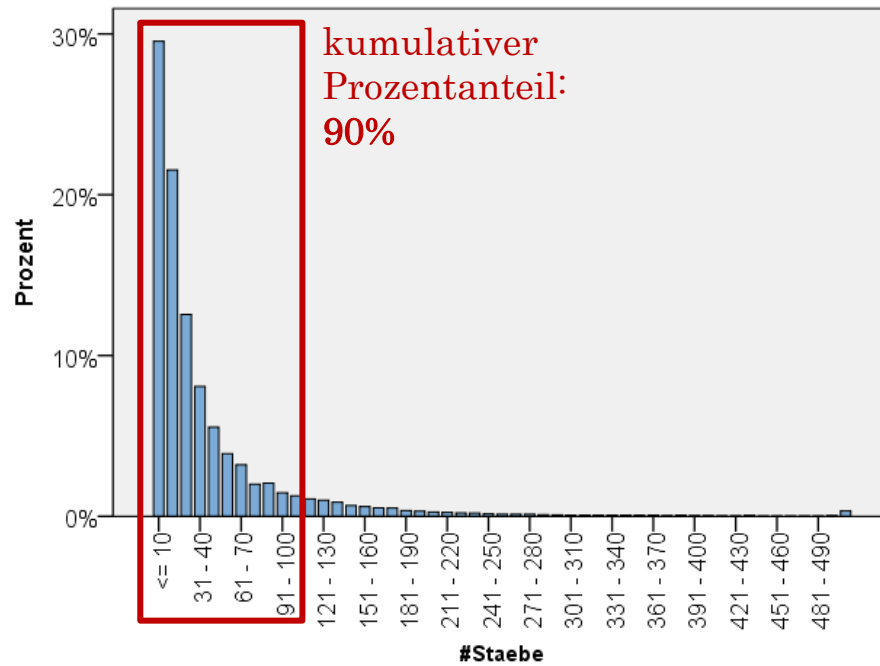


Abbildung 3-11: Anzahl der Einzelstäbe pro Auftrag

Neben den jeweiligen Werkstoffen und dem Umfang aus Einzelstäben, sind vor allem die Produktdimensionen der Aufträge interessant. Die Flachstäbe weisen bei der Anlieferung in der Regel eine Länge von ca. 3 bis 4,5 Metern und unterschiedlichste Querschnitte auf (siehe Abbildung 3-12), in der Regel sind diese jedoch nicht quadratisch (Anteil der quadratischen Produkte: ca. 3%). Gut erkennbar ist hier auch der Trend zu eher kleineren Querschnitten: 90% der Aufträge weisen einen geringeren Querschnitt als 120cm² auf.

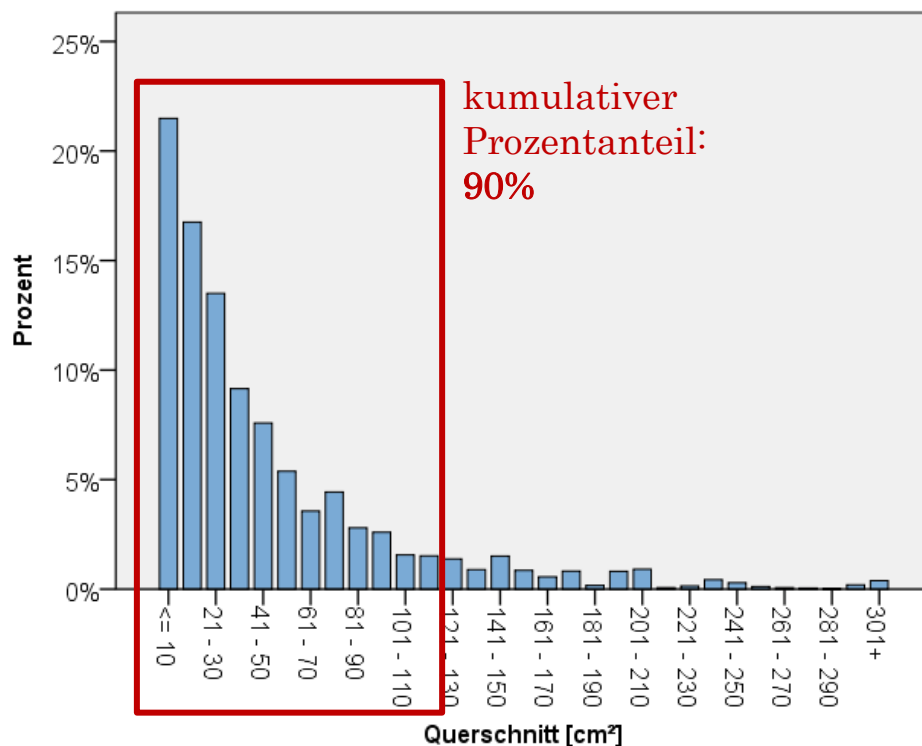


Abbildung 3-12: Querschnitte der Flachstäbe

Wie oben ersichtlich, sind sowohl bei der Stabanzahl je Auftrag, als auch bei den Querschnittsdimensionen die prozentuellen Anteile der Aufträge bei höheren Werten stark rückläufig. Um zu sehen, ob es eine Korrelation der beiden Attribute Querschnitt und Stabanzahl gibt, wird ein Streudiagramm erzeugt (Abbildung 3-13). Dabei wird sofort ersichtlich, dass es eine negative Korrelation zwischen den beiden Größen gibt. Das bedeutet, dass bei geringeren Querschnitten die Wahrscheinlichkeit größer ist, dass es sich bei dem Auftrag um eine vergleichsweise große Anzahl an Einzelstäben handelt, bzw. umgekehrt. Weiters ist ein Bereich erkennbar, bei dem es scheinbar keinen Zusammenhang zwischen Stabanzahl und Querschnitt gibt. Durch diese Erkenntnisse lässt sich auch bereits eine Form der Verteilungskurve der Auftrags-Masse vermuten, die sich – gleiche Stablängen der Aufträge vorausgesetzt – daher in Richtung einer Normalverteilung entwickeln müsste. In Abbildung 3-14 ist das tatsächliche Histogramm des verrechneten Gewichts ersichtlich, das den verhältnismäßig größten Teil der Aufträge (etwa 30%) bei einer bis eineinhalb Tonnen zeigt. Abbildung 3-11 bis Abbildung 3-14 beinhalten dabei alle Aufträge, d.h. alle Werkstoffqualitäten.

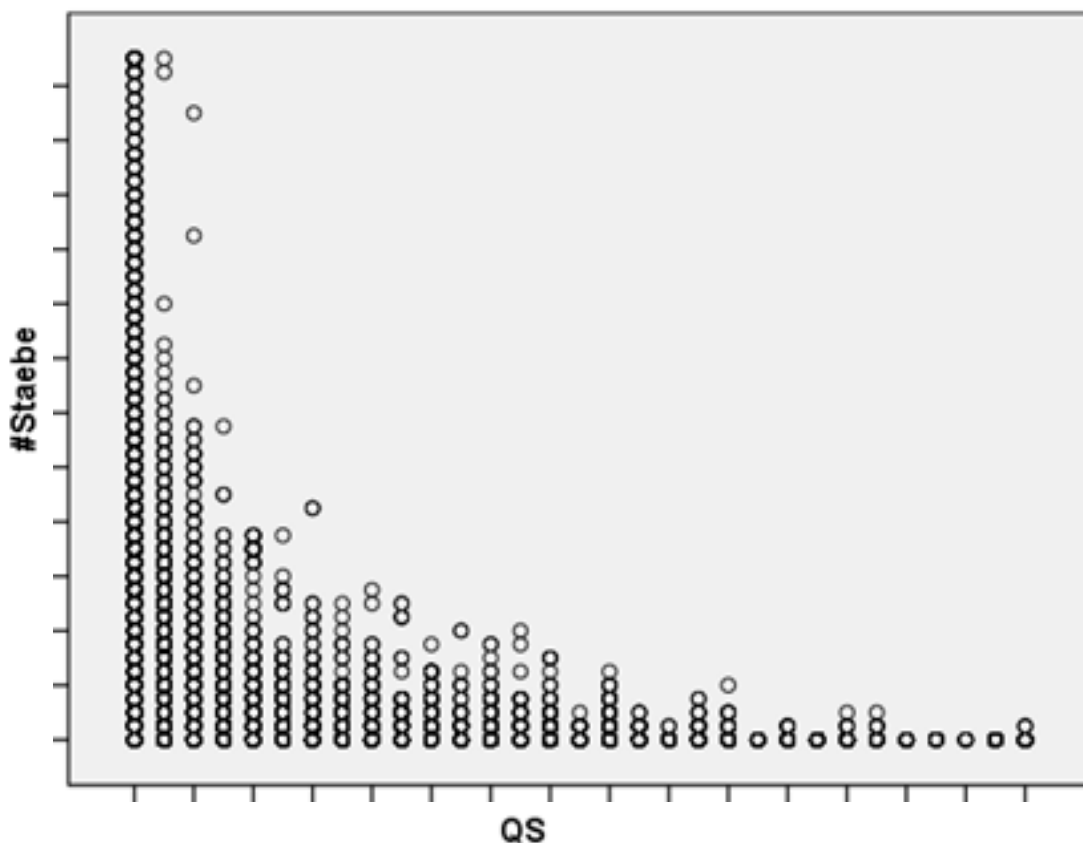


Abbildung 3-13: Streudiagramm: Querschnitt und Stabanzahl je Auftrag

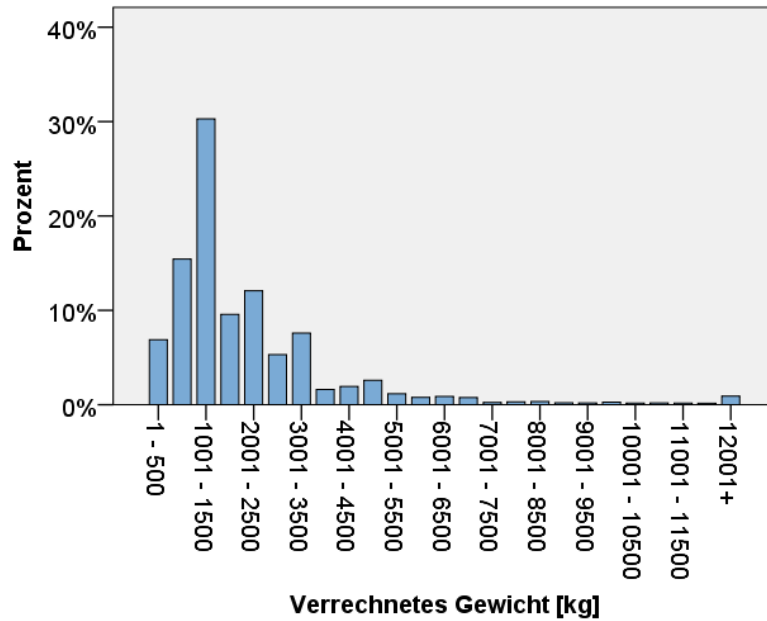


Abbildung 3-14: Verrechnetes Gewicht je Auftrag

Wie oben bereits angesprochen machen die vier Qualitäten K, T, S, N bereits 90% aller Aufträge aus. Aus diesem Grund werden die Auftragszusammenstellungen dieser vier Qualitäten zusätzlich noch jeweils für sich ausgewertet. Diese Auswertungen betreffen die Bereiche: Anzahl der Einzelstäbe, verrechnetes Gewicht, Querschnitt und Werkstoffmarke (Abbildung 3-15) und werden ebenfalls als digitaler Anhang an Böhler Edelstahl übermittelt.

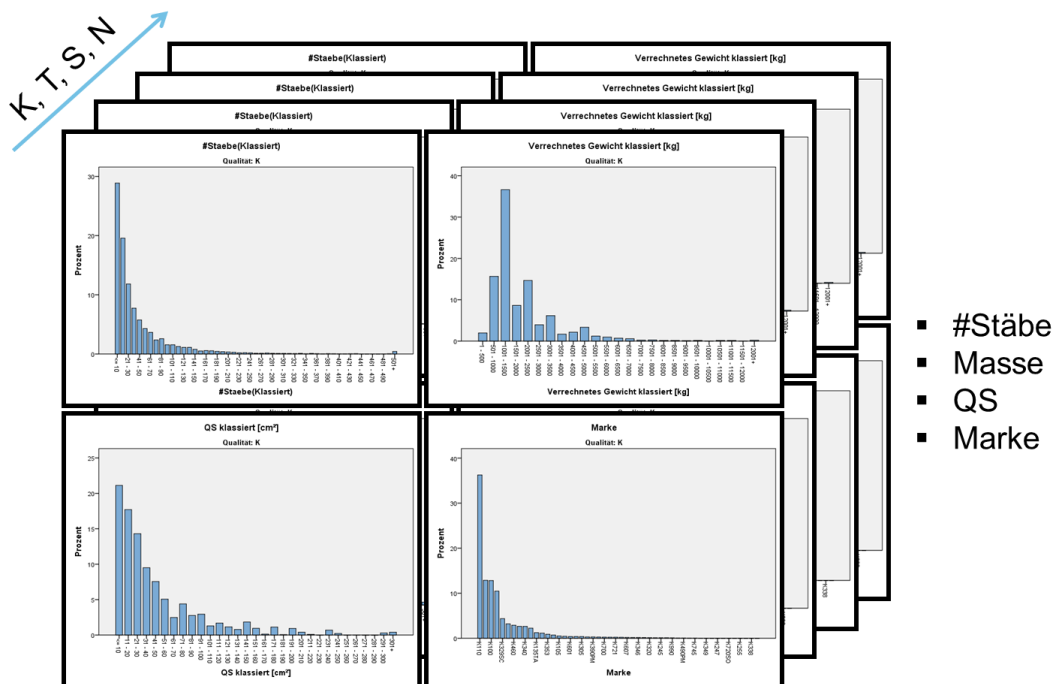


Abbildung 3-15: Spezifische Auswertungen nach Werkstoffqualität

3.1.3.2 Datenanalyse des Produktionssystems

Prüf- und Adjustagelinien

Die Halle 8 ist organisatorisch in vier Prüf- und Adjustagelinien (PAL) gegliedert: PAL11, PAL12, PAL13, PAL14. Die in der Halle stationierten Einzelstationen sind dabei ihrerseits jeweils einer dieser PAL zugeordnet und können aufgrund ihrer Aufgabe in die zwei Kategorien Bearbeitungsstation und Prüf- u. Kontrollstation (PK-Station) gegliedert werden. Die Bearbeitungsstationen können wiederum einer der folgenden Tätigkeiten zugeordnet werden: Sandstrahlen, rollenrichten, richtpressen, trennen, schleifen oder fräsen. Je nach PK-Station können folgende Werkstoffprüfungen durchgeführt werden: visuelle Prüfung, Maßkontrolle, Magnetpulverprüfung, Ultraschallprüfung, Verwechslungsprüfung oder Wirbelstromprüfung. Insgesamt werden im System 19 Bearbeitungsstationen und 5 PK-Stationen gezählt. Die Auflistung aller Einzelstationen inkl. PAL-Zugehörigkeit und Tätigkeit findet sich in Tabelle 3-5.

Tabelle 3-5: Einzelstationen des Produktionssystems Halle 8

	Bezeichnung	Tätigkeit
PAL11	STR/GU	Sandstrahlen
	MRRM4	Rollenrichten
	MRRM5	Rollenrichten
	MRRM6	Rollenrichten
	MRRM8	Rollenrichten
	MRRM9	Rollenrichten
	FSM1	Schleifen
	RP2	Richtpressen
	PK_PAL11	Prüf- und Kontrollstation
	TS_PAL11 (=TSM 550)	Trennen
PAL12	MRRM1 (=WYKO)	Rollenrichten
	Fischer	Sandstrahlen
	RP6	Richtpressen
	PK_PAL12	Prüf- und Kontrollstation
	TS_PAL12 (=TS 800 PAL12)	Trennen
PAL13	MRRM7	Rollenrichten
	RP8	Richtpressen
	RP9	Richtpressen
	PK_PAL13	Prüf- und Kontrollstation
	TS_PAL13 (=TS 800 PAL13)	Trennen
	Kantprüfanlage	Prüf- und Kontrollstation
PAL14	RP10	Richtpressen
	FM1	Fräsen
	PK_PAL14	Prüf- und Kontrollstation
	TS_PAL14 (=BS Behringer)	Trennen

Eine vereinfachte Zuteilung der Aufträge zu den PALs wird betriebsseitig über die Produktabmessungen bestimmt und wie folgt festgelegt:

Tabelle 3-6: Dimensionszuordnung der PAL, Angaben in [mm]

PAL11		PAL12	
Breite	Stärke	Breite	Stärke
Alle	≤ 16	$40 < b < 150$	$16 < s < 80$
≤ 40	$16 < s < 40$	Quadrat	40 bis 80
Quadrat	40	Querschnitt	$\leq 6500 \text{ mm}^2$
PAL13		PAL14	
Breite	Stärke	Breite	Stärke
$50 < b \leq 300$	> 16	$120 < b < 450$	$35 < s < 220$
Quadrat	80 bis 90	Querschnitt	$> 8500 \text{ mm}^2$
Querschnitt	$\leq 8500 \text{ mm}^2$		

Diese Tabelle ist jedoch nicht geeignet, zulässige Aussagen darüber zu treffen, an welchen Einzelstationen welche Aufträge abgearbeitet werden. Ein wichtiges Beispiel dafür ist die Sandstrahlanlage STR/GU, die zwar organisatorisch der PAL11 zugeteilt ist, jedoch gegebenenfalls auch das Material für andere PAL bearbeitet. Den tatsächlichen Weg durch das Produktionssystem geben die auftragsspezifischen Arbeitspläne vor, die später noch vorgestellt werden.



Abbildung 3-16: Umformeinheit einer Rollenrichtmaschine

Einzelstationen

Für eine detaillierte Auswertung der Einzelstationen stehen – bis auf die Trennsägen – nur die Bearbeitungsstationen, nicht jedoch die PK-Stationen zur Verfügung. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass an den PK-Stationen die Zeitaufzeichnung praktisch keine Rolle spielt. Da der Arbeitsgang Produktkontrolle oft mehrere Prüfschritte an unterschiedlichen Arbeitsplätzen beinhaltet, kann sich der tatsächliche Prüfzeitraum auf mehrere Tage erstrecken. Somit sind zeitliche Auswertungen aus den Systemen für einzelne Prüfschritte der Produktkontrolle nicht immer nachvollziehbar.

Der Arbeitsablauf an den Bearbeitungsstationen gliedert sich folgendermaßen:

1. Ein Mitarbeiter, der über die entsprechende Qualifikation zur Bedienung der Bearbeitungsstation verfügt, sucht sich an seinem Maschinenterminal den Auftrag aus seinem Arbeitsvorrat aus, den er als nächstes bearbeiten wird. Diese Entscheidung der Auftragswahl wird von mehreren Gegebenheiten beeinflusst:
 - a. Die Dringlichkeit der Auftrags erledigung: In jedem Auftragsarbeitsplan ist die Reihenfolge der Einzelstationen abgebildet und jeder Station ein Soll-Termin der Bearbeitung zugeordnet. Am Maschinenterminal der Einzelstation sind alle, sich im Arbeitsvorrat dieser Einzelstationen befindlichen Aufträge ersichtlich und mit einer Priorität versehen. Priorität 1 zeigt an, dass der Auftrag bereits hätte bearbeitet werden sollen, d.h. er ist mindestens einen Tag an dieser Station überfällig. Mit Priorität 2 werden jene Aufträge gekennzeichnet, die am aktuellen Tag für die Bearbeitung vorgesehen wären. Priorität 3 verweist auf Aufträge, die frühestens am nächsten Tag zu bearbeiten sind. Diese Prioritäten werden täglich um Mitternacht aktualisiert. Der Mitarbeiter an der Maschine wird also oft dazu tendieren, jene Aufträge zu bearbeiten, die laut Arbeitsplan besonders dringend erscheinen.
 - b. Der Zeitaufwand der Auftragsbereitstellung: Wie in Abbildung 3-17 ersichtlich, werden die Flachstähle in sogenannten Rampen zwischengelagert. Dabei haben die meisten Rampen eine fixe Zuordnung zu ihren Einzelstationen und beinhalten deren jeweiligen Arbeitsvorrat. Wenn nun von unterschiedlichen vorgelagerten Einzelstationen Material unterschiedlicher Prioritäten in diesen Rampen übereinander gelegt werden, tritt eine Durchmischung der Aufträge bezüglich ihrer Dringlichkeit auf. Wenn sich nun etwa ein bereits überfälliger Auftrag in der Rampe unter vielen anderen Aufträgen geringerer Prioritäten befindet, würde es einen erheblichen Zeitaufwand zum Bereitstellen dieses Auftrages bedeuten, da die darüber liegenden Flachstähle zuerst mittels Kran weggehoben werden müssten. Der Mitarbeiter wird sich also für einen in der Rampe weiter oben liegenden Auftrag entscheiden um Zeit zu sparen, was dem Last-In-First-Out (LIFO) Prinzip entspricht. Dies führt oft zu einer weiteren Verzögerung bereits überfälliger Aufträge.
 - c. Verringerung der Rüstzeiten: Es kommt vor, dass die Reihenfolge der Auftragsabarbeitung durch die Verringerung der Rüstzeiten

mitbestimmt wird. In diesem Fall werden jene Aufträge hintereinander abgearbeitet, die durch die aktuelle Maschineneinstellung bearbeitet werden können.



Abbildung 3-17: Zwischenlagerung in Rampen

2. Der Auftrag wird an der Einzelstation angemeldet und die Zeitaufnahme für diesen Auftrag somit gestartet.
3. Der Mitarbeiter transportiert die Flachstäbe mittels Brückenkran (Abbildung 3-18) von der Rampe zur Einzelstation und beginnt dort mit dem jeweiligen Produktionsprozess.
4. Nach erfolgter Bearbeitung wird der Auftrag an der Maschine abgemeldet und die Zeitaufnahme für diesen Auftrag wird gestoppt.
5. Der Mitarbeiter transportiert den fertig bearbeiteten Auftrag mittels Brückenkran zu der laut Arbeitsplan folgenden Einzelstation und legt die Flachstäbe in eine dazugehörige Rampe. Der Auftrag befindet sich nun sowohl im physischen als auch im informationstechnischen (Maschinenterminal) Arbeitsvorrat der nächsten Einzelstation. Der Prozess beginnt damit wieder von Anfang.

In Abbildung 3-19 ist die Belastung der Bearbeitungsstationen über die Jahre 2011-2013 ersichtlich. Gezählt wird dabei jede Auftragsanmeldung. Wenn ein Auftrag beispielsweise mehr als einmal an einer Station bearbeitet wird, so scheint dieser Auftrag auch genauso oft in der Statistik auf.

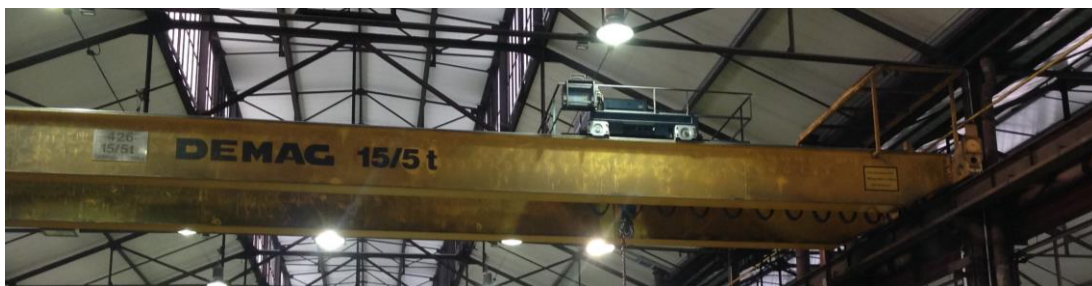


Abbildung 3-18: Brückenkran zum innerbetrieblichen Transport

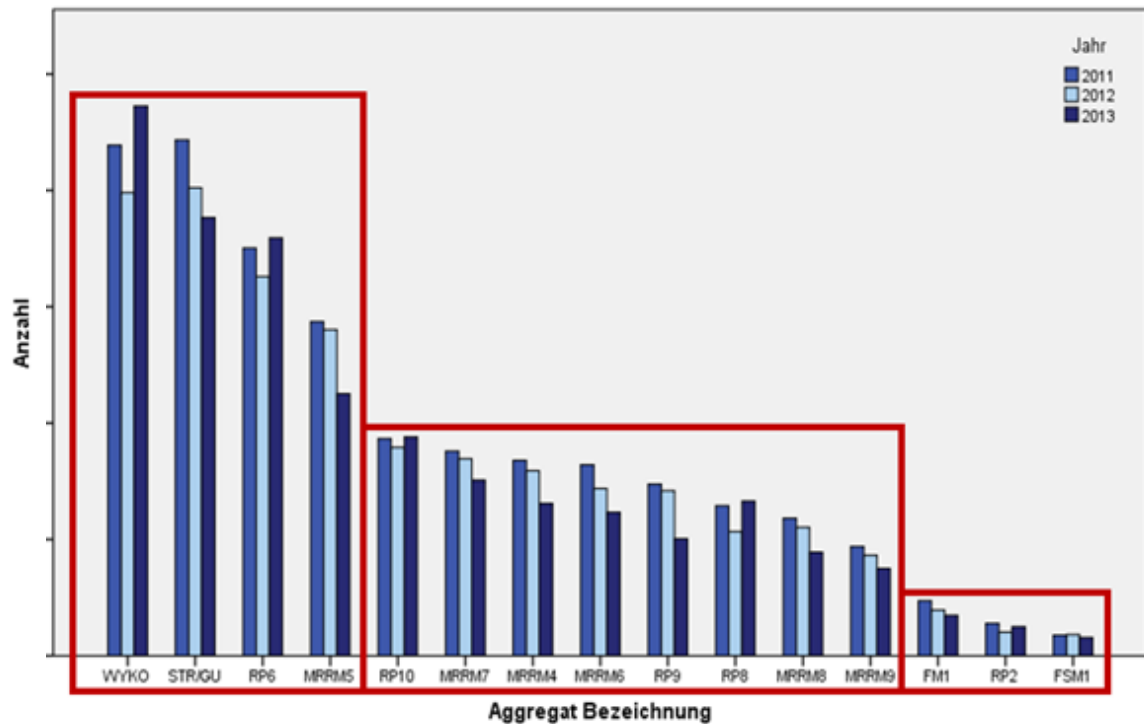


Abbildung 3-19: Auftragsbelastung der Bearbeitungsstationen

Auch hier zeigt sich wieder, dass die jährlichen Tendenzen sehr gleich bleiben und nur in geringem Ausmaß schwanken. Strukturell lassen sich die Bearbeitungsstationen aufgrund ihrer Auftragsauslastung in drei Gruppen unterteilen. Die Bearbeitungsstationen WYKO, STR/GU, RP6 und MRRM5 weisen dabei die stärkste Auslastung auf. FM1, RP2 und FSM1 dagegen werden vergleichsweise seltener zur Auftragsbefreiung benötigt. Die Sandstrahlanlage FISCHER scheint in den Zeitaufzeichnungen nicht auf. Dies ist darin begründet, dass die Einzelstationen WYKO, FISCHER und RP6 in Linie geschaltet sind und jeder Auftrag, der auf der Rollenrichtmaschine WYKO bearbeitet wird, automatisch auch die Sandstrahlanlage FISCHER durchläuft. Falls ein Auftrag nicht sandgestrahlt werden sollte, so wird die Sandstrahlanlage nicht aktiviert und das Produkt durchläuft die Maschine ohne jegliche Bearbeitung.

Zum Aufbau des Simulationsmodells ist es unerlässlich, das Einzelstationsverhalten ausreichend genau beschreiben zu können. Für die korrekte Modellierung der Einzelstationen sind folgende Parameter zu ermitteln:

- Bearbeitungszeit
- Verfügbarkeit und Störzeitverhalten
- Schichtkalender
- Technische Grenzen bezüglich der Produktdimensionen

Für die Modellierung der Bearbeitungszeiten sind drei unterschiedliche Ansätze zulässig (vgl. [KÜH06], S.153):

- **Historische Daten:** Die aufgenommenen Zeitdaten werden in der Simulation direkt genutzt. Im Falle dieses Projekts würde das eine eindeutige Zuteilung von Auftrag und Bearbeitungszeit bedeuten (1:1 Beziehung). Durch diesen Ansatz würde das Simulationsmodell die Vergangenheit exakt nachbilden wodurch die Flexibilität der Simulation stark eingeschränkt wäre.
- **Stochastische Funktion:** Die Verwendung von stochastische Daten erlaubt eine äußerst kompakte Darstellung des Realverhaltens. Eine geeignete Funktion wird dabei durch die Einstellung ihrer jeweiligen Parameter an die vorhanden Daten so gut es geht angepasst. Ein anschließender Goodness-of-Fit Test ergibt, ob das Realverhalten durch die Verteilung auch hinreichend repräsentiert wird. Dieser Ansatz ist auch dann gut geeignet, wenn nur sehr wenige Rohdaten vorliegen und man sich in einem iterativen Prozess an ein passendes Zeitverhalten herantasten muss.
- **Empirische Verteilung:** Falls sich keine passende Verteilung finden lässt, oder eine große Menge an Daten zur Verfügung steht, erscheint es sinnvoll, das Systemverhalten über Histogramme zu beschreiben. Dabei müssen nur die Klassenbreite und die Intervallgrenzen gesetzt werden.

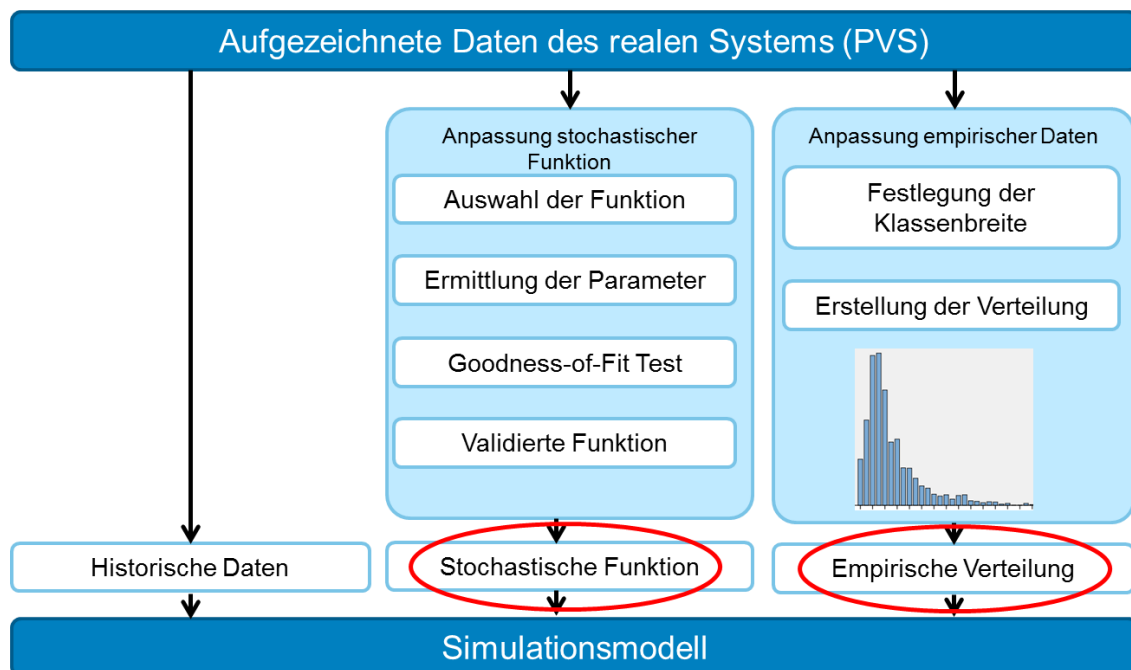


Abbildung 3-20: Aufbereitung der Zeitdaten (nach [KÜH06])

Wie in Abbildung 3-20 ersichtlich, werden den in diesem Projekt erstellten Simulationsmodellen ausschließlich stochastische Funktionen oder empirische Verteilungen zur Beschreibung der Bearbeitungszeiten der Einzelstationen implementiert. Da – wie bereits erwähnt – für die PK-Stationen und Trennsägen nur sehr eingeschränkt Daten vorliegen und deren Aussagekraft auch stark zu hinterfragen ist, werden für diese Einzelstationen stochastische Funktionen angenähert. Für die restlichen Einzelstationen – die sogenannten

leistungsrelevanten Einzelstationen – liegt eine Vielzahl von historischen Daten vor, mit denen Histogramme generiert werden, die das Bearbeitungsverhalten beschreiben.

Tabelle 3-7: Abbildung des Bearbeitungsverhaltens der Einzelstationen

Empirische Verteilung		Stochastische Funktion
FM1	FSM1	PAL11_PK
MRRM4	MRRM6	PAL11_TS
MRRM7	MRRM8	PAL12_PK
RP10	RP2	PAL12_TS
RP9	MRRM5	PAL13_PK
MRRM9	RP6	PAL13_TS
RP8	STR/GU	PAL14_PK
WYKO		PAL14_TS
		Kantprüfanlage

Um eine gute Abbildungsgenauigkeit des Bearbeitungsverhaltens zu erhalten, muss hinterfragt werden, wovon die Bearbeitungsstation der Einzelstationen im jeweiligen Fall abhängt. Aus diesem Grund wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Aus der großen Vielzahl an Auftragsattributen stellte sich heraus, dass die Stabanzahl je Auftrag und die Bearbeitungszeit eine starke Korrelation aufweisen (bei fast allen Einzelstation zeigte sich eine Pearson Korrelation von $R > 0,8$; zweiseitig signifikant bei Niveau 0,01). Exemplarisch wird das durch ein Streudiagramm der Bearbeitungsstation „MRRM7“ in Abbildung 3-21 gezeigt. Dabei sind zwei Bereiche zu unterscheiden: Ein Bereich von Falschmeldungen im Bereich von null Stäben, der sich durch Fehlinformationen im Bereich des Auftragsgewichts ergibt und ein Bereich starker Korrelation zwischen Stabanzahl und Bearbeitungszeit. Eine Bestimmung der Bearbeitungszeiten im Simulationsmodell wäre somit auch über das Erstellen einer Regressionsgerade denkbar gewesen.

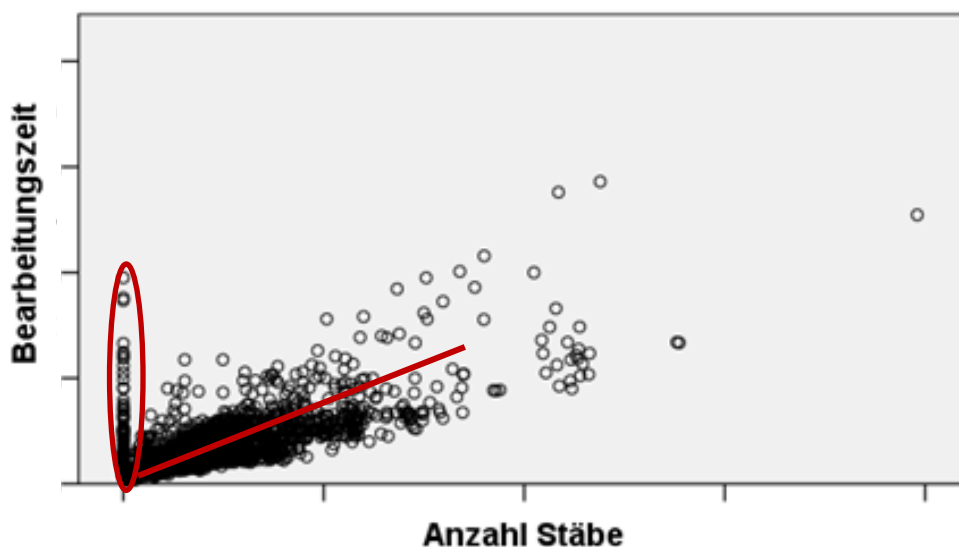
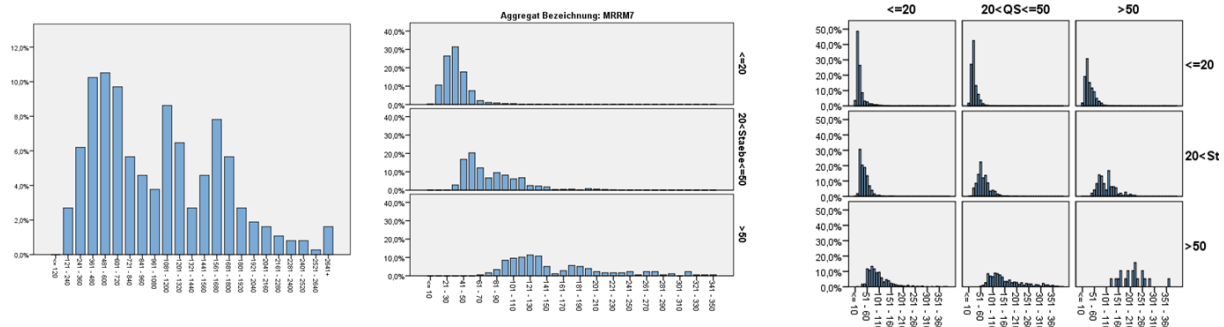


Abbildung 3-21: Korrelation zwischen Bearbeitungszeit und Stabanzahl am Beispiel MRRM7

Diese Korrelation ist bei den einzelnen Bearbeitungsstationen unterschiedlich stark ausgeprägt. Einige von ihnen lassen sich in ihrem Zeitverhalten durch die zusätzliche Betrachtung der Querschnittsmaße noch exakter beschreiben. Aus diesem Grund werden drei unterschiedliche Abhängigkeitsmodelle entworfen:

- Die Bearbeitungszeit ist unabhängig von jeglichen Auftragsattributen.
- Die Bearbeitungszeit ist abhängig von der Anzahl der Stäbe.
- Die Bearbeitungszeit ist abhängig von der Anzahl der Stäbe und dem Querschnitt.



Histogramm=Const.	Histogramm=f(#Stäbe)	Histogramm=f(#Stäbe, QS)
FM1	MRRM4	MRRM5
FSM1	MRRM6	MRRM9
	MRRM7	RP6
	MRRM8	RP8
	RP10	STR/GU
	RP2	WYKO
	RP9	

Abbildung 3-22: Drei Modelle der Bearbeitungszeit-Bestimmung

Für jene Modelle, die die Stabanzahl und den Querschnitt zur Bestimmung der Bearbeitungszeit berücksichtigen, werden jeweils drei Klassen für die Stabanzahl und den Querschnitt gebildet (bei beiden Parametern: kleiner gleich 20, 20 bis inkl. 50, größer 50). Beispiel: Ein Auftrag beinhaltet 27 Einzelstäbe mit einem Querschnitt von jeweils 62cm². Dieser Auftrag kommt zur Bearbeitung zur Einzelstation „MRRM5“. Die Bearbeitungszeit wird nun durch dieses Histogramm bestimmt: Station: „MRRM5“, Histogramm: QS > 50cm² und 20<Stabanzahl<=50. Käme derselbe Auftrag zur Einzelstation „MRRM4“, so würde das betreffende Histogramm nur durch die Stabanzahl festgelegt werden. Diese Vorgehensweise führt zu einem Implementierungsaufwand von insgesamt 77-Input Tabellen zur Bestimmung der Bearbeitungszeiten.

Bei den PK- und TS-Stationen wird die Bearbeitungszeit über stochastische Funktionen angenähert. Für jede dieser Einzelstationen werden die dazugehörigen Rohdaten in Plant Simulation importiert und ein Histogramm erzeugt. Anschließend werden unterschiedliche Verteilungsfunktionen mit diesem Histogramm verglichen und deren Parameter bestimmt. Ein Goodness-of-Fit Test zeigt dann die Güte der Übereinstimmung (Chi-Quadrat Test). Abbildung 3-28 zeigt die Vorgehensweise des sogenannten „DataFit“-Tools in

Plant Simulation. Die historischen Daten werden dabei rot dargestellt, die angenäherte Verteilung grün.

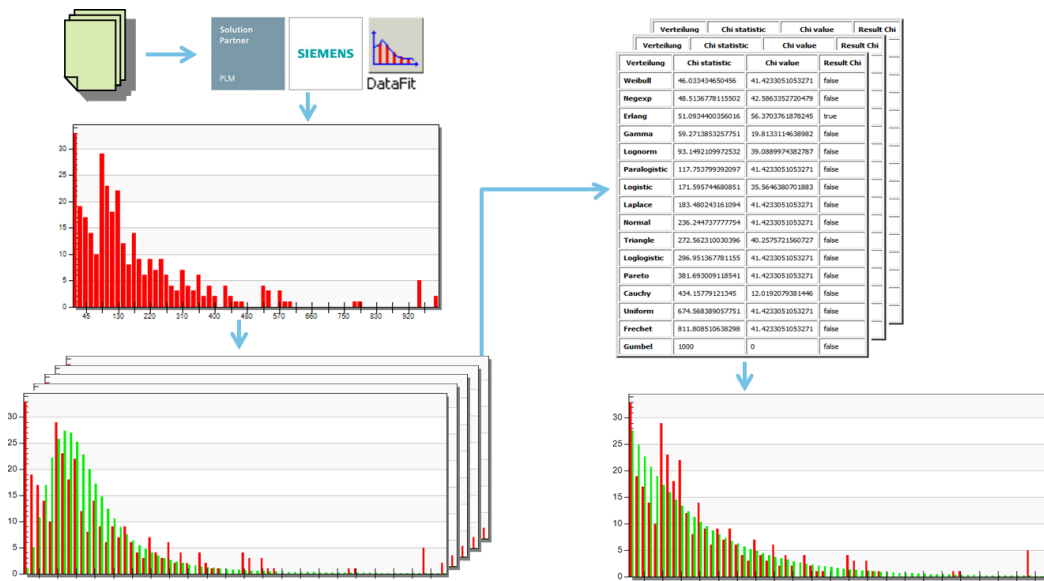


Abbildung 3-23: Vorgehensweise bei der Ermittlung einer stochastischen Funktion

Die in Tabelle 3-8 ersichtlichen Verteilungen zeigten die größten Übereinstimmungen mit den historischen Daten und werden daher in das Simulationsmodell implementiert.

Tabelle 3-8: Bearbeitungszeit-Verteilungen der PK- und TS-Stationen

Einzelstation	Verteilung	Einzelstation	Verteilung
PAL11_PK	Weibull	PAL13_TS	Konstant
PAL11_TS	Neg.-Exponential	PAL14_PK	Normalverteilung
PAL12_PK	Weibull	PAL14_TS	Konstant
PAL12_TS	Gamma	Kantprüfanlage	Gleichverteilung
PAL13_PK	Weibull		

Die Bestimmung der der Verfügbarkeiten gelingt über eine Auswertung der Arbeitsgangvarianten (AGV). An den leistungsrelevanten Einzelstationen ist zu jeder Zeit der Statistikerfassungszeit eine Arbeitsgangvariante gemeldet, deren Zeitdauer aufgezeichnet wird. Insgesamt werden zweiundzwanzig unterschiedliche Arbeitsgangvarianten mit unterschiedlichen Zeitanteilen ausgewertet. Zur Berechnung der Maschinenverfügbarkeit werden diese Arbeitsgangvarianten jeweils einer von zwei Gruppen zugeteilt: „verfügbar“ oder „nicht verfügbar“. Die Berechnung der Verfügbarkeit erfolgt nach Gl. 3-2.

$$Verf. = \frac{\sum \text{Zeitanteile "verfügbar"}}{\sum \text{Zeitanteile verfügbar} + \sum \text{Zeitanteile "nicht verfügbar"}} \quad \text{Gl. 3-2}$$

Abbildung 3-24 zeigt die Aufschlüsselung der gesamten Statistikerfassungszeit in Plant Simulation. Der Anteil der Verfügbarkeit ist demnach durch die Teilbereiche arbeiten, rüsten, warten und blockiert gegeben. Diesen Bereichen werden die gemeldeten Arbeitsgangvarianten zugeteilt und damit eine

Berechnung der Verfügbarkeit ermöglicht. Dieser Abbildung zufolge kann die Berechnung auch folgendermaßen geschrieben werden:

$$Verf. = \frac{\sum \text{Zeitanteile "verfügbar"}}{\sum \text{Zeitanteile "nicht pausiert"}} \quad \text{Gl. 3-3}$$

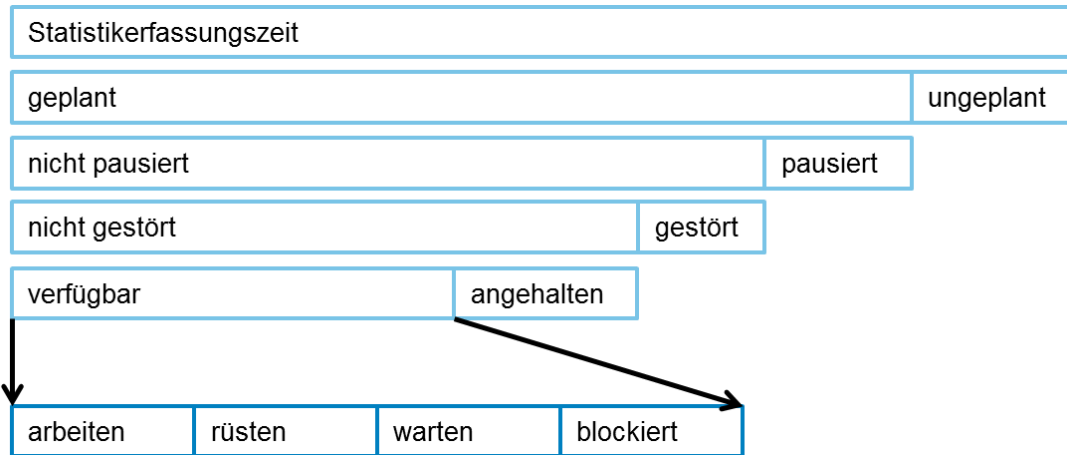


Abbildung 3-24: Aufteilung der Statistikerfassungszeit in Plant Simulation

Die Ergebnisse der Datenaufbereitung sind in Abbildung 3-25 ersichtlich. Neben der Verfügbarkeit muss auch noch eine Aussage bezüglich der Mean-Time-To-Repair (MTTR) oder der Mean-Time-Between-Failures getroffen werden um das Störzeitverhalten in der Simulation vollständig abbilden zu können. Die vorhandenen Daten legen es nahe, den Weg über die Berechnung der MTTR zu gehen. Dazu werden die arithmetischen Mittel der Störzeiten für jede Einzelstation gebildet und in das Simulationsmodell übernommen. Die Einzelstationen können somit hinsichtlich ihres Störzeitverhaltens vollständig beschrieben werden.

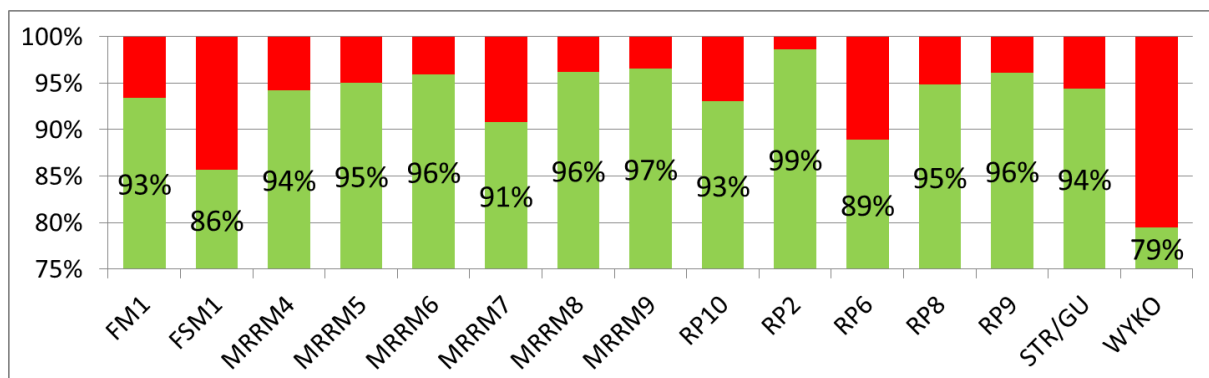


Abbildung 3-25: Verfügbarkeiten leistungsrelevanter Einzelstationen

Der zeitliche Ablauf im System wird durch die Schichtzeiten vorgegeben. Generell gibt es drei Schichten: Früh-, Mittags- und Nachtschicht (Tabelle 3-9). Zusätzlich zu der angegebenen Zeit stehen für die Mitarbeiter pro Schicht achtzehn Minuten Pausenzeit zur freien Einteilung zur Verfügung. In der Frühschicht findet außerdem jeweils von 09:18 – 09:23 Uhr ein Meeting zur Besprechung von KVP-Maßnahmen statt (SQCDP-Meeting).

Tabelle 3-9: Schichtzeiten Halle 8

Schicht	Uhrzeit	Pause
Frühschicht	05:45 – 13:45	09:00 – 09:18
Mittagsschicht	13:45 – 21:45	18:00 – 18:18
Nachtschicht	21:45 – 05:45	02:00 – 02:18

An den Einzelstationen kann nur dann eine Bearbeitung erfolgen, wenn ein Mitarbeiter mit der entsprechenden Qualifikation zur Verfügung steht. Die Mitarbeiter arbeiten dabei gemäß ihren zugeteilten Schichtkalendern. Bei den Einzelstationen muss differenziert werden: So unterliegen manche Einzelstationen einem relativ gleichmäßigen Schichtmodell, während andere sehr flexibel bedient werden, weil an ihnen nur in geringer Anzahl Aufträge zu bearbeiten sind. Um konkrete Aussagen darüber treffen zu können, vor allem in Hinblick auf die Simulation, wird folgender Ansatz zur Identifikation von Einzelstation-Schichtzugehörigkeiten gewählt: Jede Meldung am Maschinenterminal der Einzelstation (jede Meldung einer AGV) wird mit ihrer zugehörigen Uhrzeit in einem Streudiagramm geplottet. Auf diese Weise lässt sich feststellen, ob eine Einzelstation einem regelmäßigen Schichtmodell unterliegt oder nur im Bedarfsfall bedient wird. Abbildung 3-26 zeigt exemplarisch je eine Einzelstation mit regelmäßigem Schichtmodell (MRRM7: Meldungen treten in der Regel nur in der Frühschicht auf) und eine Einzelstation mit flexiblem Schichtmodell (RP2: Meldungen treten in allen drei Schichten auf). Diese Auswertung wird für jede leistungsrelevante Einzelstation für den Zeitraum Jänner 2013 bis April 2014 durchgeführt (dies entspricht dem Simulationszeitraum). Um Fluktuationen in der Schichtzuweisung über das Jahr abschätzen zu können, wird zusätzlich noch eine Auswertung über den gesamten Simulationszeitraum durchgeführt. Für die PK- und TS-Stationen wird aufgrund fehlender Aufzeichnungen mit dem Betrieb über die jeweilige Schichtzuweisung Rücksprache gehalten.

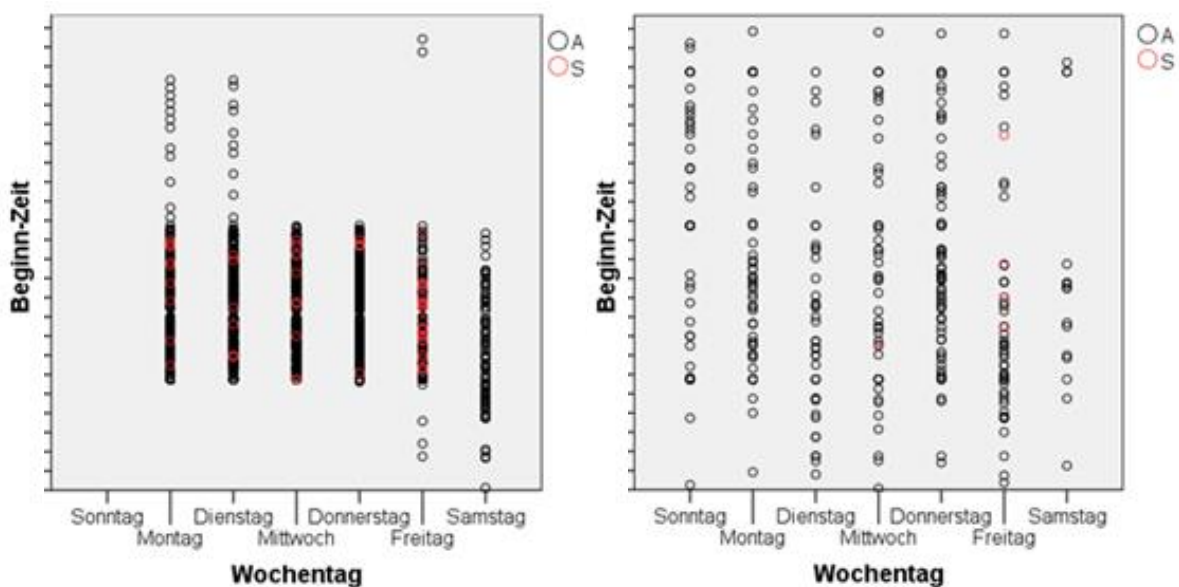


Abbildung 3-26: Streudiagramme zur Zuweisung von Einzelstations-Schichtmodellen

Dieselbe Problematik ergibt sich für die Zuteilung von Schichtkalendern zu den jeweiligen Mitarbeitern. Wie im einleitenden Teil dieser Arbeit bereits erwähnt wurde, betrifft dieses Produktionssystem das Ende der Wertschöpfungskette von Böhler Edelstahl. Die vorgelagerten Prozesse und Randbedingungen (Gießzyklen, Walzzyklen) beeinflussen somit in entscheidender Weise die Vorgänge in der Halle 8. So wird jede Verspätung, die sich in Vorbetrieben ergibt, an die Prüf- und Adjustageline weitergegeben. Meist ist das System mit ungleichmäßigem Auftrags-Input konfrontiert und es muss stets sehr kurzfristig darauf reagiert werden um die Zielgrößen (z.B. Durchsatz, Liefertreue) so gut es geht erhalten zu können. Der wichtigste Stellparameter für diese Flexibilität ist die Schichtzuteilung an die Mitarbeiter. So wird diese oft nur eine Woche im Voraus an die jeweiligen Gegebenheiten hinsichtlich Auftragslage und Bestandsabbau angepasst. Dieser Umstand kann ohne unverhältnismäßigen Programmieraufwand nicht realitätsgetreu simuliert werden, weswegen hier bei manchen Mitarbeitern in der Simulation eine Vereinfachung der Realität implementiert wird. Generell ist bezüglich dieser Flexibilitäts-Problematik zwischen drei Gruppen zu unterscheiden:

- Der Mitarbeiter verfügt über ein fixes Schichtmodell. Dadurch wird ein ebenfalls fixes Schichtmodell der Einzelstation sichergestellt (z.B.: STR/GU, MRRM5, Kantstahlprüfung).
- Der Mitarbeiter verfügt über ein sehr regelmäßiges Schichtmodell. Durch Analyse der Streudiagramme zeigt sich beispielsweise, dass ein Mitarbeiter den überwiegenden Anteil seiner Arbeitszeit in der Frühschicht verbringt.
- Der Mitarbeiter arbeitet sehr flexibel und es lässt sich in der Simulation nur eine Annäherung an das Realverhalten abbilden.

Da es aus diesen Gründen nur bedingt möglich ist, jeden Mitarbeiter eins zu eins in die Simulation einzubauen, werden fiktive Mitarbeiter erstellt, die zwar auf realen Mitarbeitern basieren, aber nur bedingt Rückschlüsse über deren tatsächliche Arbeitsleistung zulassen.

Zur Bedienung einer Einzelstation ist für den Mitarbeiter eine dementsprechende Qualifikation von Nöten. Böhler Edelstahl investiert dabei stark in dementsprechende Weiterbildungsmaßnahmen und versucht die Mitarbeiter durch ein lukratives Prämiensystem zum Erlangen neuer Qualifikationen zu motivieren. Durch den Umstand, dass bei jeder AGV-Anmeldung am Maschinen-Terminal die Personalnummer mit aufgezeichnet wird, lassen sich Aussagen ableiten, welcher Mitarbeiter an welchen Einzelstationen aktiv war. Diese Daten werden in eine Qualifikationsmatrix übertragen, die wiederum einen wichtigen Input-Parameter für das Simulationsmodell darstellt. Schematisch wird diese Matrix in Abbildung 3-27 dargestellt. Die Qualifikationsmatrix beinhaltet dabei Kennzahlen, die sich aus folgenden zwei Punkten zusammensetzt:

- Welchen prozentuellen Anteil seiner insgesamt erledigten Aufträge hat der Mitarbeiter an dieser Einzelstation bearbeitet?
- Welchen prozentuellen Anteil der an dieser Einzelstation erledigten Aufträge hat der Mitarbeiter bearbeitet?

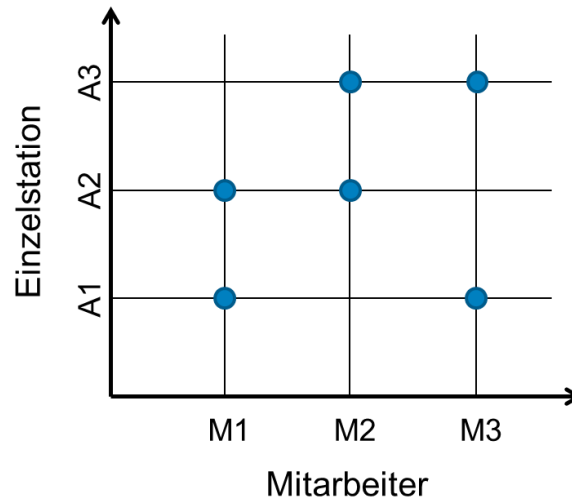


Abbildung 3-27: Schematische Qualifikationsmatrix als Simulations-Input

Schlussendlich wird in Ausblick auf ein auszuarbeitendes Optimierungskonzept für jede leistungsrelevante Einzelstation ein Profil für deren technischen Bearbeitungsgrenzen erstellt. Dies betrifft die drei Auftragsattribute Stärke, Breite und Querschnitt. Eine Bearbeitung ist demnach für jedes Produkt möglich, dessen jeweiliges Auftragsattribut innerhalb der vorliegenden Grenzen liegt.

Layout

Die Halle besteht aus zwei Hallenschiffen (Hallenschiff „A“ (in Abbildung 3-28 links) und „B“), die die oben vorgestellten Einzelstationen beinhalten. Jedes Hallenschiff verfügt über zwei Tore, wobei generell durch jedes Tor das Material in das System ein- bzw. austreten kann. Dieser Transport über die Systemgrenzen wird mittels Anhängern realisiert, die mehrmals täglich angeliefert werden bzw. abgeholt werden. Der Großteil der Aufträge wird jedoch durch die Tore 1 und 2 angeliefert und verlässt die Halle durch die Tore 4 und 5. Der Transport innerhalb der Halle wird durch jeweils drei Brückenkräne pro Hallenschiff realisiert. Wenn der Auftrag das Hallenschiff aufgrund seines Arbeitsplanes wechseln muss, geschieht dies mittels einem der beiden Querverschiebe-Wägen.

Die mit „R“ gekennzeichneten Bereiche stellen die in der Halle stationierten Rampen dar, in denen das Material vor der jeweils nächsten Einzelstation zwischengelagert wird und beinhalten somit den physischen Arbeitsvorrat. Die Einzelstationen werden in der Abbildung bezüglich ihrer PAL-Zuordnung (PAL11 bis PAL14) eingefärbt. Auch wenn Aufträge des Öfteren Einzelstationen unterschiedlicher PAL-Zuordnungen durchlaufen, so ist trotzdem auch ersichtlich, dass die jeweils zugehörigen PAL-Einzelstationen oft nicht nebeneinander angebracht sind und somit zeitaufwändige Hallenschiff-Wechsel nicht umgangen werden können. Darauf wird im nächsten Punkt detaillierter eingegangen.

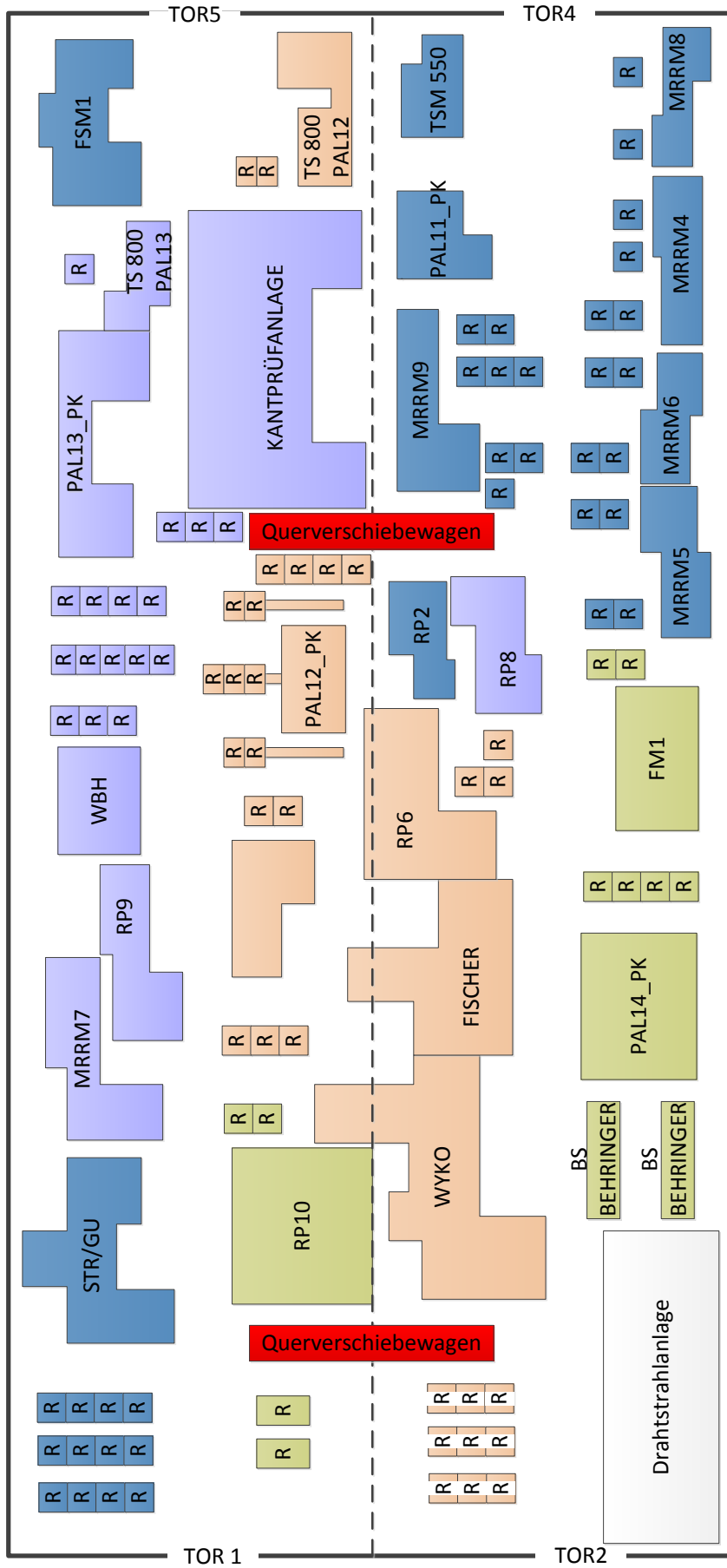


Abbildung 3-28: Layout Halle 8

Materialfluss

Der in Abbildung 1-2 ersichtliche prinzipielle Prozessablauf wird durch die jeweiligen Grundarbeitspläne der Aufträge konkretisiert. Diese Grundarbeitspläne sind Bestandteil der sogenannten „betrieblichen Laufkarte“ – welche weitere Informationen wie Prüfpläne und Produktdetails enthält – und liegen den Produkten als Ausdruck bei. Die betrieblichen Laufkarten werden mit dem Produkt von Station zu Station weitergereicht. Die Grundarbeitspläne werden ursprünglich in der Abteilung Produktionsplanung erstellt und sind auf die spezifischen Kundenwünsche zugeschnitten. Bei der Erstellung wird jedoch nicht jede Einzelstation für sich betrachtet, sondern manche Einzelstationen in Gruppen zusammengefasst (Beispiel: MRRM5 u. MRRM6 werden als eine Gruppe verplant). Die Soll-Termine der Arbeitspläne werden nun durch Ausschöpfen der Kapazitätsdeckel dieser Gruppen bestimmt. Ergebnis der Produktionsplanung ist schlussendlich die betriebliche Laufkarte inklusive Grundarbeitsplan und Prüfplan.

Ein wichtiges Teilziel dieser Masterarbeit ist es, die geplanten Materialflüsse der Grundarbeitspläne zu visualisieren und diese anschließend mit den tatsächlich auftretenden Materialflüssen zu vergleichen. Um einen ersten Überblick über die möglichen Materialflüsse zu bekommen, werden zuerst Mitarbeiter-Interviews geführt. Es zeigt sich, dass zahlreiche unterschiedliche Materialflüsse in der Halle auftreten können. Das Ergebnis der Mitarbeiter-Befragungen ist im Anhang ersichtlich und nach PAL-Zuordnung zusammengefasst.

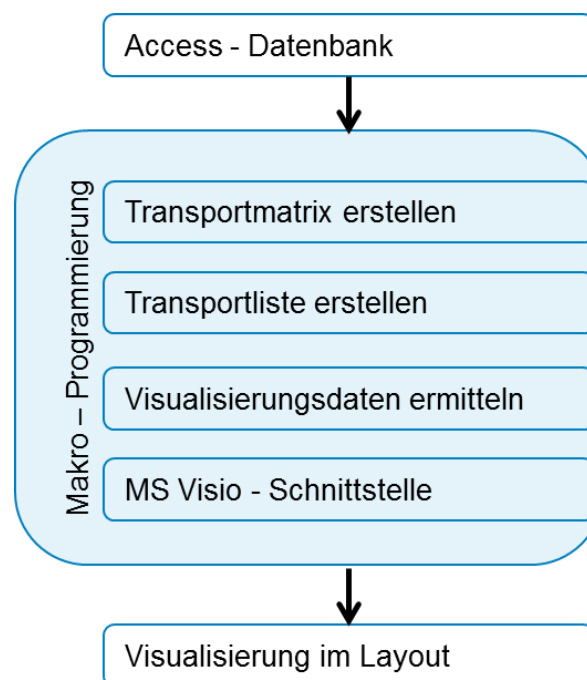


Abbildung 3-29: Vorgehensweise der Materialfluss-Visualisierung

Die Aufarbeitung der Grundarbeitspläne erfolgt in Microsoft Access. Dabei wird der Arbeitsplan für jeden Auftrag (definiert über Fertigungsauftrags-, Los-, und Splitnummer) mit Beginn 2013 bis April 2014 definiert und auch die Bearbeitungsschritte in Halle 6 werden berücksichtigt. Diese Arbeitspläne werden in Microsoft Excel mittels Makroprogrammierung zuerst in Transportmatrix-Form gebracht und anschließend in Transportlisten

umgewandelt. Unter Zuhilfenahme eines am Institut für Technische Logistik entstandenen Tools können die Transportlisten in Sankey-Diagramme umgewandelt werden.

Das Tool berechnet aufgrund der Transportintensitäten zwischen den Einzelstationen die zutreffenden Visualisierungsdaten, die über eine Datenschnittstelle an Microsoft Visio weitergegeben werden. In Microsoft Visio werden die so entstandenen Materialflussvisualisierungen schlussendlich noch an das vorhandene Hallenlayout angepasst. Das Ergebnis ist ein Sankey-Diagramm, welches durch die kompakte Darstellung zahlreicher Transportdaten einen umfassenden Einblick in die Materialfluss-Gestaltung des Systems erlaubt. Dieses Sankey-Diagramm ist in Abbildung 3-30 dargestellt. Für eine hochauflösende Darstellung sei auf den digitalen Anhang für Böhler Edelstahl verwiesen. Ein detaillierter Ablaufplan der Sankey-Diagramm-Erstellung ist im Anhang der Masterarbeit zu finden.

Bei näherer Betrachtung der Grafik fallen bereits einige Eigenheiten auf:

1. Hohes Materialflussaufkommen in Halle 6. Dieser Eindruck wird jedoch auch durch die Gruppenbildung der Einzelstationen dieser Halle verstärkt. Die Gruppenbildung der Halle 6–Einzelstationen ist ebenfalls im Anhang abgebildet.
2. Große Transportanzahl über die Querverschiebewägen zwischen den Hallenschiffen A und B. Verantwortlich hierfür sind vor allem ausgehende Transporte der Sandstrahlanlage STR/GU und der Richtpressen RP10 und RP6.
3. Es gibt eine Vielzahl kleiner Materialflüsse in Hallenschiff B, die fast ausschließlich die gleiche Laufrichtung aufweisen.
4. Es gibt sowohl eine Vielzahl von möglichen Einzelstationen vor dem Eintritt in das System Halle 8, als auch eine Vielzahl von möglichen letzten Einzelstationen im System Halle 8.

Zu betonen ist, dass Abbildung 3-30 die geplanten Materialflüsse der Grundarbeitspläne zeigt, nicht jedoch die tatsächlich aufgetretenen historischen Flüsse. Wie bereits erwähnt scheinen in diesen Grundarbeitsplänen nämlich nicht alle vorhandenen Einzelstationen auf. Für die Simulation sollen jedoch Arbeitspläne zur Verfügung stehen, die die tatsächlich auftretenden Materialflüsse widerspiegeln. Um dies zu erreichen werden zwei verschiedene Datenbanken miteinander kombiniert:

- Datenbank der aufgezeichneten Zeitdaten der Bearbeitungsstationen (Leistungsdaten)
- Datenbank der Grundarbeitspläne

Die aufgearbeiteten Arbeitspläne setzen sich folglich aus drei Teilen zusammen:

- Datensätze, die ausschließlich in den Grundarbeitsplänen aufscheinen. Dies betrifft alle nicht leistungsrelevanten Einzelstationen, sowie Einzelstationen der Halle 6.
- Datensätze, die ausschließlich in den Aufzeichnungen der Leistungsdaten aufscheinen. Dies betrifft all jene Einzelstationen, an denen der Auftrag am Maschinenterminal angemeldet wurde. Es kann somit ermittelt werden, wann welcher Auftrag an welcher Einzelstation bearbeitet

wurde. Da diese Datensätze nur in den Leistungsdaten aufscheinen, nicht aber in den Grundarbeitsplänen, kann geschlussfolgert werden, dass es sich um jene Einzelstationen handeln muss, die in den Grundarbeitsplänen nicht detailliert vorgesehen waren.

- Datensätze, die in beiden Datenbanken aufscheinen und miteinander übereinstimmen. Dies sind jene Einzelstationen, die auch im Grundarbeitsplan vorgesehen waren. Dadurch lässt sich außerdem ein im Grundarbeitsplan vorgesehener Solltermin mit dem aufgezeichneten Bearbeitungstermin der Leistungsdaten anstellen.

Durch eine „SQL – Unify“ Abfrage werden diese drei Bereiche miteinander gekoppelt was die für die Simulation aufbereiteten Arbeitspläne der Aufträge ergibt.

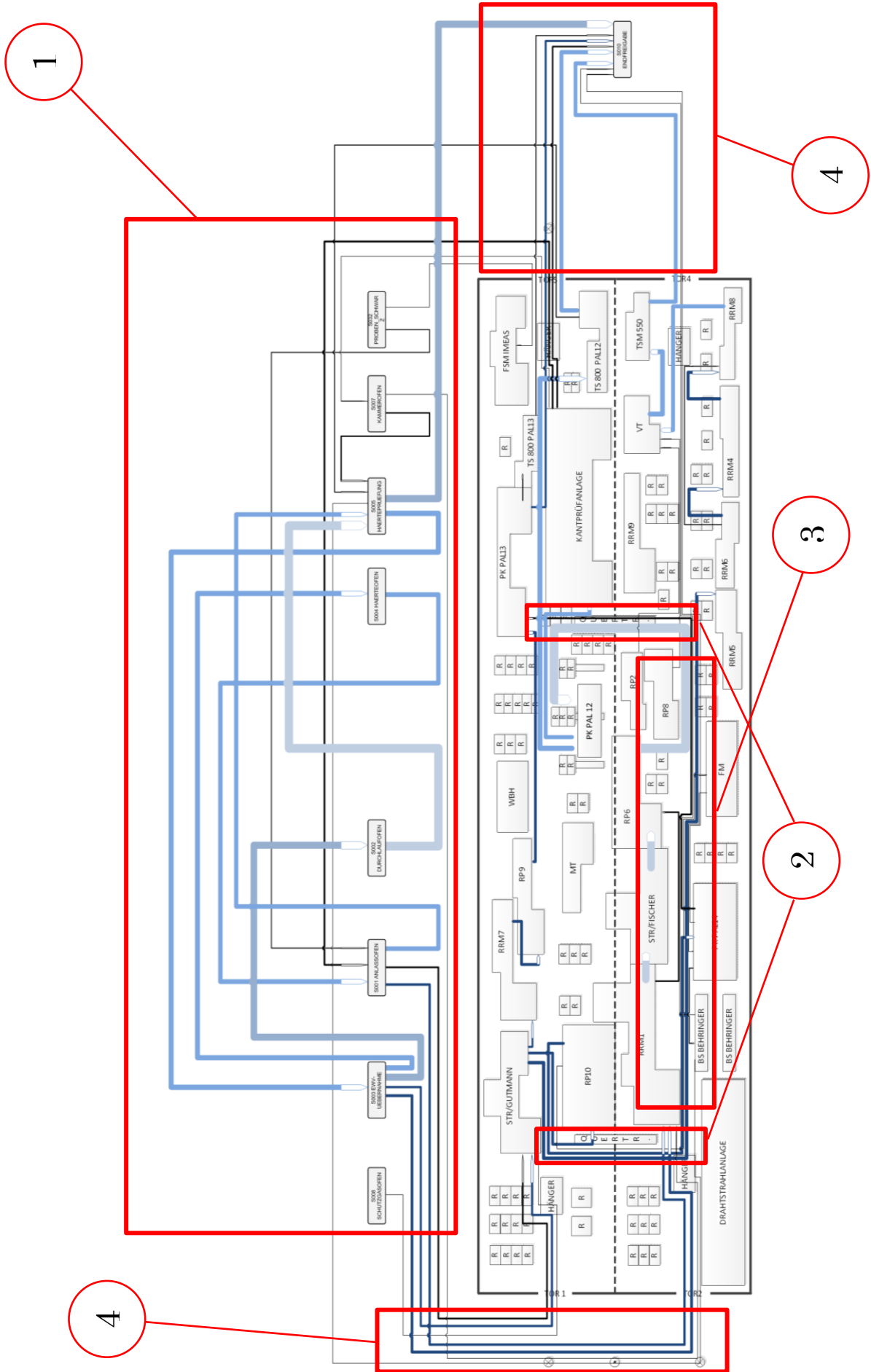


Abbildung 3-30: Sankey-Diagramm der geplanten Materialflüsse

3.2 Schwachstellenanalyse und Optimierungsansätze

Das Erstellen einer Schwachstellenanalyse und das darauf folgende Ableiten von Optimierungsmaßnahmen stellt die zweite Projektphase der vorliegenden Masterarbeit dar. In dieser Phase werden jene Optimierungsvarianten entwickelt, deren Verbesserungspotential in der dritten Projektphase durch Simulationsstudien quantifiziert werden sollen.

Die Vorgehensweise ist dabei in Abbildung 3-31 überblicksmäßig zusammengefasst. Durch Interviews mit Mitarbeitern verschiedener Unternehmensbereiche werden zuerst subjektive Systemschwachstellen ausfindig gemacht und in Stichworten zusammengefasst. Weiters wird auch darüber diskutiert, welche Verbesserungsansätze man in der Simulationsstudie untersucht haben möchte und welche Zielgrößen zur Bewertung im Vordergrund stehen sollten.

Dieser Input seitens Böhler Edelstahl stellt die Ausgangslage der Optimierungsvarianten-Entwicklung dar. Bei der Bildung dieser Optimierungsvarianten muss jedoch ein Konsens mit den Rahmenbedingungen des Simulation-Modells und dessen Abbildungsgenauigkeit gefunden werden. Um aussagekräftige Ergebnisse der Simulation zu ermöglichen, ist es wichtig darüber nachzudenken, welchen Detaillierungsgrad des Systems man abzubilden versucht und ob die Simulationsexperimente auch demselben Detaillierungsniveau zuzuschreiben sind. Das Simulations-Modell verfügt also gewissermaßen über einen einschränkenden Charakter in Bezug auf die gewünschten Optimierungsuntersuchungen.

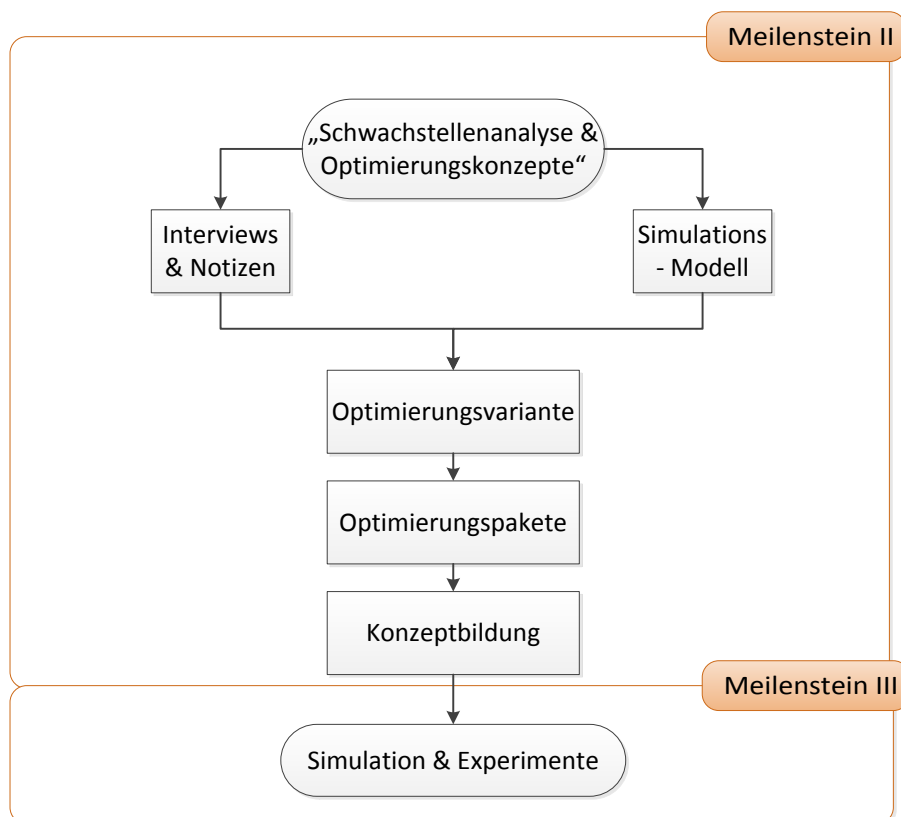


Abbildung 3-31: Vorgehensweise der zweiten Projektphase

Auf Basis der ausfindig gemachten Systemschwachstellen werden dann in Absprache mit Böhler Edelstahl unterschiedliche Optimierungsvarianten entwickelt. Diese Varianten können jeweils einer spezifischen Grund-Thematik zugeordnet werden, weswegen sie auch in Optimierungs-Paketen zusammengefasst werden. Im Zuge der Optimierungskonzeptbildung wird jeweils eine Variante eines jeden Pakets ausgewählt. Diese ausgewählten Varianten bilden gemeinsam (Variantenkombination) ein zu simulierendes Optimierungskonzept. Im Folgenden wird auf die genaue Durchführung der angesprochenen Punkte noch einmal näher eingegangen.

3.2.1 Interviews hinsichtlich Anlagenschwachstellen

Die Interviews bezüglich der Systemschwächen werden mit Mitarbeitern unterschiedlicher Unternehmensbereiche durchgeführt und haben somit jeweils einen anderen Fokus. In allen Interviews werden in einem ersten Schritt alle Stichworte notiert und den jeweiligen Systembereichen zugeordnet (Abbildung 3-32).

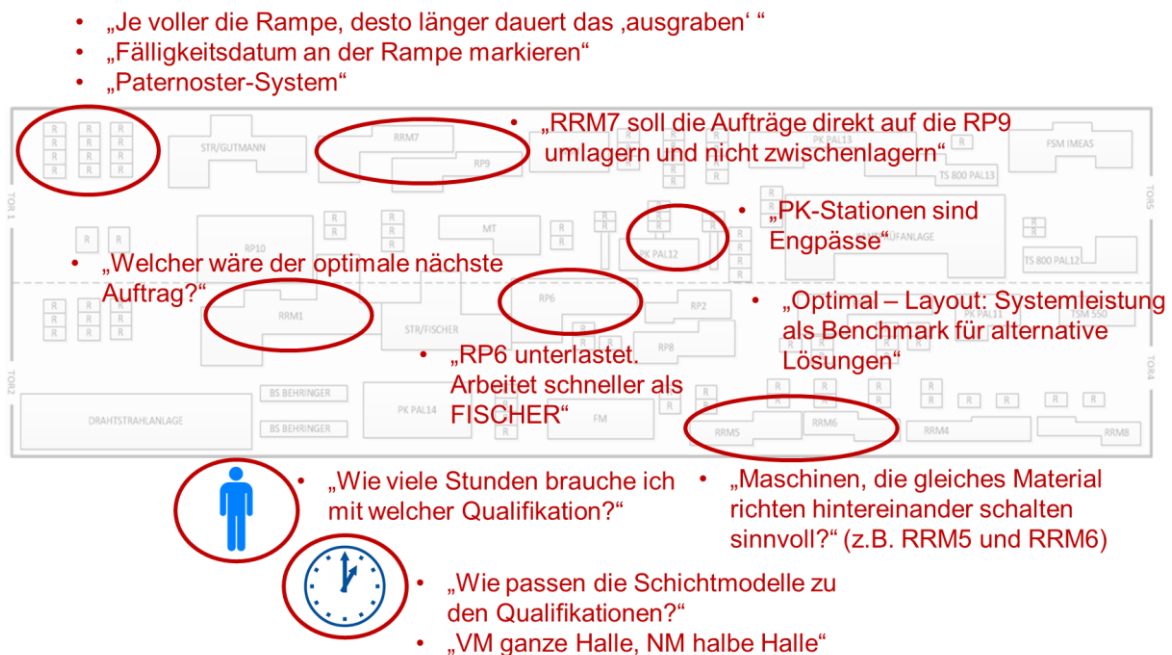


Abbildung 3-32: Stichworte und Notizen zu Systemschwachstellen

Diese Notizen werden nun aufgrund ihrer Eigenschaften in drei grundlegende Bereiche gegliedert:

- Organisationsbezogene Schwachstellen sind jene Schwachstellen, die auf ungünstige Strategien und Steuerungskonzepte zurückzuführen sind.
- Strukturbezogene Schwachstellen gruppieren Problemstellungen, denen eine nicht optimierte Layoutgestaltung zugrunde liegt und
- ressourcenbezogene Schwachstellen sind auf ungenügende menschliche oder technische Ressourcen zurückzuführen.

Der Strukturierung der Stichworte in diese drei Bereiche folgt die Ausarbeitung allgemeiner Schwachstellen-Statements. Dabei werden Stichworte, die eine grundsätzlich ähnliche Aussage treffen, zu klaren und problemspezifisch-definierten Statements zusammengefasst. Dies dient zu einer Reduktion der

Problembereiche auf ein Wesentliches und hilft somit, einen strukturierten Optimierungskonzept-Aufbau zu entwerfen. Das Ergebnis dieser Gliederung und Statement-Bildung ist in Abbildung 3-33 dargestellt.

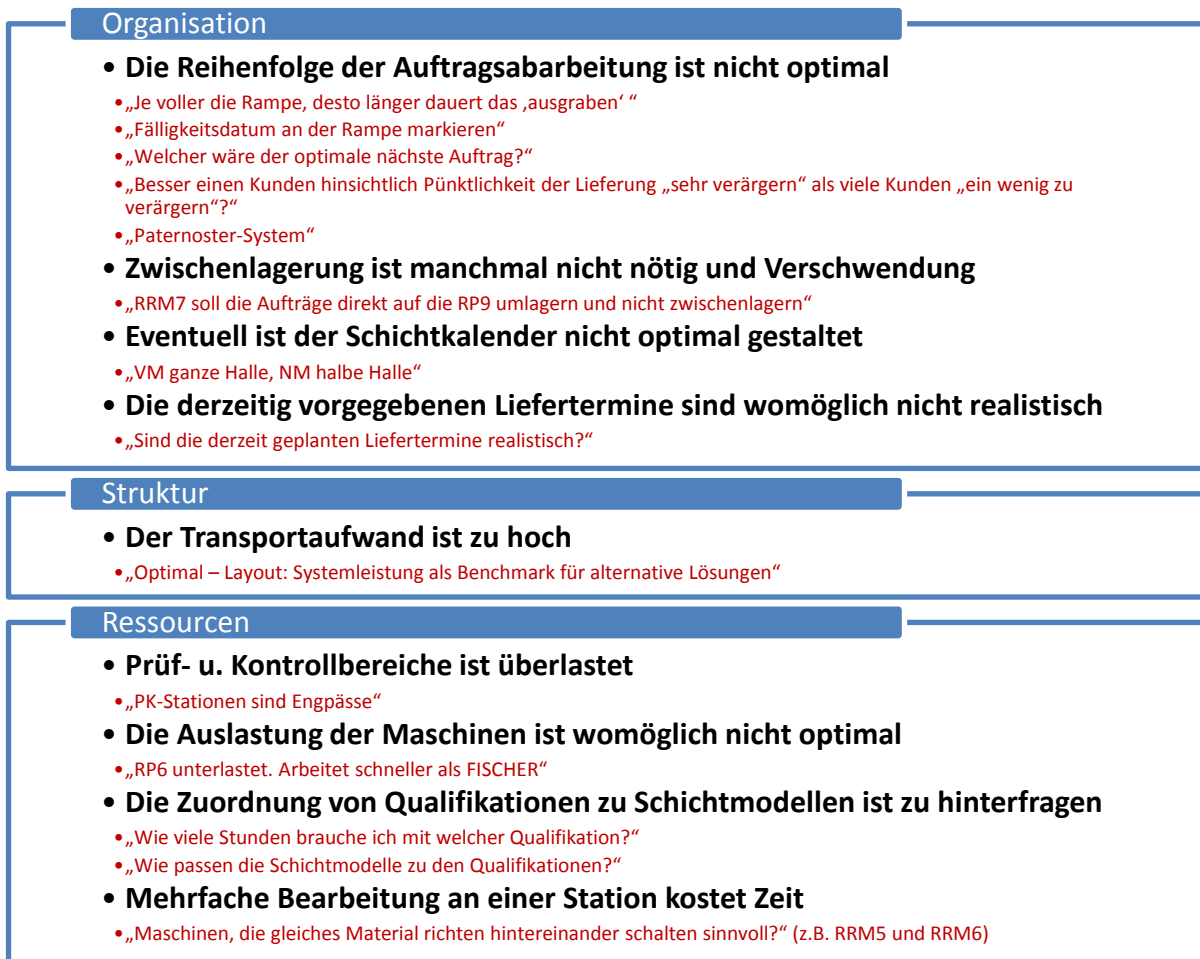


Abbildung 3-33: Gliederung der Stichworte und Statement-Bildung

3.2.2 Entwicklung von Optimierungsansätzen

Bei der Entwicklung der Optimierungskonzepte geht es nun darum, Ansätze zu erarbeiten, die die oben genannten Schwachstellen positiv beeinflussen können. Wie bereits erwähnt, weist das Simulationsmodell bei dieser Konzept-Ausarbeitung einen regulativen Charakter auf, da nicht jede genannte Schwachstelle mit dem Simulationsmodell analysiert werden kann. Die Betrachtungsniveaus von Simulationsmodell und Schwachstelle müssen sich in einem ähnlichen Niveau befinden, um sinnvolle Schlüsse aus den Experimenten ziehen zu können. So ist es etwa nicht sinnvoll, Detailfragen klären zu versuchen, die in keiner Weise mit dem Abstraktionsgrad eines gesamten Produktionssystems in Einklang zu bringen sind.

In Bezug auf das vorliegende Projekt, dessen vorrangiges Ziel die Verbesserung der Liefertreue ist, werden basierend auf den ausgearbeiteten Schwachstellen drei Optimierungskonzept-Pakete geschnürt, die diesen Zielwert positiv beeinflussen sollen:

- Paket „Lagerführung“
- Paket „Durchlauflogik“
- Paket „Schichtmodelle & Qualifikationen“

Diese Pakete sprechen jeweils unterschiedliche Systembereiche an und wirken somit an verschiedenen Stellen. Jedes der drei Pakete besteht wiederum aus drei Optimierungsvarianten, die in der Simulation auf ihre Wirksamkeit überprüft werden sollen. Die Varianten des Lagerführungs-Paketes geben die Logik der Auftragsabarbeitung vor, d.h. sie unterscheiden sich in der Auswahl des nächsten Auftrages und definieren sich somit über differenzierte Auftragsreihenfolgen an den Einzelstationen. Die Varianten der Durchlauflogik hingegen beschäftigen sich mit dem Materialfluss der Aufträge durch das Produktionssystem. Das Paket Schichtmodelle & Qualifikationen beinhaltet Varianten zur optimierten Nutzung personeller Ressourcen. Diese Varianten können ihren Ansatz im Bereich der Schichtmodell Anpassung oder aber im Bereich des Qualifikationsausbaus haben. Abbildung 3-34 zeigt die ausgearbeiteten Optimierungskonzept-Pakete mit ihren dazugehörigen Optimierungsvarianten.

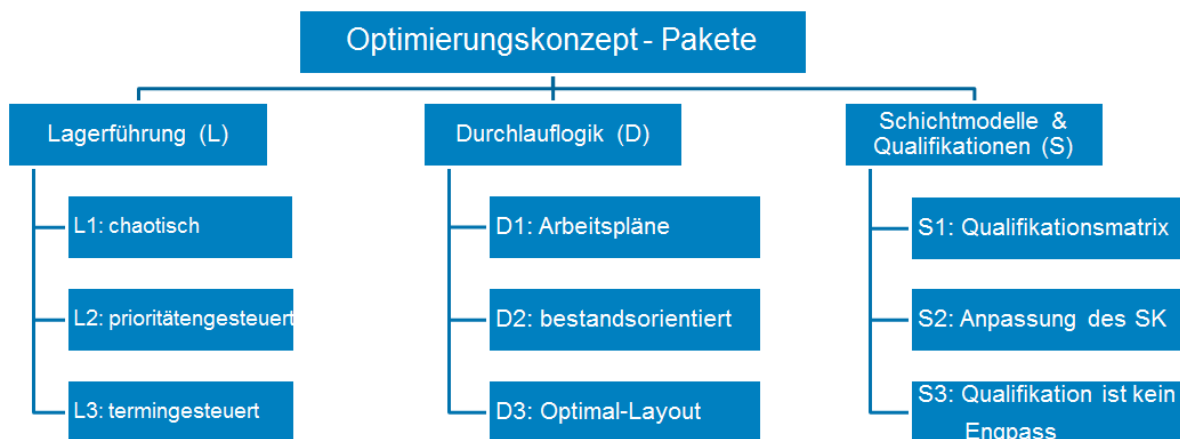


Abbildung 3-34: Optimierungskonzept-Pakete und ihre zugehörigen Optimierungsvarianten

Im Folgenden sollen die einzelnen Varianten detaillierter vorgestellt werden.

3.2.2.1 Lagerführung (L)

Die Varianten des Lagerführungs-Paketes bestimmen die Reihenfolge der Auftragsabarbeitung. Da für jeden Auftrag an jeder Maschine ein Solltermin der Bearbeitung vorgesehen ist, können unterschiedliche Lagerungskonzepte bzw. Abarbeitungskonzepte entwickelt und auf ihre Wirksamkeit hin überprüft werden. Es wird erwartet, dass sich die Konzepte direkt auf die Liefertreue-Statistik auswirken.

Chaotische Ein- & Auslagerung (L1)

Die erste Variante des Paketes stellt das Worst-Case-Szenario dar und ist aufgrund der iterativen Annäherung an ein „optimales System“ ein unverzichtbarer Teil der Simulationsserie. Die Variante L1 soll folgenden Sachverhalt darstellen:

Nach der Bearbeitung an einer Einzelstation soll der Auftrag gemäß Arbeitsplan an die nachfolgende Einzelstation weitergegeben werden. Der Auftrag (die Flachstähle) wird jedoch ohne Rücksicht auf etwaige Liefertermine in eine zufällige Rampe eingelagert. Die Auslagerung (die Auswahl des nächsten Auftrags) erfolgt an der neuen Einzelstation ebenfalls zufällig und berücksichtigt somit keinerlei Prioritätsregelung.

In Kapitel 3.1.3.2 wurden bereits die Problemstellungen bei der Auftragswahl durch den Mitarbeiter aufgelistet. Da die Aufträge aufgrund des prinzipiellen FILO-Prinzips der Rampenlagerung nicht immer nach Prioritätenregelung abgearbeitet werden, soll durch die Simulation der L1-Variante abgeschätzt werden, wie hoch der Anteil dieses Worst-Case-Szenarios tatsächlich ist. Abbildung 3-35 zeigt das Prinzip der chaotischen Ein- & Auslagerung.

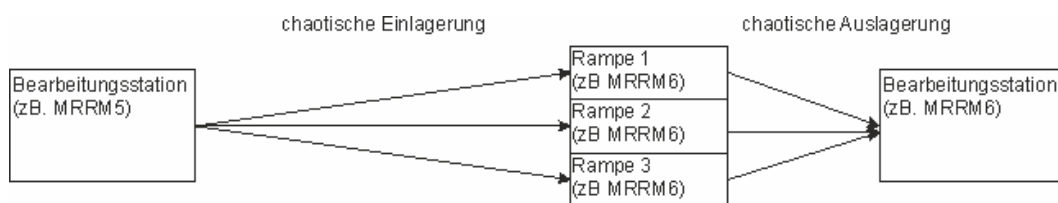


Abbildung 3-35: Prinzip der chaotischen Ein- & Auslagerung

Prioritätengesteuerte Auftragsabarbeitung (L2)

Die Variante L2 stellt prinzipiell den Soll-Prozess der Auftragsabarbeitung im Produktionssystem Halle 8 dar. Den Aufträgen im Arbeitsvorrat wird dabei jeweils eine Priorität von 1 bis 3 zugewiesen:

- Priorität 3: Der Soll-Termin des Auftrages für die derzeitige Einzelstation liegt noch in der Zukunft, d.h. er ist laut Arbeitsplan frühestens am nächsten Tag zu bearbeiten.
- Priorität 2: Der Auftrag ist laut Arbeitsplan am aktuellen Arbeitstag zu bearbeiten.
- Priorität 1: Der Soll-Termin der Bearbeitung liegt bereits in der Vergangenheit. Er ist somit um mindestens einen Tag überfällig.

Wenn ein Auftrag nun an einer Einzelstation fertig bearbeitet wurde, gelangt er in den Arbeitsvorrat der nächsten Einzelstation. Die Aufträge der Priorität 2 werden täglich um Mitternacht zu Priorität 1 – Aufträgen umgewandelt und reihen sich somit am Ende der Priorität 1 – Warteschlange (FIFO-Prinzip) ein. Jene Aufträge, die bei ihrer Ankunft an der Einzelstation die Priorität 3 zugewiesen bekommen, bleiben in dieser Priorität und werden ebenfalls nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet. Dadurch soll ein einfacher zu realisierendes Realsystem dargestellt werden. Das Prinzip ist in Abbildung 3-36 ersichtlich.

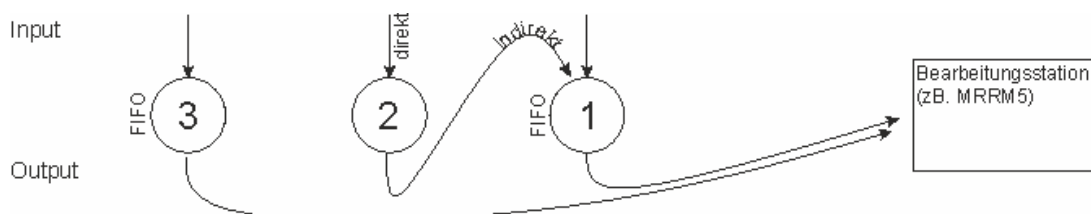


Abbildung 3-36: Prinzip der prioritätengesteuerten Lagerführung

Die Aufträge werden nun entsprechend ihrer Priorität abgearbeitet, d.h. dass zuerst alle Priorität 1 – Aufträge erledigt werden, dann alle mit Priorität 2 und schlussendlich jene mit Priorität 3.

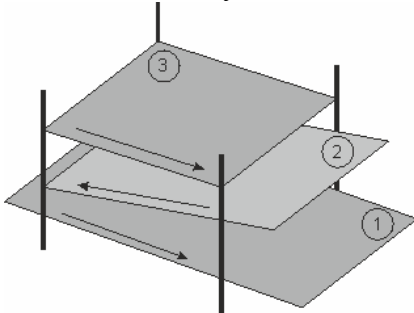


Abbildung 3-37: Lösungskonzept für Variante L2

Innerhalb der Prioritäten geschieht jedoch keine Anpassung der Reihenfolgen, für Priorität 1 bzw. Priorität 3 gilt daher – wie bereits angeführt – jeweils das FIFO Prinzip. Ein prinzipielles Lösungskonzept für dieses Variante zeigt Abbildung 3-37. Diese Anordnung würde eine FIFO-Abarbeitung erlauben und das „Ausgraben der Aufträge“ weitestgehend vermeidbar machen.

Termingesteuerte Auftragsabarbeitung (L3)

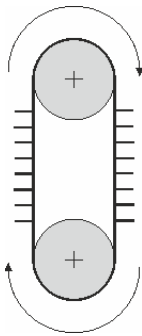


Abbildung 3-38: Prinzip der termingesteuerten Auftragsabarbeitung

Diese Optimierungsvariante stellt den Optimalfall der Lagerführung dar. Das Prinzip der termingesteuerten Auftragsabarbeitung stellt sicher, dass zu jeder Zeit jeder mögliche Auftrag ohne Zeitverzögerung („Ausgraben“) zur Bearbeitung ausgewählt werden kann. In der Realität lässt sich dies durch ein Paternoster-System oder Hochregallager darstellen. Die Aufträge werden daher nach den im Arbeitsplan festgelegten Soll-Terminen abgearbeitet. Auch wenn dieses Optimalkonzept vielversprechen zu sein scheint, wäre die Realisierung mit beträchtlichen Investitionen seitens Böhler Edelstahl verbunden.

3.2.2.2 Durchlauflogik (D)

Die Varianten der Durchlauflogik steuern den Materialfluss im Produktionssystem.

Arbeitspläne (D1)

Die Variante D1 bildet den historischen Materialfluss von Jänner 2013 bis inklusive April 2014 ab. Jeder Auftrag im Simulationsmodell verfügt über einen aufgearbeiteten Arbeitsplan, der darüber Aufschluss gibt, an welchen Einzelstationen der Auftrag bearbeitet bzw. geprüft wird. Weiters ist der dazugehörige Soll-Termin vermerkt. Dies erlaubt später einer Analyse über das Terminverhalten der Einzelstationen. Die Aufarbeitung der Arbeitspläne aus zwei unterschiedlichen Datenbanken wurde bereits im Kapitel 3.1.3.2 unter dem Punkt „Materialfluss“ erläutert.

Bestandsorientierter Materialfluss (D2)

Diese Optimierungsvariante beruht auf dem Konzept, die Bestände der Einzelstationen gleichmäßiger zu verteilen. Dies soll durch ein bestandspriorisiertes Routing der Aufträge ermöglicht werden. Wenn

beispielsweise ein Auftrag aufgrund seiner Dimensionen (Höhe, Breite, Querschnitt) zur Erfüllung seines Bearbeitungsschrittes an zwei (oder mehreren) unterschiedlichen Maschinen A und B bearbeitet werden kann, so wird der Auftrag zu jener Maschine geleitet, an der die Bestände (Arbeitsvorrat in Tonnen) geringer sind. Dieser bestandsorientierte Materialfluss basiert ebenfalls auf den in D1 verwendeten Arbeitsplänen, ist jedoch unabhängig davon, ob der Arbeitsplan nun Maschine A oder Maschine B vorsieht. Dieses bestandsoptimierte Routing wird für die beiden Gruppen „Richtpressen“ und „Rollenrichten“ implementiert.

Optimal-Layout (D3)

Die Bildung eines optimalen Systemlayouts stellt das Grüne-Wiese-Konzept dar. Es soll ermittelt werden, wie die Einzelstationen in der Halle angeordnet werden müssten um den Transportaufwand im System auf ein Minimum zu reduzieren. Es wird eine Verringerung der Durchlaufzeiten erwartet. Das Grüne-Wiese-Layout wird durch Anwendung des Dreiecksverfahrens nach Schmigalla aufgebaut. Die aufgearbeiteten Arbeitspläne aus D1 geben auch in der Variante D3 den Materialfluss vor.

3.2.2.3 Schichtmodelle & Qualifikationen (S)

Die Varianten dieses Paketes sollen die Optimierungspotentiale im Bereich personeller Ressourcen abschätzbar machen. Dabei sollen prinzipiell zwei unterschiedliche Ansätze untersucht werden: die Erhöhung der verfügbaren Kapazitäten entweder durch Schichtplananpassungen oder durch eine erweiterte Qualifizierung der Mitarbeiter.

Qualifikationsmatrix (S1)

In der zweiten Projektphase („Ist-Analyse“) wurden neben der Schichtkalenderzuteilung auch eine Qualifikationsmatrix der Mitarbeiter ausgearbeitet. Diese Qualifikationsmatrix stellt den Zusammenhang zwischen Mitarbeiter (Personalnummer) und die durch ihn betreuten Einzelstationen dar (siehe Abbildung 3-27). Die Ausarbeitung der Schichtkalender beruht auf den Meldungs-Zeitpunkten der Mitarbeiter an den Maschinenterminals. Die Variante S1 stellt somit in einer abstrahierten Form den Ist-Zustand im Zeitraum Jänner 2013 bis inkl. April 2014 dar.

Anpassung des Schichtkalenders (S2)

Durch die Anpassung der Mitarbeiter-Schichtkalender wird versucht, die personellen Ressourcen effizienter einzusetzen. Dabei verfügt jeder Mitarbeiter über jene Qualifikationen, die in der Ist-Analyse ausgearbeitet wurden und auch in Variante S1 Verwendung finden. Durch eine verbesserte Schichtkalenderzuteilung soll jedoch ein gegenseitiges Ausschalten von Qualifikationskapazitäten vermieden werden. Dieses Prinzip soll anhand von Abbildung 3-39 erläutert werden: Als Basis des Problems stellt man sich ein dreidimensionales Koordinatensystem mit den Achsen Mitarbeiter, Schicht und Aggregat vor. In diesem einfachen Beispiel sollen lediglich zwei Mitarbeiter (M1 und M2) und drei zu bedienende Aggregate (A1, A2, A3) betrachtet werden. Die beiden Mitarbeiter werden nun einer Schicht zugewiesen (Frühschicht F, Mittagsschicht M, Nachtschicht N). Auf der linken Seite der Abbildung werden

beide Mitarbeiter M1 und M2 der Frühschicht F zugewiesen, rechts erfolgt eine unterschiedliche Schicht-Zuteilung: M1 arbeitet in der Frühschicht, M2 in der Mittagsschicht. Über die Qualifikationsmatrix, die auch in Variante S1 Verwendung findet, wird der Zusammenhang zum „Aggregate-Schichtkalender“ hergestellt. Dieser Schichtkalender gibt Auskunft darüber, zu welchen Zeiten eine Bearbeitung an welcher Maschine prinzipiell möglich ist. Im linken Szenario der Abbildung ist ersichtlich, dass lediglich drei Aggregate bedient werden können, wogegen im rechten Szenario die Bearbeitung an vier Aggregaten ermöglicht wird. Dieser Zusammenhang wird ungleich komplizierter, je mehr Mitarbeiter und Maschinen betrachtet werden!

Die Idee dieser Optimierungsvariante ist es, über den Mitarbeiter-Schichtkalender die maximal mögliche Aggregate-Bedienbarkeit zu gewährleisten. Dadurch ergeben sich folgende Rollen für die einzelnen Matrizen:

- Mitarbeiter-Schichtkalender: veränderlicher Stellparameter der Optimierung
- Qualifikationsmatrix: gegeben und unveränderlich; stellt den Zusammenhang her
- Aggregate-Schichtkalender: Zielfunktion ist die Maximierung der Einträge

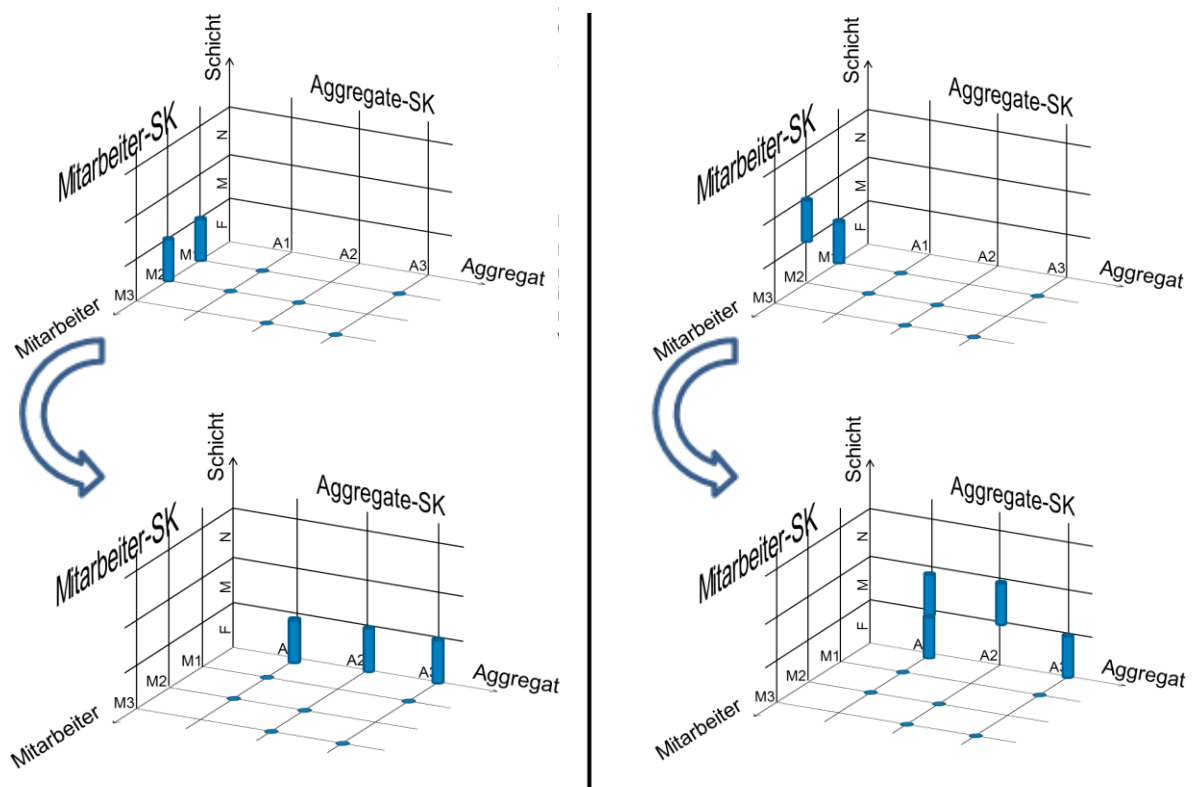


Abbildung 3-39: Gegenseitige Begrenzung personeller Ressourcen (rechts: optimiert)

Eliminierung des Qualifikations-Engpasses (S3)

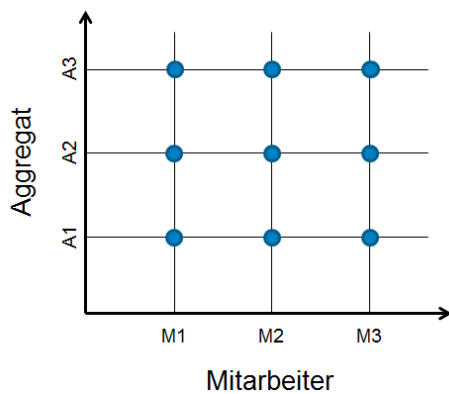


Abbildung 3-40: Vollständige Qualifikationsmatrix als Optimum; Schema

Wie auch bei den beiden anderen Paketen handelt es sich auch hier bei der dritten Variante um das Optimal-Konzept. Das Grundprinzip stellt eine Eliminierung der Qualifikationsmatrix als Engpasselement dar, d.h. jeder Mitarbeiter kann prinzipiell an jeder Einzelstation Aufträge bearbeiten. Dies entspricht einer vollständig ausgefüllten Qualifikationsmatrix (Abbildung 3-40). Als Mitarbeiter-Schichtkalender wird der in der „Ist-Analyse“ ausgearbeitete Schichtkalender eingesetzt. Bei dieser Variante soll das maximal mögliche Optimierungspotential durch zusätzliche Mitarbeiterqualifikationen untersucht werden.

Auch wenn es sich um ein kaum realisierbares Konzept handelt, so können dennoch die „stillen Reserven“ bereits vorhandener personeller Ressourcen quantifizierbar gemacht werden. Eine Investition in diesem Bereich könnte im Gegensatz zu neuen Lagerkonzepten kontinuierlicher und weniger risikoreich erfolgen.

3.3 Simulation

Nach Abwägung der in Kapitel 2.2.5.2 aufgelisteten Vor- und Nachteile der Simulationsmethode für das vorliegende Projekt und dessen Zielsetzung und nach Bewertung der vorhandenen Datenlage hinsichtlich Art, Menge und Qualität wird die Entscheidung der Analysemethode zugunsten einer Materialfluss-Simulation getroffen. Dies stellt somit die dritte Phase des Masterarbeitsprojektes dar. Als Simulationswerkzeug wird die objektorientierte und ereignisgesteuerte Software Plant Simulation ausgewählt, die eine umfassende Modellierung, Simulation und Ergebnisanalyse des Produktionssystems ermöglichen soll.

In diesem Kapitel soll nun der prinzipielle Simulationsaufbau erklärt werden. Es wird jedoch bewusst auf eine detaillierte Beschreibung des zugrunde liegenden Programmiercodes verzichtet, da dieser für das Verständnis des Simulationsmodells meist unerheblich ist. Für den interessierten Leser wird jedoch – wenn erforderlich – in Klammeranmerkungen jeweils ein direkter Verweis auf die im Modell befindlichen Bausteine gegeben. So soll auch eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem Simulationsmodell erleichtert werden. Eine Abbildung des gesamten Simulationsmodells ist zum Nachschlagen und aus Gründen der besseren Verständlichkeit im Anhang zu finden. Simulationszeitraum ist der 1. Jänner 2013 bis 31. März 2014.

In der Projektphase „Schwachstellenanalyse und Optimierungsansätze“ wurden drei Pakete zu jeweils drei Varianten vorgestellt. Jeweils eine Variante pro Paket stellt dabei den aktuellen Ist-Prozess dar:

- L2: prioritätengesteuerte Auftragsabarbeitung
- D1: Materialfluss gemäß historischen Arbeitsplänen
- S1: Historische Qualifikationsmatrix und Schichtkalender

Durch die Simulationsexperimente werden nach Verifikation und Validierung dieses Ist-Modells unterschiedliche Kombinationen der Varianten L_x , D_y und S_z untersucht, d.h. es wird aus jedem Paket jeweils eine Variante ausgewählt und somit ein neues Simulationsmodell (Variantenkombination) geschaffen. Das Grundprinzip des Modellaufbaus ist in Abbildung 3-41 dargestellt.

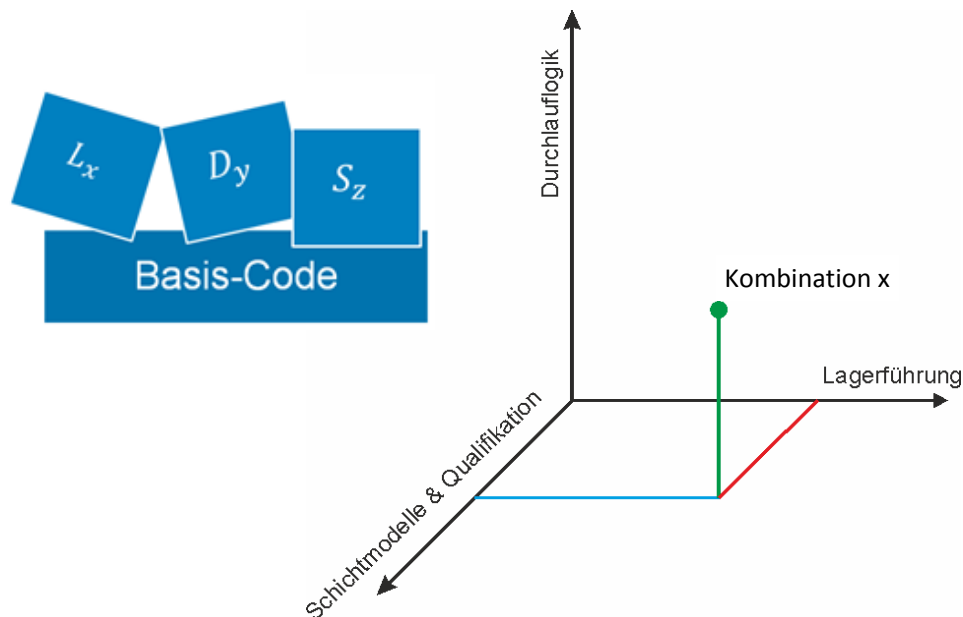


Abbildung 3-41: Grundprinzip des Modellaufbaus

Zunächst wird mit den Hilfsmitteln, die Plant Simulation zur Verfügung stellt, eine grundsätzliche Basis geschaffen („Basis-Code“), die für alle zu untersuchenden Simulationsmodelle gleich ist. Dies beinhaltet verschiedene Bereiche wie zum Beispiel Auftragsdaten, Einzelstationen, Arbeiter oder Transportvorrichtungen. Die unterschiedlichen Varianten werden dann – bildlich gesprochen – wie Bausteine auf diese Basis aufgesetzt. Da jeweils drei Varianten pro Paket existieren, können insgesamt $3^3 = 27$ unterschiedliche Kombinationen (Simulationsmodelle) erstellt werden. Diese lassen sich in einem Variantenbaum abbilden:

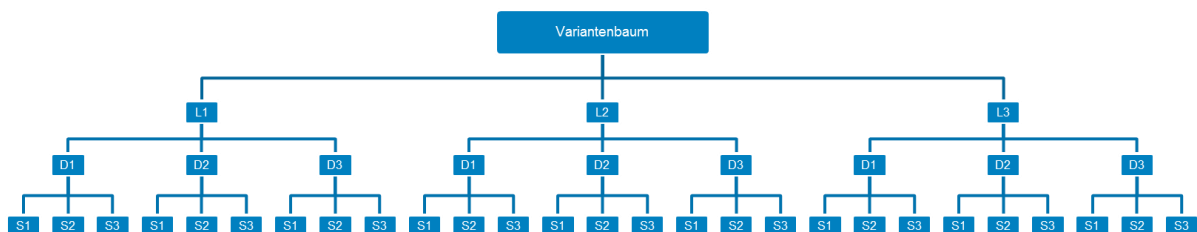


Abbildung 3-42: Vollständiger Variantenbaum aller Kombinationsmöglichkeiten

Es würde jedoch einen unverhältnismäßigen Aufwand bedeuten, alle Kombinationen zu erstellen und zu simulieren. Die Varianten sind untereinander stark verknüpft und müssen durch teils immense Quellcode-Umstrukturierung sinnvoll miteinander verbunden bzw. auf den Basis-Code

implementiert werden. Aus diesem Grund werden in Absprache mit Böhler Edelstahl jene Kombinationen aus dem Variantenbaum ausgewählt, die in den Simulationsexperimenten untersucht werden sollen. Gewünscht ist eine schrittweise Annäherung der Ist-Situation an ein Optimal-System. Dies soll nach und nach durch Austauschen der „Varianten-Bausteine“ von den „schlechten“ zu den vermutlich „besten“ Varianten erfolgen. Die ausgewählten Kombinationen werden aus der vollständigen Kombinationsdarstellung in Abbildung 3-42 extrahiert und in einem neuen Variantenbaum abgebildet:

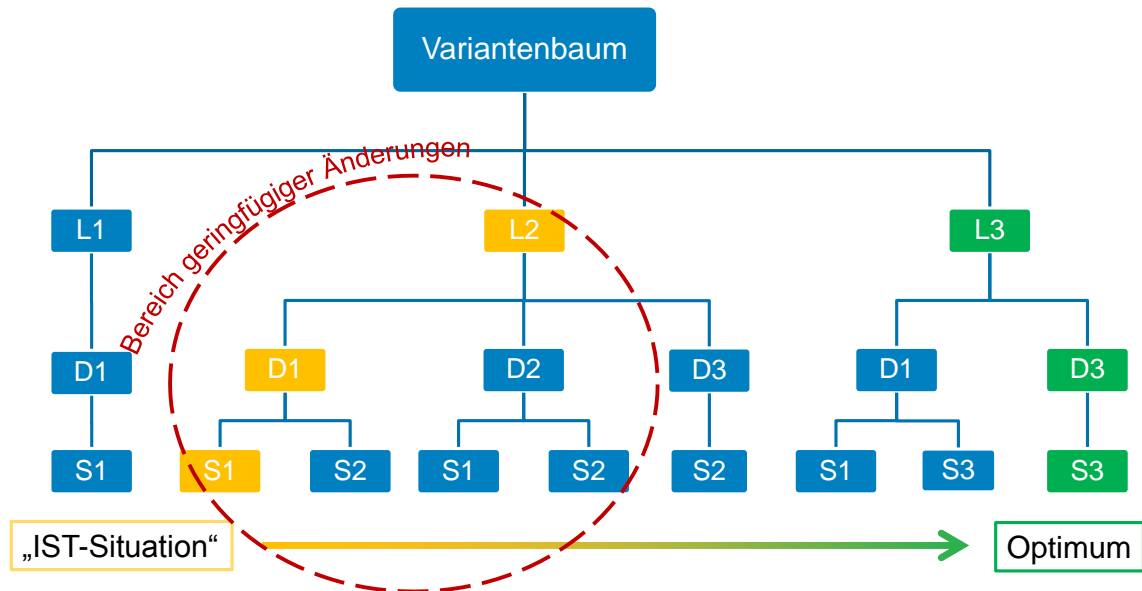


Abbildung 3-43: Variantenbaum der Simulationsexperimente

Jeder Ast dieses Variantenbaums zeigt somit eine zu simulierende Variantenkombination. Die Varianten der Ist-Situation sind gelb eingefärbt, wobei hier noch einmal betont werden muss, dass der tatsächliche Ist-Prozess im Bereich der Lagerführung (L) teilweise auch Anzeichen der Variante L1 aufweist. Die Prioritätenregelung L2 wird also nur eingeschränkt durchgeführt, da höher priorisierte Aufträge in der Praxis aufgrund ihrer schlechten Zugänglichkeit („Ausgraben der Aufträge“) nur nachrangig ausgewählt werden. Die Varianten des (erwarteten) Optimal-Systems sind rechts im Variantenbaum ersichtlich und grün eingefärbt. Es handelt sich dabei um ein kaum realisierbares System, das jedoch die absolute Leistungsgrenze der Produktion abschätzbar machen soll. Weiters ist ein Bereich geringerer Investitionskosten dargestellt, der durch konsequente Durchführung der prioritätengesteuerten Auftragsabarbeitung und einer verbesserten Schichtplaneinteilung erreicht werden kann. Durch diese Auswahl an Kombinationen soll schlussendlich das Optimierungspotential jeder Variante für sich quantifizierbar werden. Dies geschieht vor allem in Hinblick auf die Zielgröße Liefertreue.

3.3.1 Modellbildung

In diesem Schritt soll nun ein Simulationsmodell entwickelt werden, das den Ist-Zustand des Produktionssystems widerspiegelt. Die im Modell abgebildeten Elemente und deren Detaillierungsgrad sind stark von der Zielsetzung der Untersuchung abhängig. Irrelevante Systemeigenschaften, die die Qualität der Ergebnisse nicht oder nur vernachlässigbar positiv beeinflussen, sind nur

mögliche Fehlerquellen und somit nicht in das Modell mit aufzunehmen. Es muss daher ein sinnvolles Abstraktionsniveau gefunden werden, das mit der Zielsetzung der Simulationsstudie harmonisiert.

3.3.1.1 Entity-Relationship-Model

Als erster Schritt wird ein konzeptionelles Modell (Gedankenmodell) entworfen. Dies kann grundsätzlich durch die Top-Down- oder durch die Bottom-Up-Methode erfolgen, in der Praxis handelt es sich jedoch meist um alternative Überlagerungen beider Prinzipien (vgl. [GRU09]).

Zunächst wird das System freigeschnitten und damit die Systemgrenze definiert. Die Systemgrenze dieses Simulationsprojektes ist die Produktionshalle Halle 8. Alle relevanten Elemente dieses Systems sollen auf ein verhältnismäßiges Niveau abstrahiert und im Modell abgebildet werden. Zusätzlich zu der detaillierten Darstellung des Produktionssystems Halle 8 sollen die Einzelstationen der Halle 6 (Wärmebehandlung und Härteprüfung) in das Modell aufgenommen werden. Diese Einzelstationen werden jedoch nur zum Zweck der Materialflussdarstellung (Teilziel Sankey-Diagramm) aufgenommen und zu Bearbeitungs-Gruppen zusammengefasst (Beispiel: Die Einzelstation „Durchlaufofen“ im Modell besteht tatsächlich aus mehreren verschiedenen Durchlauföfen der Halle 6). Diesen Halle 6 – Einzelstationen werden somit auch keinerlei Bearbeitungszeit- oder Verfügbarkeitszahlen hinterlegt. Nach erfolgter Abgrenzung des Systems kann ein Entity-Relationship-Model (ERM) aufgebaut werden, das als Skelett der Simulation bezeichnet werden kann. Darin sind alle relevanten Zusammenhänge der einzelnen Systemelemente (Entitäten) und deren Eigenschaften (Attributen) ersichtlich. Das ERM ist ein dynamisches Element, das während des Modellbildungsprozesses vielfach erweitert oder verändert wird. Abbildung 3-44 zeigt das vereinfachte ERM um einen Überblick über die wichtigsten Grundzüge des Simulationsmodells zu bekommen.

Als Ausgangspunkt soll der **Auftrag** selbst dienen, der immer auch stellvertretend für die physischen Flachstähle steht. Ein Auftrag lässt sich über die drei Attribute Fertigungsauftragsnummer (FAUNR), Fertigungsauftragslos (FAULO) und Splitnummer (SPLNR) eindeutig identifizieren (Primärschlüssel). Der Auftrag wird in der Quelle erzeugt (entspricht der Anlieferung aus dem Stammwerk) und im Produktionssystem an den im **Arbeitsplan** vorgesehenen **Einzelstationen** durch die jeweils dazu qualifizierten **Arbeiter** bearbeitet. Die Bearbeitungsdauer ist dabei abhängig von den Produktabmessungen, die in den **Auftragsdetails** gespeichert sind. Einzelstationen und Arbeiter sind dabei einem Schichtkalender **zugewiesen**. Sobald ein Auftrag an einer Station fertig bearbeitet wird, gelangt er je nach Arbeitsplanvorgabe durch unterschiedliche **Transportmittel** zu der nächsten vorgeschriebenen Einzelstation. Dort wird er vorerst an einem zur Einzelstation zugehörigen **Lagerplatz** zwischengelagert. Nach vollständiger Bearbeitung an allen vorgesehenen Einzelstationen wird der Auftrag wieder über die Systemgrenze geführt und in der Senke vernichtet.

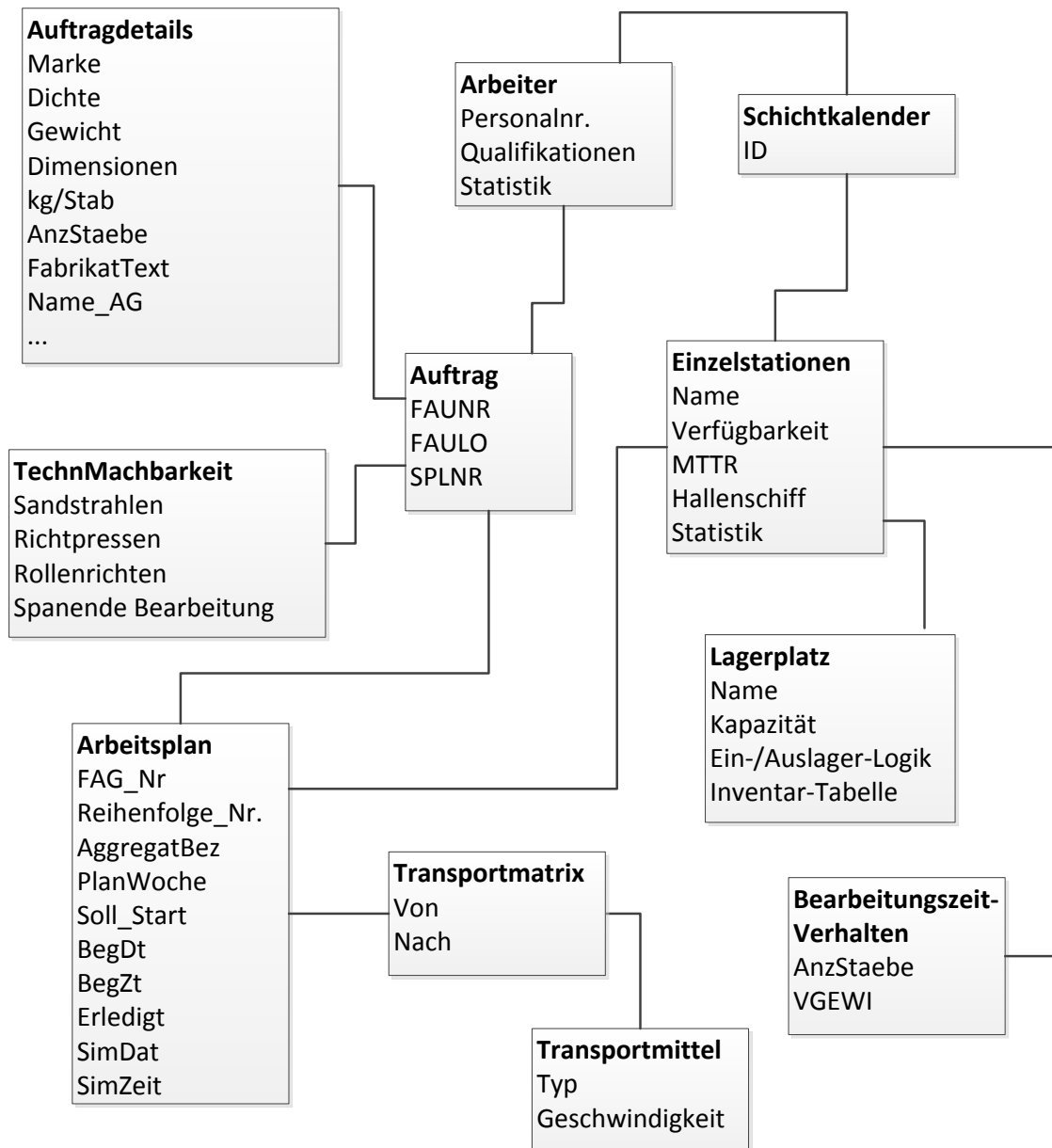


Abbildung 3-44: ERM des Simulationsmodells

Nach einer ersten ERM-Erstellung wird das so entworfene konzeptionelle Modell in die Simulationssoftware implementiert und zum Simulationsmodell aufgebaut.

3.3.1.2 Auftragserzeugung

Es werden im Modell jene Aufträge simuliert, die vom 1. Jänner bis zum 31. März das System erreicht haben. Es handelt sich um tatsächlich angefallene Aufträge, die somit eine realistische Darstellung des System-Inputs erlauben. Dies sind über 12200 Aufträge.

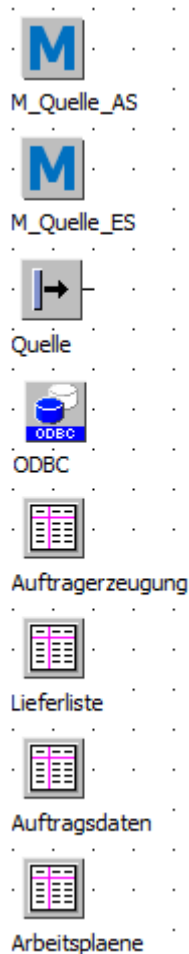


Abbildung 3-45:
Auftragserzeugung

Unter Verwendung einer ODBC Schnittstelle werden die historischen Daten aus einer Datenbank in das Simulationsmodell geladen. Diese erzeugen drei Tabellen:

- Auftragserzeugung: hier werden die Erzeugungstermine der einzelnen Aufträge festgelegt.
- Auftragsdaten: hier befinden sich die jeweiligen Attribute für jeden Auftrag. Dies sind Auftragsdetails, die Informationen über Werkstoffmarke, Produktdimensionen, Kunden, Masse, Fabrikat-Typ usw. enthalten.
- Arbeitspläne: in dieser Tabelle sind für alle Aufträge ihre direkt zugewiesenen (1:1-Beziehung) Arbeitspläne enthalten. Die Aufarbeitung dieser Arbeitspläne wurde bereits in Kapitel „Ist-Analyse“ erläutert.

Sofern dies gewünscht ist, können über die ODBC Schnittstelle jederzeit aktuelle Daten in das Simulationsmodell eingespielt werden.

Die Daten der Tabelle Auftragserzeugung werden in eine für Plant Simulation günstigere Form gebracht und in die Tabelle „Lieferliste“ eingetragen. Bei Start der Simulation werden von der Quelle entsprechend dieser Tabelle sogenannte Bedieneinheiten (BE) erzeugt, in diesem Fall sind dies die Aufträge. Abbildung 3-46 zeigt exemplarisch die ersten zwei Zeilen der Lieferliste. Es ist erkennbar, dass am 07.01.2013 insgesamt 44 und am darauffolgenden Tag 31 Aufträge erzeugt werden.

	date 1	object 2	integer 3
string	Lieferzeit	BE	Anzahl
1	07.01.2013	*.BEs.Auftrag	44
2	08.01.2013	*.BEs.Auftrag	31

Abbildung 3-46: Tabelle "Lieferliste"

Durch die beiden Methoden „M_Quelle_AS“ und „M_Quelle_ES“ werden jedem Auftrag durch die 1:1-Beziehung seine zugehörigen Auftragsdetails (aus der Tabelle „Auftragsdaten“) und sein zugehöriger Arbeitsplan (aus der Tabelle „Auftragsplaene“) zugewiesen.

Die Aufträge werden also gemäß ihren in der Lieferliste festgelegten Erzeugungszeitpunkten von der Quelle erzeugt und mit ihren jeweiligen Attributen parametrisiert. Während der Simulation kann zu jeder Zeit jeder beliebige Auftrag geöffnet und seine Zusammenstellung begutachtet werden. Anhand eines beliebigen Auftrages soll eine kurze Übersicht über die hinterlegten Auftragseigenschaften gegeben werden. Das Auftragsfenster wird in Abbildung 3-47 exemplarisch dargestellt:

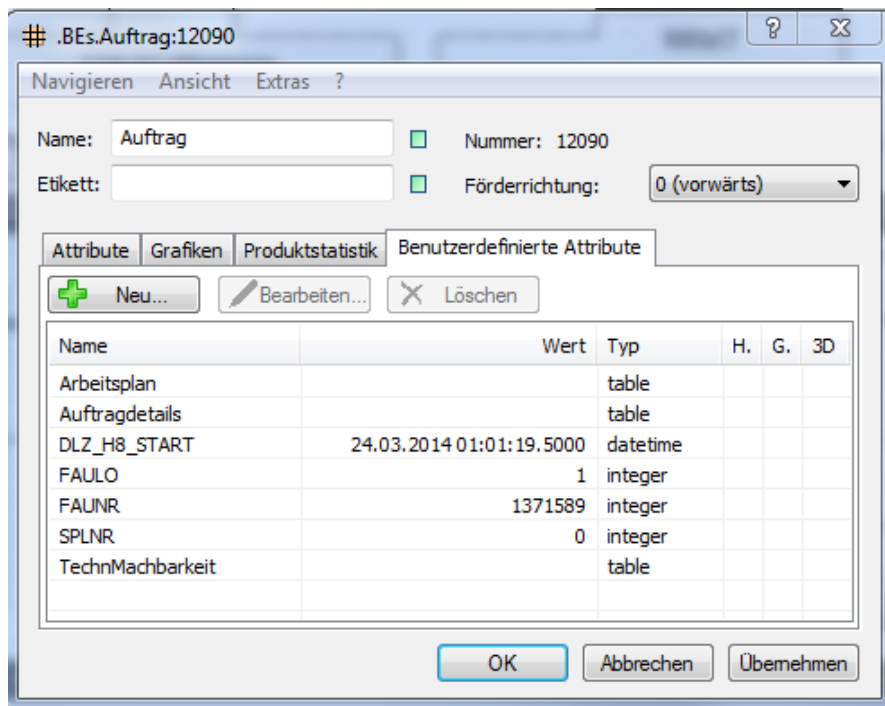


Abbildung 3-47: Auftragsfenster in Plant Simulation

Es können anhand der Abbildung nun mehrere Aussagen über diesen Auftrag getroffen werden:

- Fertigungsauftragsnummer: 1371589
- Losnummer: 1
- Splitnummer: 0
- Es handelt sich um den 12090sten von der Quelle erzeugten Auftrag
- Der Auftrag hat am 24.03.2014 das System Halle 8 betreten („DLZ_H8_START“)

Weiters ist ersichtlich, dass insgesamt drei Tabellen in den Attributen hinterlegt wurden:

- „Arbeitsplan“: Abbildung 3-48 zeigt exemplarisch den zum oben angeführten Auftrag gehörigen Arbeitsplan. Dieser gibt vor, an welchen Einzelstationen der Auftrag bearbeitet bzw. geprüft werden muss (Spalte ganz links). Dabei sind für alle Stationen Soll-Termine angeführt und für manche Positionen – dies betrifft die leistungsrelevanten Bearbeitungsstationen – ist ebenfalls der tatsächlich angefallene historische Bearbeitungszeitpunkt hinterlegt („BEGDT“ und „BEGZT“). Für alle in Halle 8 lokalisierten Einzelstationen wird der Bearbeitungszeitpunkt der Simulation („SimDat“ und „SimZeit“), die Differenz bezüglich des Soll-Termins („DayDiff“) und ein allgemeines Statement bezüglich der Pünktlichkeit (zu bald, exakt, zu spät) („Termin“) gespeichert. Dies dient zum Zwecke der späteren Ergebnisauswertung und Analyse.
- „Auftragsdetails“: in dieser Tabelle werden all jene Informationen gespeichert, die das Produkt und seine Eigenschaften definieren. Insgesamt werden 27 Auftragsattribute gespeichert. Die wichtigsten betreffen den Werkstoff, die Produktdimensionen, den Auftragsumfang (Masse, Stabanzahl) oder den Kunden.

- „TechnMachbarkeit“: Diese Tabelle betrifft lediglich die Optimierungsvariante D2 und wird daher später vorgestellt.

object	integer	string	date	date	time	string	integer	date	time	integer	string
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
AggregatBezArbeitsplan	ID	PLANWOCHE	SOLL_START	BEGDT	BEGZT	Jahr	Erlедigt	SimDat	SimZeit	DayDiff	Termin
*.Modelle.Netzwerk.Durchlauf	2						1				
*.Modelle.Netzwerk.Haerteprue	5						1				
*.Modelle.Netzwerk.MRRM7	20						0				
*.Modelle.Netzwerk.RP9	39						0				
*.Modelle.Netzwerk.RP9	39						999				
*.Modelle.Netzwerk.PAL13_PK	27						0				
*.Modelle.Netzwerk.PAL13_TS	28						0				
*.Modelle.Netzwerk.Endfreigab	10						0				

Abbildung 3-48: Beispiel eines hinterlegten Arbeitsplans

Alle diese angesprochenen Daten sind für jeden Auftrag einzigartig, d.h. es handelt sich um eine 1:1-Beziehung zwischen Auftrag und den oben genannten Informationen.

3.3.1.3 Layout und Transportwege

Nachdem ein Auftrag von der Quelle gemäß dem oben geschilderten Prozedere erzeugt wurde, kann er entweder zur Wärmebehandlung in die Halle 6 oder zum Prüf- und Adjustageprozess in die Halle 8 geschickt werden. Das Layout des Simulationsmodells soll in diesem Kapitel kurz erläutert werden.

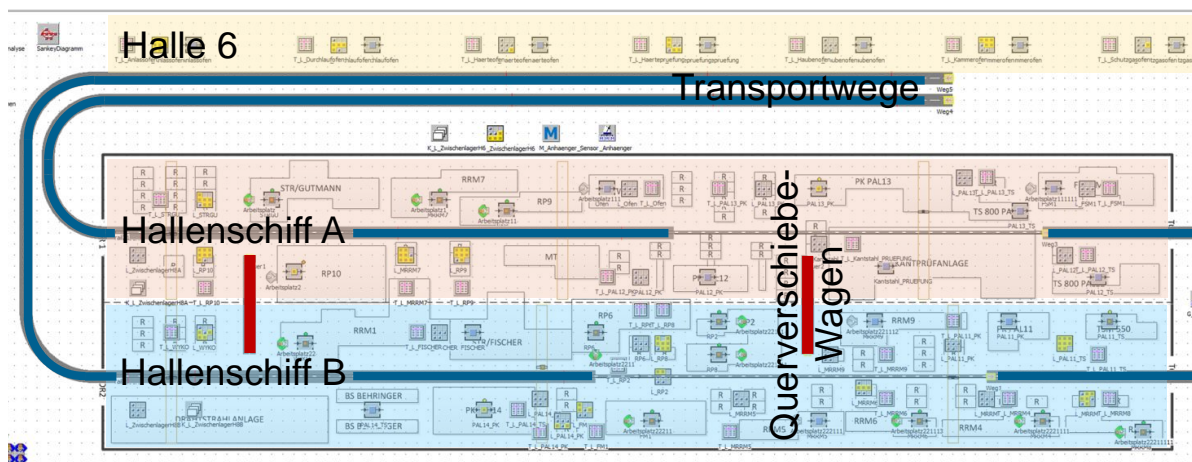


Abbildung 3-49: Modellausschnitt Layout

Die Abmessungen des Simulationsmodell-Layouts basieren auf dem Brandschutzplan der Halle 8 und sind somit maßstabsgetreu. In Abbildung 3-49 sind ist die Strukturierung des Systems in zwei große Bereiche dargestellt:

- **Halle 6** besteht im Simulationsmodell aus insgesamt 7 Einzelstations-Bausteinen: Anlassofen, Durchlaufofen, Härteofen, Haubenofen, Schutzgasofen, Kammerofen und Härteprüfung. Bei diesen Einzelstationen handelt es sich in der Realität jedoch um eine Gruppierung mehrerer Einzelstationen. Die Halle 6 ist nicht Bestandteil der detaillierten Betrachtung und wird hauptsächlich zum Zweck einer gesamtheitlichen Materialflussdarstellung mit in das Modell

aufgenommen. Die Gruppierung der Halle 6 - Einzelstationen ist im Anhang aufgeschlüsselt.

- **Halle 8** ist das eigentliche Zielsystem des Simulationsmodells und mit seinen zugehörigen Einzelstationen Gegenstand detaillierter Untersuchungen. Grundsätzlich lässt sich das Produktionssystem in zwei Bereiche gliedern: **Hallenschiff A** und **Hallenschiff B**. Diese verfügen über jeweils zwei Tore zur Materialanlieferung (links in der Abbildung) bzw. zum Materialabtransport (rechts in der Abbildung), insgesamt stehen für den Transport also vier Wege in bzw. aus der Halle zur Verfügung.

Die prinzipiell möglichen Transportprozesse sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden:

Transport über die Systemgrenzen der Halle 8

Die vier möglichen Transportwege sind in Abbildung 3-49 blau dargestellt. Für den Transport über die Systemgrenze der Halle 8 kann es zwei unterschiedliche Gründe geben:

- Der Auftrag befindet sich entweder in Halle 6 und muss zur Bearbeitung in die Halle 8 gelangen oder umgekehrt. Für diesen Fall sind zwei mögliche Wege vorgesehen (die lt. Abbildung 3-49 längeren Transportwege). Auf diesen beiden Wegen befindet sich jeweils ein Fahrzeug (stellt die Anhänger des Realsystems dar), das die Aufträge aus den Zwischenlagern („L_ZwischenlagerH6“, „L_ZwischenlagerH8A“ oder „L_ZwischenlagerH8B“) aufnimmt und an den jeweiligen Bestimmungsort transportiert. In Abbildung 3-50 sind die beiden Fahrzeuge links dargestellt. Im Simulationsmodell gilt folgende Verknüpfung:
 - „Weg4“: Halle 6 ↔ Hallenschiff A
 - „Weg5“: Halle 6 ↔ Hallenschiff B

Die Fahrzeuge sind so programmiert, dass dreimal täglich ein Transport zwischen den Hallen stattfindet.

- Der Auftrag wurde entsprechend seines Arbeitsplanes in der Halle 8 vollständig abgearbeitet und kann deswegen das Produktionssystem verlassen. In diesem Fall wird der Auftrag – je nach Hallenschiffzugehörigkeit seiner letzten Bearbeitungsstation – mittels Brückenkran auf eines von zwei Fahrzeugen abgeladen und anschließend über „Weg1“ oder „Weg3“ (in Abbildung 3-49 rechts dargestellt) zur Senke transportiert. Abbildung 3-50 zeigt ein mit zwei Aufträgen beladenes Fahrzeug am Weg zur Senke.

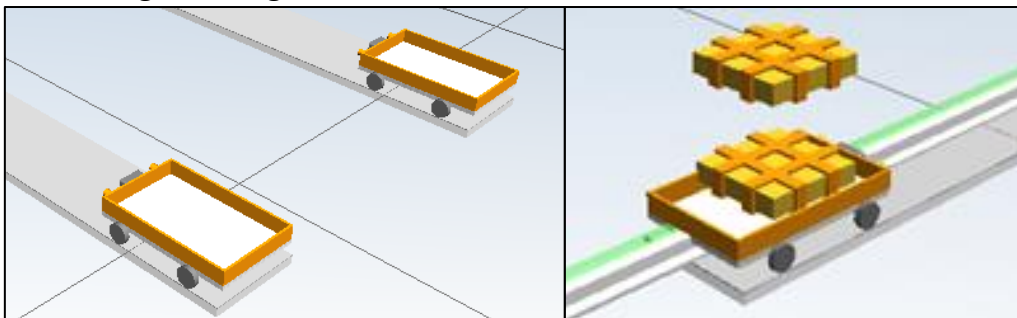


Abbildung 3-50: Fahrzeuge des Simulationsmodells

Transport innerhalb der Halle 8

Sobald ein Auftrag die Halle 8 erreicht hat, wird er entsprechend seinem Arbeitsplan durch das Produktionssystem bewegt. Für diesen Transport zwischen den Systemelementen sind in jedem Hallenschiff drei Brückenkräne installiert. Die Übergabe der Aufträge von einem Hallenschiff in das andere kann an zwei Stellen durch Querverschiebewägen erfolgen.



Abbildung 3-51: Transport mittels Querverschiebewagen

Dazu wird der Auftrag mittels Kran auf dem Querverschiebewagen abgeladen, dieser setzt in das andere Hallenschiff über und wird dort wieder durch einen Brückenkran entladen (Abbildung 3-52)

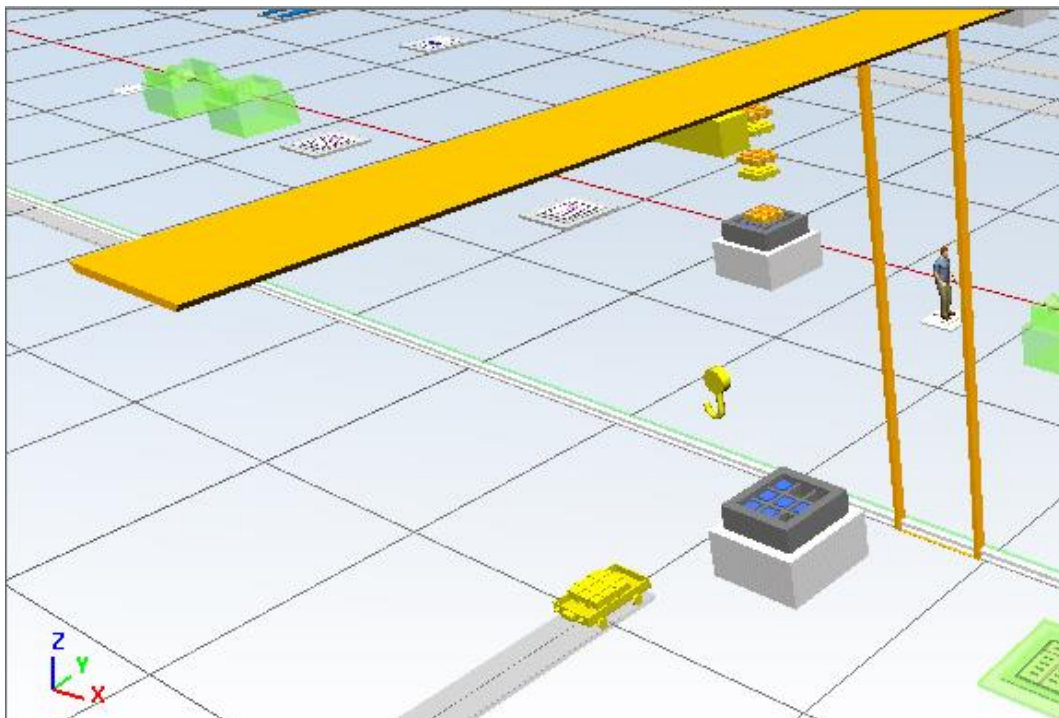


Abbildung 3-52: Entladevorgang des Querverschiebewagens durch einen Brückenkran

Die Transportlogik wird dabei so in Plant Simulation programmiert, dass jede Transportanfrage durch einen Auftrag zuerst überprüft, wo sich der aktuelle Standort und wo der gewünschte Zielort des Auftrags befindet. Basierend aus

dieser Kombination wird die korrekte Transportmethode aufgerufen. Dies soll anhand eines kurzen Beispiels erläutert werden:

Ein Auftrag wird auf der Sandstrahlanlage „STR/GU“ im Hallenschiff A fertig bearbeitet und löst durch die Ereignissteuerung eine Transportanfrage aus. Der nächste zu erfolgende Bearbeitungsschritt ist an der Mehrrollenrichtmaschine „MRRM5“ in Hallenschiff B durchzuführen. Die Transportsteuerung ruft nun die in Abbildung 3-53 dargestellte Transportmethodenmatrix auf. Aufgrund des geforderten Transports von Hallenschiff A nach Hallenschiff B wird auf die korrekte Transportmethode „.Modelle.Netzwerk.M_Transport_Q“ verwiesen, die in der Folge aufgerufen wird. In dieser Methode ist die Ablauflogik für die Brückenkräne und einen Querverschiebewagen, sowie deren Zusammenspiel für diesen Fall hinterlegt. Der Auftrag wird nun durch einen geeigneten Brückenkran an der Sandstrahlanlage aufgenommen, zu einem Querverschiebewagen transportiert, mittels dieses Querverschiebewagens in das Hallenschiff B übersetzt, durch einen weiteren Brückenkran aufgenommen und schließlich zur Einzelstation „MRRM5“ transportiert.

	string 0	object 1	object 2	object 3
string	von\nach	A	B	H6
1	A	.Modelle.Netzwerk.M_Transport_KA	.Modelle.Netzwerk.M_Transport_Q	.Modelle.Netzwerk.M_Transport_W
2	B	.Modelle.Netzwerk.M_Transport_Q	.Modelle.Netzwerk.M_Transport_KB	.Modelle.Netzwerk.M_Transport_W
3	H6	.Modelle.Netzwerk.M_Transport_W	.Modelle.Netzwerk.M_Transport_W	.Modelle.Netzwerk.M_Transport_D

Abbildung 3-53: Matrix der Transportmethoden

Die Programmierung der Brückenkräne wird dabei so vorgenommen, dass in einem etwaigen Folgeprojekt auch eine 3D-Animation der Produktionsanlage erfolgen kann. Der Geometrie des Krans inkl. Haken ist dreidimensional hinterlegt und die Bewegungsabläufe werden inkl. Absenken und Anheben der Aufträge vollständig visualisiert. Einen der aufwändigsten Programmieranteile der Transportprozessmodellierung stellt die Programmierung der Brückenkranlogik dar. Da sich je Hallenschiff drei Brückenkräne auf dem gleichen Schienensystem bewegen, stellt die Vermeidung von etwaigen Kollisionen bei der Auftragsannahme bzw. –ablage eine anspruchsvolle Herausforderung dar.

3.3.1.4 Bearbeitung der Aufträge

Zur Darstellung einer Bearbeitungseinheit werden in Plant Simulation mehrere Bausteine eingefügt, die hier kurz erläutert werden sollen. Als Beispiel einer Bearbeitungseinheit ist in Abbildung 3-54 wiederum die Sandstrahlanlage „STR/GU“ dargestellt.

Es ist erkennbar, dass eine Bearbeitungseinheit aus folgenden Bausteinen besteht:

- Lagerplatz („L_STRGU“): Sobald ein Auftrag entsprechend seinem Arbeitsplan seine nächste Bearbeitungsstation erreicht, wird er – sofern an der Bearbeitungsstation gerade ein anderer Auftrag bearbeitet wird – im zugehörigen Lagerplatz bis zu seiner Bearbeitung zwischengelagert.

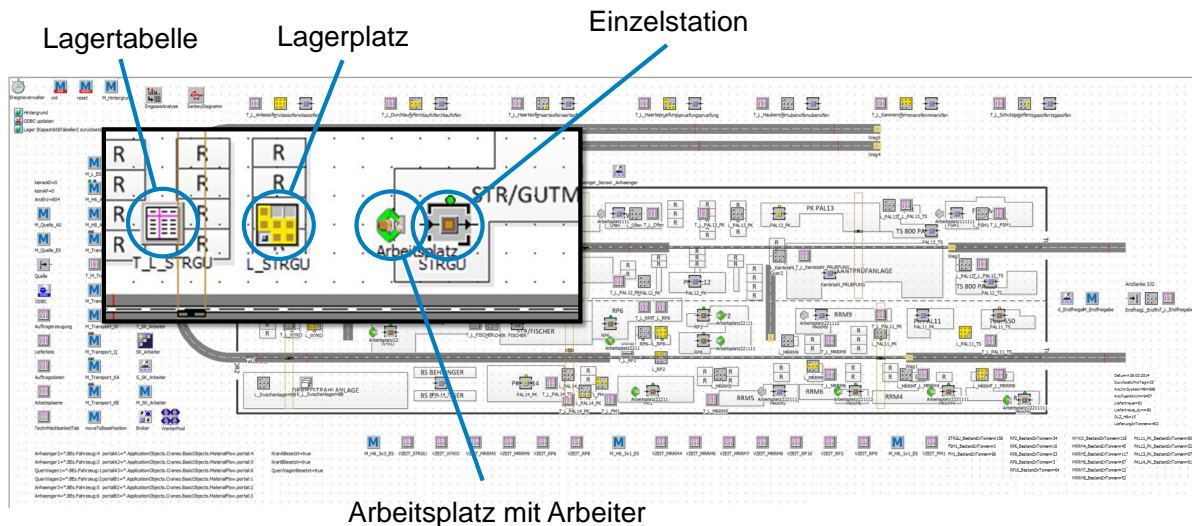


Abbildung 3-54: Bearbeitung eines Auftrags am Beispiel "STR/GU"

- Lagertabelle („T_L_STRGU“): Diese Tabelle stellt das Inventar der sich im Lagerplatz befindlichen Aufträge dar. Diese sind nach Priorität gegliedert und mit ihrem vorgesehenen Bearbeitungstermin versehen.
- Arbeitsplatz mit Arbeiter: Damit eine Bearbeitung des Auftrags ermöglicht wird, muss sich ein mit der entsprechenden Qualifikation versehener Mitarbeiter an der Einzelstation befinden.
- Einzelstation („STRGU“): An der Einzelstation wird die tatsächliche Bearbeitung des Auftrags durchgeführt. Die zur Beschreibung der Einzelstationen nötigen Eingangsdaten wurden im Kapitel „Ist-Analyse“ vorgestellt. Dabei sind folgende Punkte essentiell:
 - Bearbeitungszeit: Sobald ein neuer Auftrag zur Bearbeitung ausgewählt wird, wird eine Methode aufgerufen, die in Abhängigkeit von Stabanzahl und Querschnitt des Auftrages eines von neun Histogrammen zur stochastischen Bestimmung der Bearbeitungszeit auswählt (siehe Darstellung auf Seite 74). Nach Ablauf dieser Bearbeitungszeit wird eine Transportmethode aufgerufen, die den Abtransport des Auftrags zur nächsten Bearbeitungseinheit initiiert.
 - Störungsverhalten: Das Störungszeitverhalten wird über die Verfügbarkeit und die MTTR definiert.
 - Schichtkalender: Manchen Bearbeitungseinheiten kann ein exakter Schichtkalender zugewiesen werden. Andere Einzelstationen („Ausweichaggregate“) bleiben ohne fixe Zuordnung und sind somit flexibel.

Je nach implementierter Lagerführungsvariante wird nach erfolgter Bearbeitung ein neuer Auftrag aus dem Lagerbestand ausgewählt und der Bearbeitung zugeführt.

In der Halle 8 befinden sich insgesamt 24 solcher Bearbeitungseinheiten. Diese werden alle nach oben stehendem Prinzip in das Simulationsmodell implementiert.

3.3.1.5 Zuteilung der Arbeiter zu den Einzelstationen

Damit ein Auftrag an einer Einzelstation bearbeitet werden kann, muss sich ein Arbeiter mit der erforderlichen Qualifikation bei dieser Einzelstation befinden. Ein in das Simulationsmodell implementierter Broker übernimmt die Vermittlung zwischen Arbeiter und Einzelstation. Diese Vermittlung unterliegt jedoch gewissen Rahmenbedingungen:

- Einzelstation: Zur Bearbeitung eines Auftrages muss die Einzelstation gemäß ihres zugrundeliegenden Schichtkalenders zur Verfügung stehen und darf selbstverständlich auch nicht gestört sein. Sofern dies zutrifft, kann ein Auftrag den Einzelstation-Baustein betreten. In diesem Fall wird von der Einzelstation eine Anfrage an den Broker zur Vermittlung eines qualifizierten Mitarbeiters gestellt.
- Arbeiter: Die im Simulationsmodell integrierten Arbeiter und deren Qualifikationen beruhen auf den Auswertungen der Ist-Analyse. Jedem Arbeiter ist ein Schichtmodell zugewiesen, das ebenfalls auf historischen Daten beruht. Der Arbeiter steht also nur dann für eine Vermittlung zur Verfügung, wenn zwei Bedingungen erfüllt werden:
 - Der Arbeiter befindet sich laut seinem Schichtplan im Dienst.
 - Der Arbeiter verfügt über die von der Einzelstation angefragte Qualifikation.

Die Vermittlungstätigkeit des Brokers ist in Abbildung 3-55 in einem Entity-Relationship-Model dargestellt:

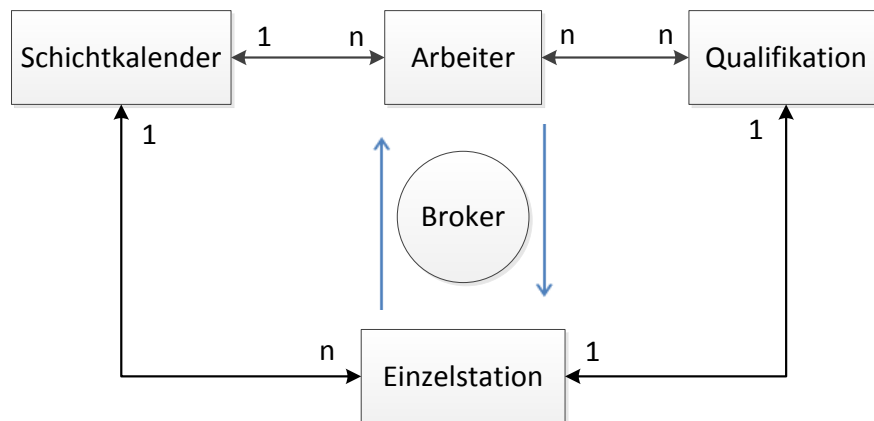


Abbildung 3-55: Vermittlung von Arbeiter und Einzelstation via Broker im ERM

Um ein realistisches Simulationsmodell zu erhalten wird den Arbeitern und Einzelstationen zusätzlich eine Prioritätensteuerung hinterlegt. Dadurch werden Arbeiter mit höherer Priorität vor Arbeitern mit geringerer Qualität vermittelt, bzw. bekommen Einzelstationen mit höherer Priorität vor Einzelstationen mit geringerer Priorität einen Arbeiter vermittelt. Dies ist durch zwei Aspekte zu erklären:

- Arbeiter, die nur eine Qualifikation aufweisen, erhalten eine höhere Priorität. Dies wird gemacht, damit bei einer Anfrage nicht ein Arbeiter vermittelt wird, der theoretisch mehrere Einzelstationen bedienen könnte und jener Arbeiter, der nur über diese eine Qualifikation verfügt, ohne Zuteilung im Werkerpool zurückbleibt.

- Einzelstationen werden dynamisch priorisiert. Der Wert der Priorisierung ist abhängig von den vorhandenen Beständen und deren Dringlichkeit. Die Priorität der Einzelstation wird täglich neu festgelegt.

3.3.1.6 Verifikation und Validierung

Nach erstmaliger Fertigstellung des Ist-Simulationsmodells muss dessen Qualität überprüft werden. Dies geschieht in zwei Schritten. Zuerst wird in der Verifikationsphase überprüft, ob das Simulationsmodell auch tatsächlich die gewollte Logik korrekt ausführt und keinerlei Programmierfehler im Code vorhanden sind. Anschließend wird das Modell noch validiert, d.h. es wird überprüft, ob das Verhalten des Simulationsmodells in geeignetem Maße mit den tatsächlichen Eigenschaften des Realsystems übereinstimmen. Wenn dies zutrifft, können die gewünschten Simulationsexperimente durchgeführt werden.

Verifikation

Ziel der Verifizierung ist es, das Simulationsmodell auf logische und syntaktische Programmfehler zu überprüfen und die Übereinstimmung mit dem konzeptionellen Modell zu bestätigen. Um eine effiziente Prüfung des Programmiercodes zu gewährleisten, muss bereits in der Phase der Modellbildung auf einen strukturierten und übersichtlichen Programmaufbau geachtet werden. Animationen und Walk-Through-Analysen gelten in der Literatur als hilfreiche Methoden zur Modell-Verifizierung. Die 2D oder 3D Animation gibt durch die graphische Darstellung der im Modell ablaufenden Prozesse einen guten Eindruck darüber, ob eine Übereinstimmung mit den realen Begebenheiten gegeben ist. Die Walk-Through-Analyse hat einen anderen Ansatz. Es wird der Weg eines bestimmten Objekts durch das System verfolgt und somit die innere Logik und Plausibilität des Simulationsmodells überprüft.

Der in Plant Simulation zur Verfügung stehende Debugger wird zusätzlich zur Überprüfung des Programmiercodes eingesetzt (Abbildung 3-56).

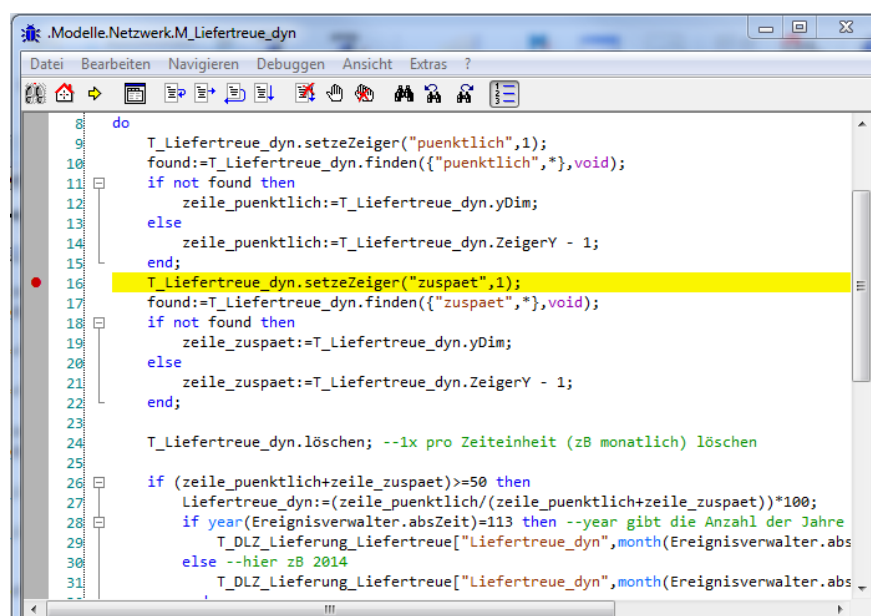


Abbildung 3-56: "Verifikation im Kleinen"

Durch Einsatz des Debuggers kann der korrekte Ablauf jedes Teilsystems überprüft werden („Verifikation im Kleinen“). Der Code wird durch den Anwender schrittweise ausgeführt, womit eine detaillierte Betrachtung des Simulationsablaufes ermöglicht wird.

Durch den Einsatz der Simulations-Animation, mehrerer Walk-Through-Analysen und des integrierten Debuggers kann die Übereinstimmung des Simulationsmodells mit dem konzeptionellen Modell bestätigt werden.

Validierung

Nach erfolgter Sicherstellung, dass das Modell entsprechend der vorgesehenen Logik arbeitet, muss in einem zweiten Schritt sichergestellt werden, dass das Modell auch in geeignetem Maße mit den realen Begebenheiten übereinstimmt. Dies wird durch den Vergleich von Simulationsergebnissen mit den Aufzeichnungen historischer Daten bewerkstelligt. Die Validierung des Simulationsmodells erfolgt folgendermaßen:

- Vergleich von Bestandsentwicklungen
- Vergleich von Liefertreue-Aufzeichnungen
- Vergleich von Durchlaufzeiten
- Vergleich von Durchsatzzahlen

Um dies zu ermöglichen wird dem Simulationsmodell eine Logik implementiert, die eine Aufzeichnung dieser Validierungsparameter erlaubt. Über DDE-Schnittstellen werden alle relevanten Daten während des Simulationslaufes an Microsoft Excel übergeben („Online-Übertragung“). Die somit übermittelten Daten werden gleichzeitig in Diagramme umgewandelt, was eine direkte Verfolgbarkeit des aktuellen Systemzustandes erlaubt.

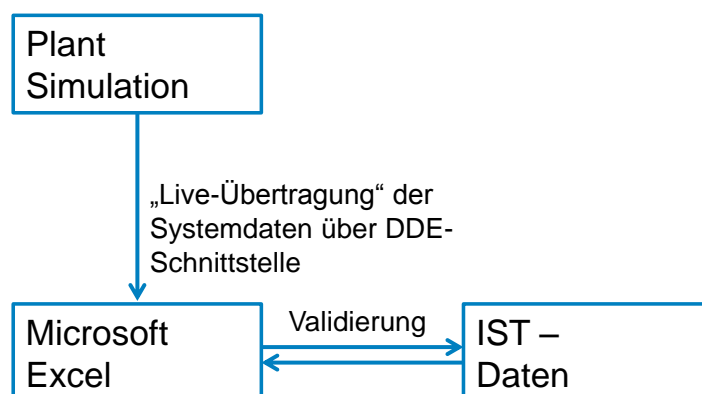


Abbildung 3-57: Prinzipdarstellung des Validierungsprozesses

Die Übereinstimmung der **Bestandsentwicklung** erfolgt durch einen visuellen Vergleich. Insgesamt werden die Bestandsentwicklungen von 18 Einzelstationen aufgezeichnet und in Diagrammen dargestellt. Die Vergleichsdiagramme werden von Böhler Edelstahl geliefert. In Abbildung 3-58 ist links die Aufzeichnung der Bestandsentwicklung einer Einzelstation des Simulationsmodells und rechts die historische Entwicklung derselben Einzelstation im Zeitraum von 1. Jänner 2013 bis 31. März 2014 zu sehen. Verglichen werden Min/Max-Werte, Mittelwerte und Kurvenverläufe.

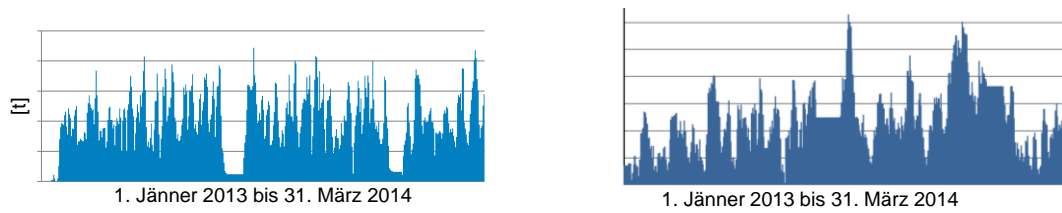


Abbildung 3-58: Vergleich von Bestandsentwicklungen (Bsp: STR/GU)

Der Vergleich der Liefertreue wird durch Bildung des nach Auftragsanzahl gewichteten monatlichen Durchschnitts angestellt. In Abbildung 3-59 ist links das Simulationsergebnis und rechts der historische Wert dargestellt. Eine Differenz von nur 0,1% spricht für eine signifikante Übereinstimmung von Modell und Realsystem.

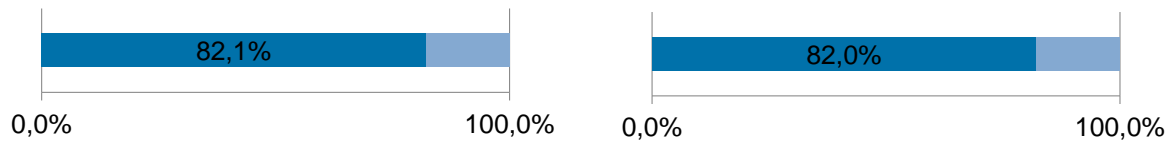


Abbildung 3-59: Vergleich der Liefertreue

Der Vergleich der Durchsatzzahlen und der Durchlaufzeiten ist in Tabelle 3-10 ersichtlich.

Tabelle 3-10: Validierung von Durchlaufzeit und Durchsatz

IST-Daten	Simulations-Ergebnis
Ø Durchsatz/Kalenderwoche (KW6 2013 – KW12 2014)	
388t	418t
Ø Durchlaufzeit (Feb. 2013 – inkl. Feb. 2014)	
17 Tage	16 Tage

Die Übereinstimmung der Simulationsdaten mit den historischen Aufzeichnungen ist nicht zuletzt unter Berücksichtigung der hohen Flexibilität des Realsystems durchaus beachtlich. Das Simulationsmodell wird somit als validiert gewertet.

3.3.2 Implementierung der Optimierungskonzepte

Die Validierung des Simulationsmodells für den Ist-Zustand erlaubt es nun mit der Programmierung der Optimierungsvarianten fortzufahren. Im Sinne der Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle nicht detailliert auf die zugrunde liegende Programmierung der einzelnen Varianten eingegangen. Es soll jedoch ein Überblick über die im Hintergrund laufende Logik des Simulationsmodells gegeben werden. Für eine Beschreibung der Konzeptideen sei auf Kapitel 3.2.2 verwiesen.

Chaotische Ein- & Auslagerung (L1)

Die Aufträge werden in der jeweiligen Lagerinventars-Tabelle zwar nach Prioritäten gegliedert, die Auswahl eines Auftrages zur Bearbeitung geschieht

Arbeitsplan einen Bearbeitungsschritt des Typs „Rollenrichten“ aufweist, so wird er nicht automatisch zu der definierten Einzelstation (z.B. „MRRM5“) geroutet, sondern es wird überprüft, welche Einzelstationen des Typs „Rollenrichten“ für die Bearbeitung des Auftrags aufgrund dessen Produktdimensionen generell zur Verfügung stehen würden. Der Auftrag wird dann in weiterer Folge zu jener Einzelstation geschickt, dessen Auftragsvorrat (Bestand in Tonnen) am geringsten ist.

	table 1	table 2	table 3	table 4
string	Sandstrahlen	Richtpressen	Rollenrichten	Spanend
1	STR/GU	RP2	MRRM4	FM1
2	FISCHER	RP6	MRRM5	FSM1
3		RP8	MRRM6	
4		RP9	MRRM7	
5		RP10	MRRM8	
6			MRRM9	
7			WYKO	

	string 0	real 1	real 2	real 3
string		Stark	Breit	QScm2
1	Mittelwert	38.00	172.00	58.00
2	Minimum	12.00	0.00	19.00
3	Median	30.00	172.00	63.00
4	Perzentil 05	17.00	100.00	27.00
5	Perzentil 75	52.00	204.00	74.00
6	Perzentil 95	80.00	255.00	81.00
7	Maximum	90.00	300.00	120.00
8	Anzahl	1894.0	1894.0	1894.0
9	Perzentil 02	14.18	97.00	24.96
10	Perzentil 98	80.00	283.80	83.31

Abbildung 3-61: Technische Rahmenbedingungen der Einzelstationen

Optimal-Layout (D3)

Die Aufträge werden nach den gleichen historischen Arbeitsplänen abgearbeitet wie in Variante D1. Das Hallen-Layout wird jedoch unter Verwendung des Dreiecksverfahrens nach Schmigalla verändert und so optimiert, dass der Transportaufwand minimiert wird. Basis der Optimierungsaufgabe ist die Transportmatrixaufzeichnung des validierten Ist-Simulationsmodells. Diese 34x34 Matrix enthält über 100.000 Transporte, die zuerst in einer ABC-Analyse strukturiert aufbereitet werden (Abbildung 3-62).

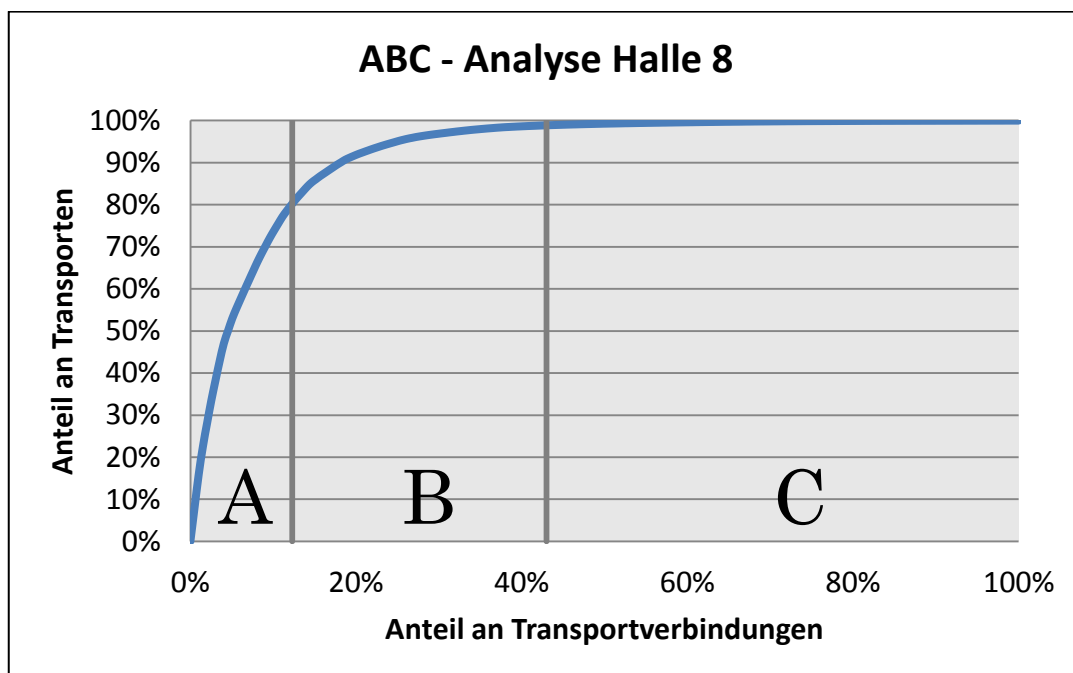


Abbildung 3-62: ABC-Analyse Halle 8

Die ABC-Analyse zeigt, dass nur 12% aller aufgetretenen Transportverbindungen für 80% des Gesamttransportaufwandes verantwortlich sind (A-Transporte) und 44% der Transportmöglichkeiten bereits 99% aller Transportaufwendungen ausmachen (B-Transporte). Die ermittelten A-Transporte werden für die Optimierung des Hallenlayouts herangezogen. Dies wird durch die Randbedingung erschwert, dass die Aufträge nur an zwei Stellen im System das Hallenschiff wechseln können. Dadurch wird eine automatisierte Erstellung des neuen Layouts via Programmierung ineffizient, weswegen das Problem händisch gelöst wird. Die Kanstahlprüfungsanlage („Kantstahl_PK“) soll auch im neuen Layout an ihrem derzeitigen Standort belassen werden.

Im ersten Schritt wird das Schmigalla-Verfahren auf alle A-Transporte angewandt:

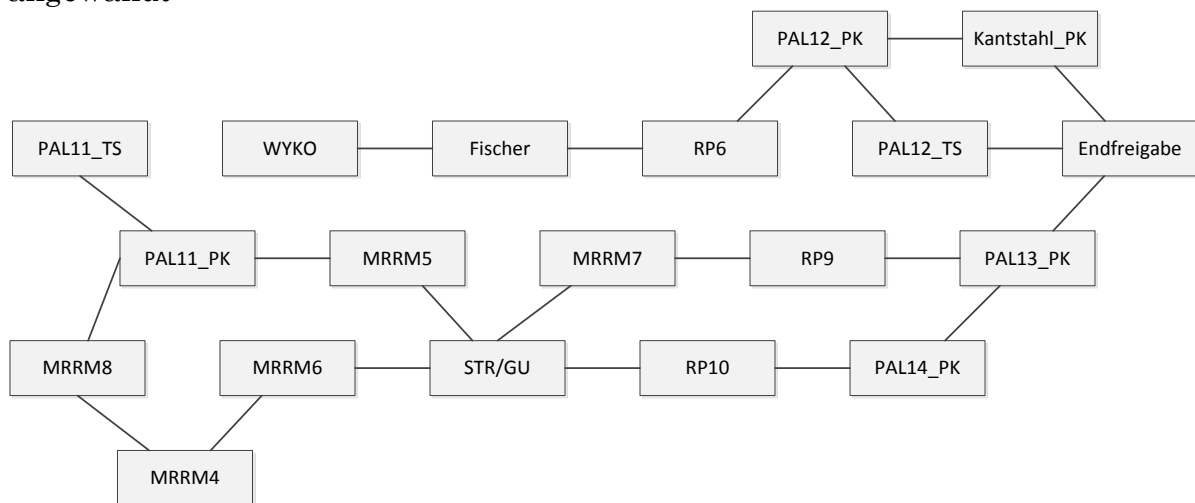


Abbildung 3-63: Schmigalla-Verfahren: 1. Schritt

Darauf basierend wird die Struktur an die Rahmenbedingungen der Halle angepasst:

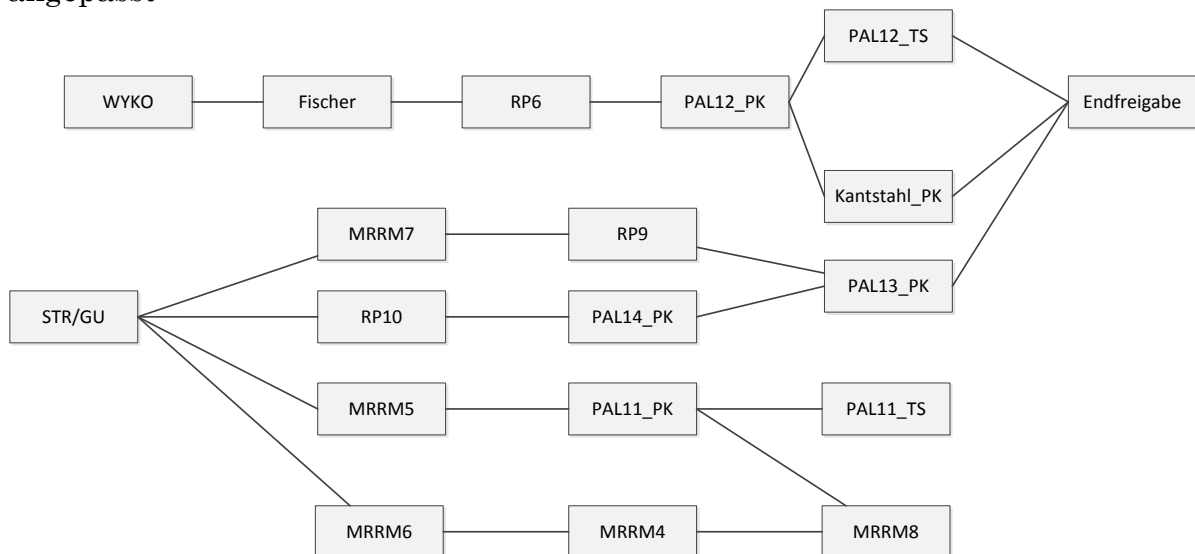


Abbildung 3-64: Schmigalla-Verfahren: 2. Schritt

Die Anpassung der erhaltenen Struktur durch Berücksichtigung der tatsächlichen Einzelstations-Abmessungen liefert das sogenannte „Grüne-Wiese-Layout“. In **Abbildung 3-65** ist der Unterschied zwischen Ist-Layout und dem entwickelten Optimal-Layout durch die Anzeige der A-Transportverbindungen deutlich zu erkennen. Die Materialflüsse sind jetzt linearer gestaltet und aufwendige Hallenschiffwechsel werden so weit wie möglich vermieden.



Abbildung 3-65: Ist-Layout (oben) und Grüne-Wiese-Layout (unten)

Qualifikationsmatrix (S1)

Im Programmiercode der Variante S1 wird die ausgearbeitete, auf historischen Daten beruhende Qualifikationsmatrix hinterlegt. Damit entsteht der Zusammenhang der Mitarbeiter mit den Einzelstationen. Weiters wird der ebenfalls auf historischen Daten beruhende Mitarbeiter-Schichtplan implementiert.

Anpassung des Schichtkalenders (S2)

Die Anpassung des Schichtkalenders wird durch Umstrukturierung des Mitarbeiterschichtkalenders zur Vermeidung von Ressourcenverschwendung

durchgeführt. Als fixe Basis gilt die Qualifikationsmatrix, die auch in Variante S1 verwendet wird. Es handelt es sich um ein kombinatorisches Problem, welches sich aufgrund der hohen Mitarbeiter- und Einzelstations-Anzahl nicht mehr effizient händisch lösen lässt. Zu diesem Zweck kommt ein sogenannter genetischer Algorithmus zum Einsatz. Dieser orientiert sich dabei an der natürlichen Evolution. Auch in der Natur überleben jene Lebewesen, die sich am meisten an die gegebenen Rahmenbedingungen anpassen können. Diese Lebewesen entwickeln sich so von Generation zu Generation weiter, dass eine ständige Verbesserung der Anpassung an die Natur erfolgt. Genetische Algorithmen bedienen sich dieser Idee. So wird eine definierte Menge zufälliger Startlösungen generiert (Startpopulation). Diese Startlösungen (Individuen) werden dann auf ihre Fitness überprüft, d.h. es wird durch eine zuvor festgelegte Zielfunktion der jeweilige Fitnesswert einer jeden Startlösung berechnet. Es haben nun jene Individuen eine höhere Überlebenschance, die einen entsprechend hohen Fitnesswert aufweisen. Diese Lösungen werden nun mutiert und/oder miteinander gekreuzt. Diese so entstandene neue Generation von Lösungen ist die erste Kindergeneration. Die Lösungen dieser Kindergeneration werden wiederum durch die Fitnessfunktion bewertet und der Prozess beginnt von vorne. Dies bedeutet, dass durch die ständige Anpassung immer bessere Lösungen entstehen, die sich selbst weiter optimieren. Bei der Verwendung genetischer Algorithmen ist jedoch stets darauf zu achten, dass die entwickelten Lösungen nicht nur ein lokales Optimum anstreben. Dieser Problematik ist auch selbst oft wieder Gegenstand einer Optimierung mittels genetischer Algorithmen.

Für die Optimierung des Mitarbeiter-Schichtkalenders wird ein eigenes Simulationsmodell in Plant Simulation entwickelt, dessen Arbeitsweise hier kurz vorgestellt werden soll. In Abbildung 3-66 sind Ausschnitte der drei Matrizen zu sehen, die die Grundlage der Optimierung darstellen: Schichtkalender der Einzelstationen, Mitarbeiter-Schichtkalender, Qualifikationsmatrix (v.l.n.r.). Der Mitarbeiter-Schichtkalender stellt den Stellparameter der Optimierung dar. Er gibt an, welcher Mitarbeiter (Personalnummer) in welcher Schicht arbeitet (Früh-, Mittag-, Nachtschicht). Durch Zuhilfenahme der Qualifikationsmatrix kann daher der Einzelstations-Schichtkalender erstellt werden, der Aussage darüber gibt, in welcher Schicht generell welche Einzelstationen bedient werden können. Die Zielfunktion des genetischen Algorithmus soll daher folgendermaßen aussehen:

- Maximierung der Matrix-Einträge im Einzelstations-Schichtkalender unter Berücksichtigung folgender Rahmenbedingungen in der Fitnessfunktion:
 - Früh- und Mittagsschichten sind generell Nachtschichten vorzuziehen.
 - Es ist eine Priorisierung der Einzelstationen durch eine Bewertungsmatrix hinterlegt, d.h. die Einträge des Einzelstations-Schichtkalender werden durch die Zielfunktion unterschiedlich bewertet.
 - Es darf maximal die gleiche Anzahl an Schichten verwendet werden, wie im Ist-Simulationsmodell.

The image shows three spreadsheets side-by-side, each representing a different matrix used in a genetic algorithm. Each spreadsheet has a grid with rows and columns. The first spreadsheet, titled '.Modelle.Netzwerk.SK_Maschinen', has columns labeled 'string 0', 'string 1', 'string 2', and 'string 3'. The second, '.Modelle.Netzwerk.SK_Arbeiter', has columns labeled 'string 0', 'string 1', 'string 2', and 'string 3'. The third, '.Modelle.Netzwerk.Qualifikation', has columns labeled 'string 0', 'string 13', 'string 14', and 'string 15'. Each spreadsheet has a vertical label 'Pers. Nr.' on the left side of the grid, indicating the person number for each row.

Abbildung 3-66: Drei Matrizen als Grundlage des genetischen Algorithmus

Dem genetischen Algorithmus werden die in Tabelle 3-11 ersichtlichen Parameter hinterlegt.

Tabelle 3-11: Parameter des genetischen Algorithmus

Generationsgröße	50
Anzahl der Generationen	10
Crossover-Wahrscheinlichkeit	0.5
Mutations-Wahrscheinlichkeit	0.1

Die Evolution der Individuen über die Generationen wird in Abbildung 3-67 dargestellt. Zu sehen ist je der Fitnesswert der schlechtesten, der durchschnittlichen und der besten Lösung. Die Ergebnisse der besten Lösung der 10. Generation werden schlussendlich in die Programmierung der Variante S2 aufgenommen.

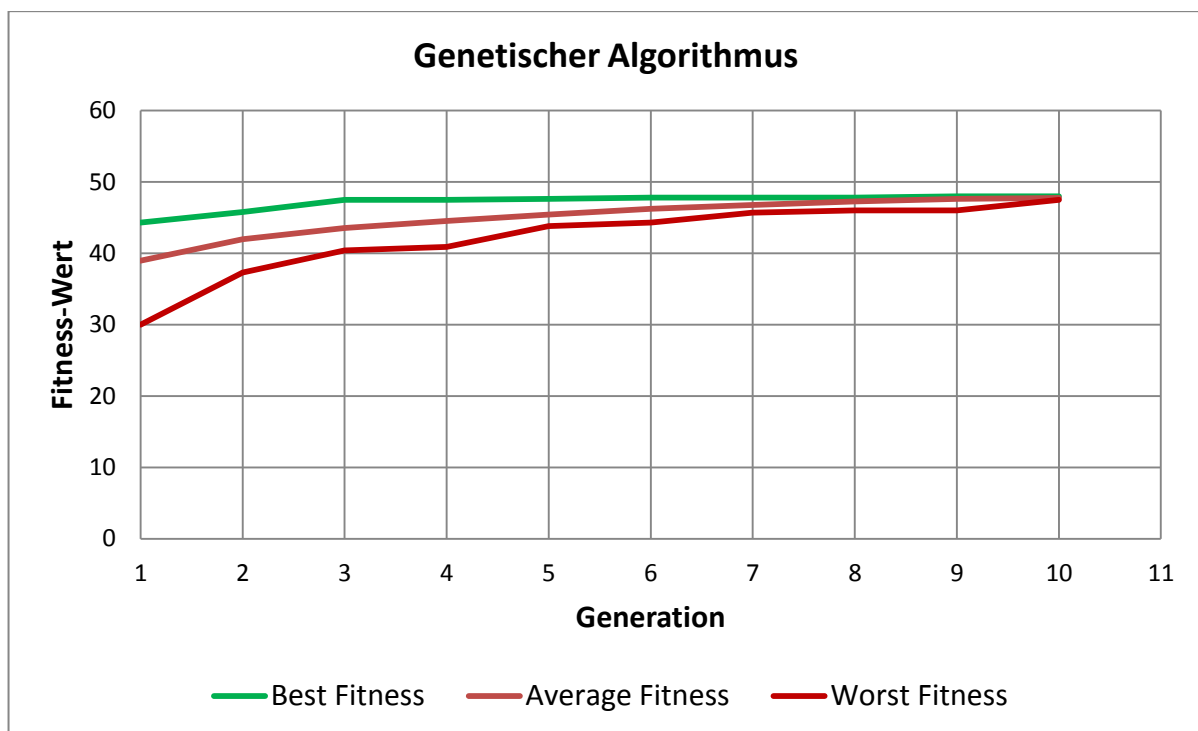


Abbildung 3-67: Entwicklung der Individuen des genetischen Algorithmus

Eliminierung des Qualifikations-Engpasses (S3)

Durch Variante S3 soll das Gesamtoptimierungspotential durch Mitarbeiterqualifikation quantifiziert werden. Deswegen wird eine vollständig ausgefüllte Qualifikationsmatrix implementiert. Als Mitarbeiter-Schichtkalender wird wie in Variante S1 der historische Schichtkalender herangezogen. Die Ergebnisse dieser Optimierungsvariante sind daher ausschließlich auf einen etwaigen Qualifikationsengpass zurückzuführen.

4 Auswertung der Ergebnisse

Grundsätzlich ist es bei jeder Simulationsstudie wichtig einschätzen zu können, welche Aussagekraft man den erhaltenen Ergebnissen beimessen kann. Die Modellierung eines Systems wird ungleich schwieriger, je flexibler das System ist. Diese Flexibilität ist nämlich in der Regel schwer in logische Ablaufstrukturen zu fassen und somit ein Hindernis bei der Erstellung des Programmiercodes. Da sich das vorliegende System – wie am Beginn der Arbeit erläutert – am Ende der Wertschöpfungskette von Böhler Edelstahl befindet, werden alle Verzögerungen und unplanmäßigen Eigenheiten der zuvor ablaufenden Prozesse auf das Zielsystem übertragen und müssen dort kompensiert werden. Diese Kompensation kann nun nur durch eine hohe Systemflexibilität erfolgen.

Auch wenn die Validierung des Simulationsmodells äußerst zufriedenstellend erscheint, muss an dieser Stelle noch einmal deutlich gesagt werden, welche Schlüsse tatsächlich aus den erhaltenen Ergebnissen gezogen werden können.

Folgende Aussagen werden als zulässig erachtet:

- Das Simulationsmodell und seine Simulationsexperimente eignen sich vor allem zum Aufzeigen und Quantifizieren von Optimierungspotentialen. Dies ermöglicht in weiterer Folge eine gezielte Auseinandersetzung mit sinnvollen Investitionsbereichen.
- Das Simulationsmodell eignet sich ebenfalls dazu Systemschwachstellen aufzuzeigen.
- Der Vergleich der implementierten Optimierungsvarianten untereinander ist absolut zulässig. Es kann daher ein Ranking der Varianten nach ihrer Effizienz erstellt werden.

Es ist jedoch nicht zulässig, die erhaltenen Ergebnisse als exakte Vorhersage von Leistungskennzahlen wie Liefertreue oder Durchlaufzeiten zu verstehen. Die hohe Flexibilität des Realsystems würde derartige Aussagen unseriös machen.

Um die statistischen Schwankungen der Ergebnisse besser einschätzen zu können, werden für jedes Simulationsexperiment 10 Simulationsläufe (jeweils unterschiedliche Simulationsergebnisse durch Verwendung von sogenannten Pseudozufallszahlen als Seed-Werte stochastischer Prozesse) durchgeführt. Da die im Weiteren diskutierten Ergebnisse (Liefertreue, Durchlaufzeit, Bestände, usw.) nur geringfügig innerhalb einer Variantenkombination schwanken, ist es zulässig für weitere Betrachtungen die jeweiligen Mittelwerte dieser 10 Simulationsläufe heranzuziehen. Abbildung 4-1 stellt die Überprüfung der statistischen Schwankungen und die folgende Berechnung der Mittelwerte grafisch dar. Dieser Vorgang wird für jede Variantenkombination durchgeführt.

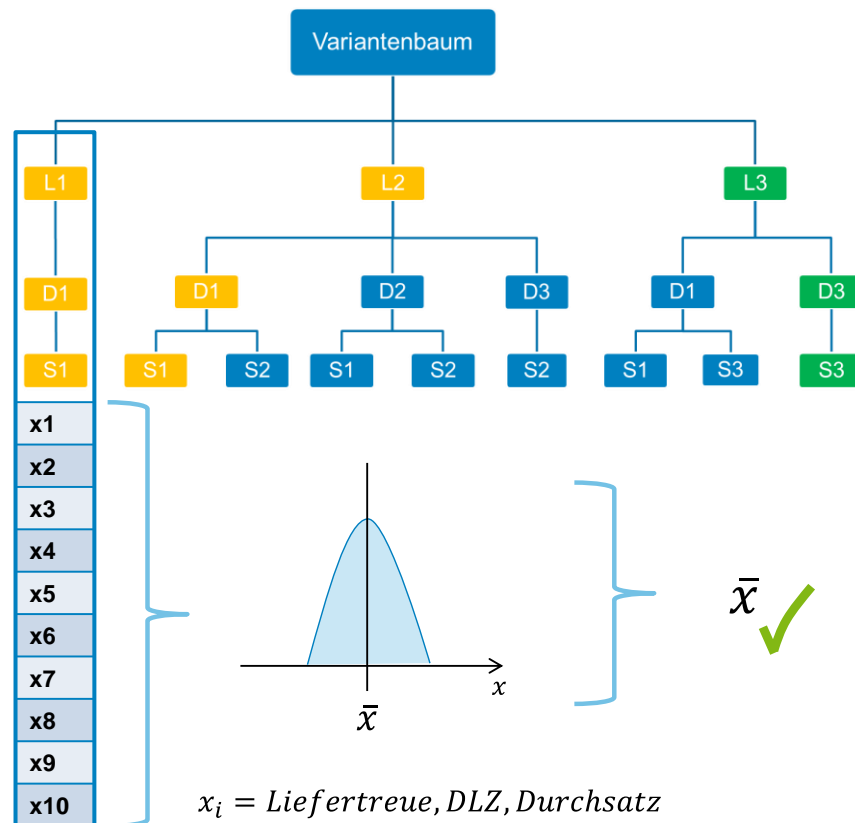


Abbildung 4-1: Überprüfung der statistischen Schwankungen

Der Zweck der Simulation ist es, in einem iterativen Prozess den optimalen Systemzustand in Hinblick auf

- Liefertreue
- Durchlaufzeiten
- Durchsatzleistung

herzustellen. Die Einzelvarianten wurden dabei dahingehend entwickelt um jeweils einen oder mehrere dieser Kennzahlen positiv zu beeinflussen. Die Simulationsergebnisse lassen nun auf das Potential der jeweiligen Varianten schließen und zeigen somit sinnvolle Ansatzpunkte für eventuelle Folgeprojekte oder Investitionsüberlegungen auf.

Weiters wird ein Sankey-Diagramm erstellt, das den tatsächlichen Transportaufwand im System grafisch darstellt.

4.1 Materialflussbetrachtung

Alle Simulationsmodelle (Variantenkombinationen) zeichnen während der Simulationsläufe die Transportaufwendungen in einer Transportmatrix auf. Die Inhalte der Transportmatrix aus Variantenkombination L2D1S1 (Ist-Zustand) werden dann durch Makroprogrammierung und eine Excel – Visio-Schnittstelle zu einem Sankey-Diagramm aufbereitet. Aus Gründen erhöhter Übersichtlichkeit wird dieses auf Basis des Hallenlayouts visualisiert. In Abbildung 4-2 ist das Ergebnis dargestellt. Eine hochauflösende Version wird Böhler Edelstahl digital übergeben.

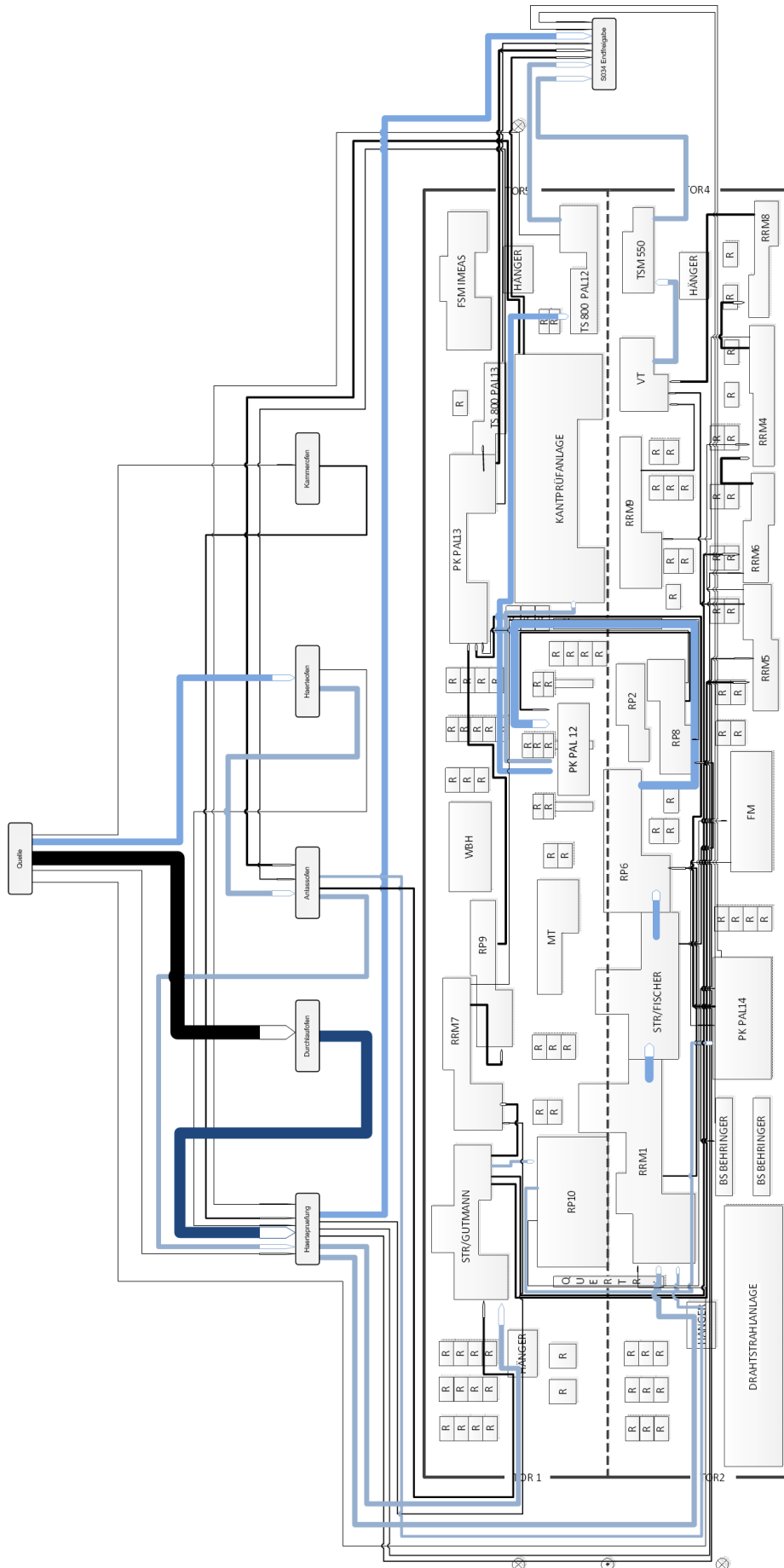


Abbildung 4-2: Sankey-Diagramm des Ist-Zustandes

Dazu ist zu sagen, dass nur jene Transportverbindungen dargestellt werden, deren Anzahl im Betrachtungszeitraum größer gleich dreihundert ist. Die Visualisierung aller weiteren Transportverbindungen würde die Übersichtlichkeit drastisch herabsetzen und wäre daher kontraproduktiv.

Aus dem Materialflussschaubild können nun folgende Schlüsse gezogen werden:

- Der tatsächlich auftretende Materialfluss stimmt in seiner wesentlichen Struktur mit den geplanten Materialflüssen überein. Die geplanten Materialflüsse wurden bereits in Abbildung 3-30 durch ein Sankey-Diagramm dargestellt. Der durch die Simulation abgeleitete tatsächliche Materialfluss zeigt jedoch in einer viel detaillierteren Art die komplexen Verbindungen der Einzelstationen. Dies ist darin begründet, dass bei der Materialflussplanung die Einzelstationen oft nur als Gruppen berücksichtigt werden.
- Es gibt zahlreiche unterschiedliche Transportverbindungen die hauptsächlich in Hallenschiff B verlaufen.
- Es tritt ein stark erhöhter Materialfluss über den Querverschiebewagen 2 auf, was primär auf eine hohe Prüfkaktivität an Prüfstation „PAL12_PK“ zurückzuführen ist. Die Verwendung des Querverschiebewagens stellt eine vergleichsweise sehr zeitintensive Tätigkeit dar.
- Es gibt zahlreiche unterschiedliche „letzte“ Einzelstationen im System Halle 8 bevor die Aufträge entweder in das Zentrallager oder den Versand transportiert werden.

Die Visualisierung der Materialflüsse wurde zum einen gewünscht, um die tatsächlichen Verbindungen und deren Transportintensitäten erkennbar zu machen und so einen guten Überblick über die Abläufe im System zu bekommen. Ebenso wird durch ein detailliertes Sankey-Diagramm eine fundierte Grundlage für prozessbezogene Diskussionen unter Kollegen geschaffen und auch betriebsferneren Personen kann ein schneller und einprägsamer Eindruck des Systems vermittelt werden.

4.2 Einfluss auf die Liefertreue

Als primäres Ziel der Masterarbeit wurde zu Beginn die Entwicklung von Optimierungsvarianten zur positiven Beeinflussung der Liefertreue festgelegt. Bei jeder Modellvariante wird nun beim Eintritt eines Auftrages in die Senke überprüft, ob dieser auch rechtzeitig das System verlassen konnte. Ein Auftrag gilt nach Regelung von Böhler Edelstahl dann als pünktlich, wenn er spätestens fünf Tage nach dessen vorgesehenem Liefertermin ankommt. Die Berechnung wurde bereits auf Seite 56 näher erläutert. Die Liefertreue wird durch den Programmcode monatlich berechnet und ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse der einzelnen Variantenkombinationen als blaue Balken illustriert. Ebenfalls dargestellt ist die monatliche Statistik der historischen Daten („IST“). Zu sehen ist, dass der generelle Verlauf der Ist-Kurve sehr gut mit den Entwicklungen der unterschiedlichen Variantenkombinationen korreliert. Dies spricht wiederum für eine gutes Abbildungsniveau der Simulationsmodelle.

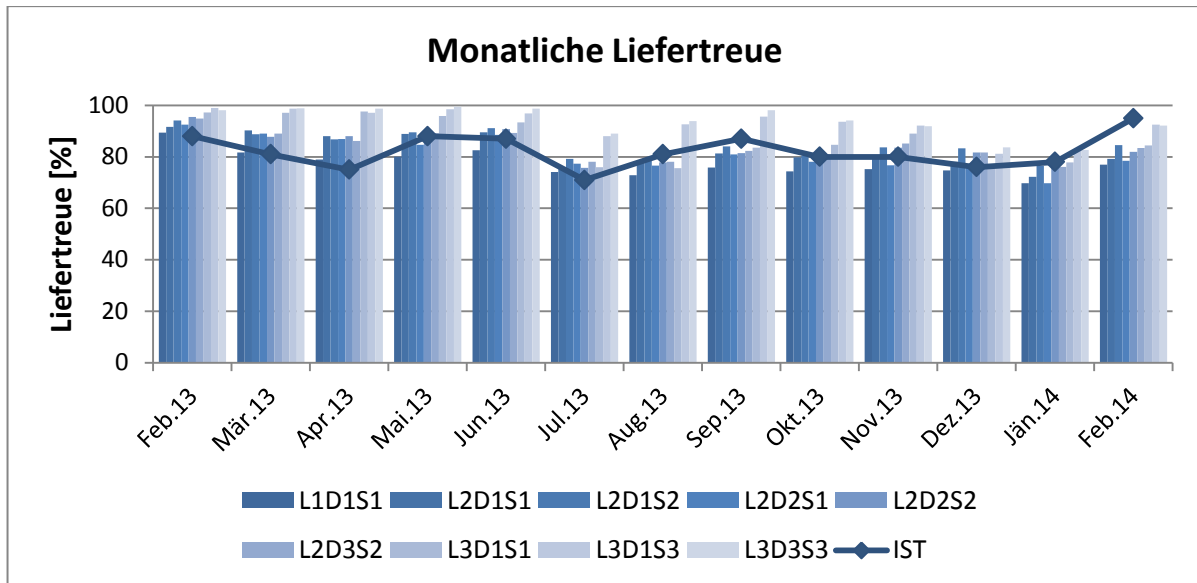


Abbildung 4-3: Monatliche Liefertreue

Eine etwas übersichtlichere Darstellung wird in Abbildung 4-4 gezeigt. Es wird für jede Variante die gewichteten Mittelwerte gemäß Gl. 4-1 gebildet. Als Gewichte w_i werden dabei die Anzahl der monatlich gelieferten Aufträge verwendet. Dadurch wird die Liefertreue auftragsintensiver Monate bei der Durchschnittsbildung stärker berücksichtigt als auftragsschwache Monate. Die rote Linie markiert dabei die durchschnittliche Liefertreue des Realsystems, die sich auf 82,1% beläuft.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Gl. 4-1

Bei etwas näherer Betrachtung kann man folgern,

- dass vor allem die beiden Variantenkombinationen, die die Variante S3 („Eliminierung des Qualifikations-Engpasses“) implementiert haben (in der Abbildung ganz rechts) bei weitem die besten Ergebnisse bezüglich der Liefertreue erzielen können.
- dass jene Variantenkombination, die den Ist-Zustand darstellt (L2D1S1) den tatsächlichen Ist-Wert um nur 0,1% verfehlt.
- dass die Variante S2 („Optimierung des Schichtkalenders“) in jenen Variantenkombinationen deren Bestandteil sie ist positive Auswirkungen aufweisen konnte.
- dass die Verwendung eines Pater-Noster-Systems eine Verbesserung von etwa 4% bezogen auf den Ist-Zustand bewirkt.

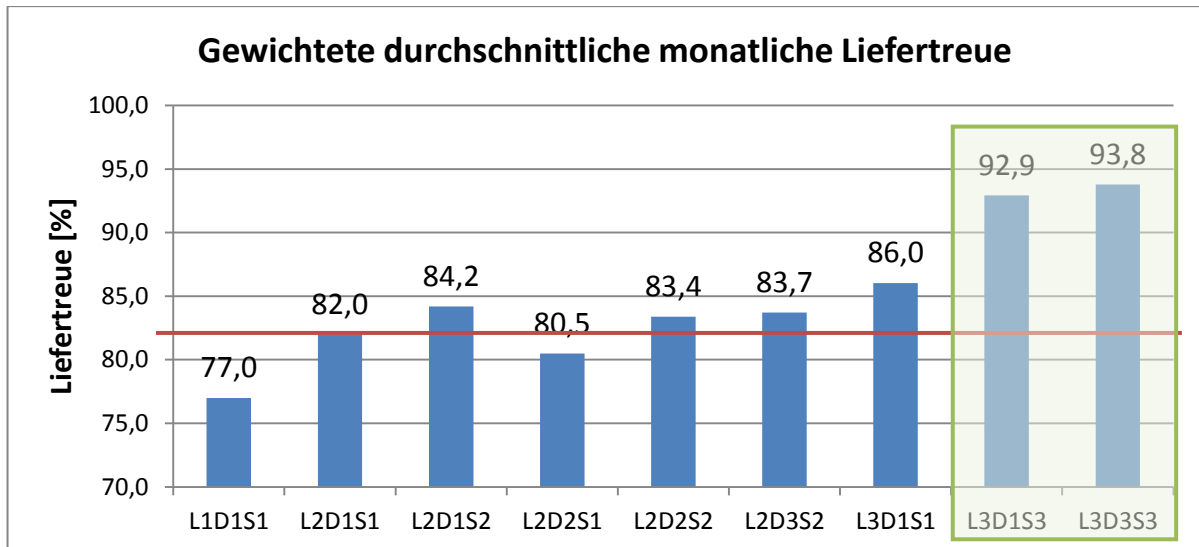


Abbildung 4-4: Gewichtete durchschnittliche Liefertreue

Eine andere Darstellung der Ergebnisse liefert Abbildung 4-5. Dabei ist gut ersichtlich, dass eine Ein- und Auslagerung nach dem Zufallsprinzip eine drastische Verschlechterung der Liefertreue um mehr als 6% bewirken. Die beiden S3-Varianten schneiden im Gegensatz dazu um ca. 13-14% besser als der aktuelle Ist-Prozess ab.

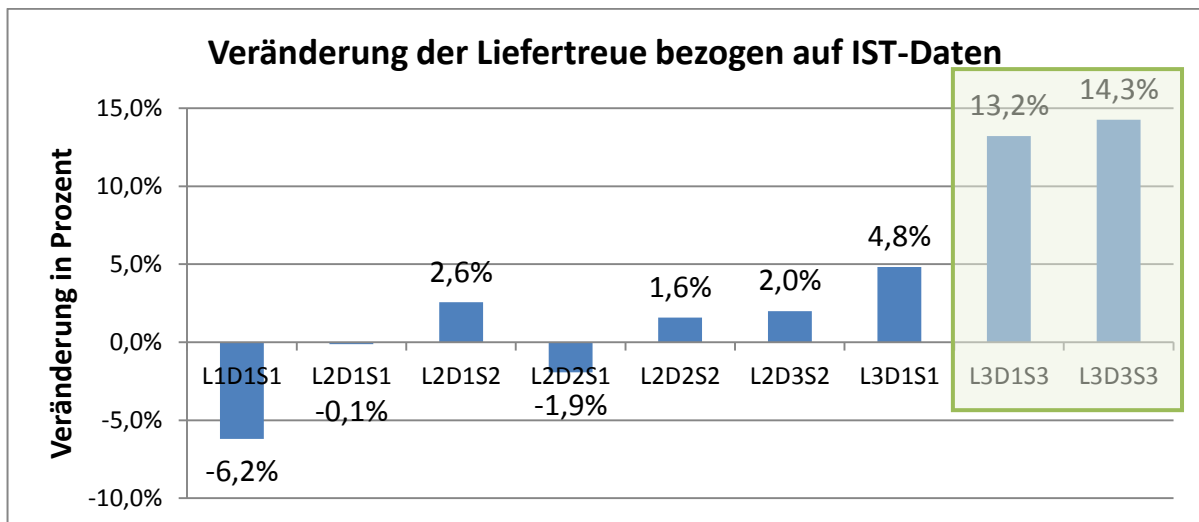


Abbildung 4-5: Relative Veränderung der gemittelten Liefertreue bezogen auf den Ist-Zustand

4.3 Einfluss auf die Durchlaufzeit

Auch bei der Betrachtung der Durchlaufzeit soll zuerst der monatliche Verlauf aller neun Variantenkombinationen überprüft werden. Durch die Darstellung der monatlich gemittelten Durchlaufzeiten in Abbildung 4-6 können folgende Aussagen getätigt werden:

- Die Durchlaufzeiten aller Simulationsvarianten liegen im überwiegenden Zeitbetrachtungsraum knapp unterhalb der historischen Daten.

- Nach einer kurzen Simulationseinschwingphase (~ bis Februar 2013) stimmt der Verlauf der Ist-Durchlaufzeitenkurve sehr gut mit dem Durchlaufzeiten-Verlauf der Simulationsmodelle überein. Auch die Spitzen im Sommer (Juli und August 2013) und im Winter (Jänner 2014) werden in den Modellvarianten abgebildet.

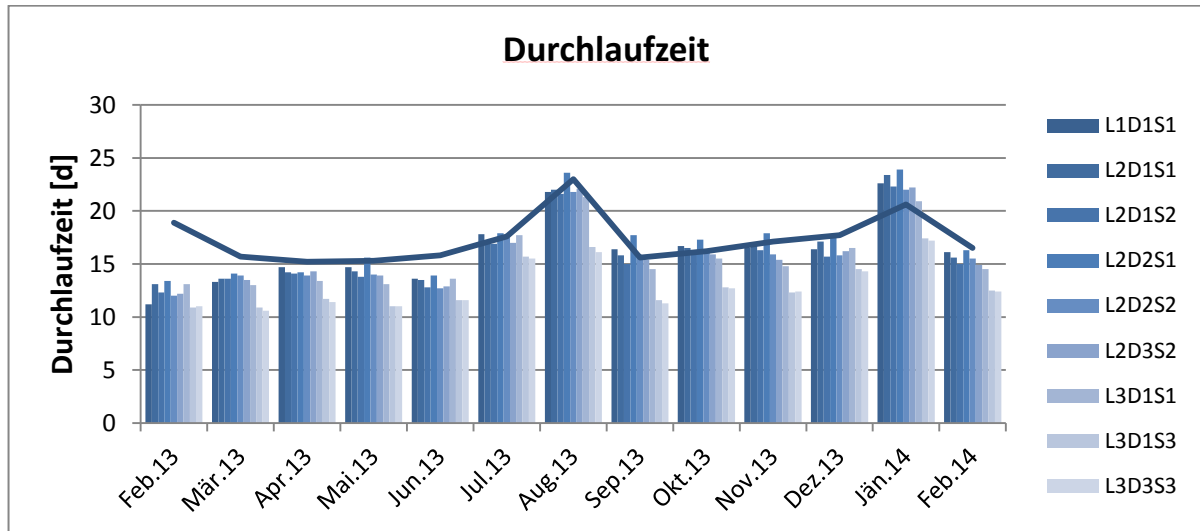


Abbildung 4-6: Monatlich gemittelte Durchlaufzeit

Nach Betrachtung der monatlichen Entwicklung soll nun die Berechnung einer gemittelten monatlichen Durchlaufzeit einen besseren Gesamtüberblick über die erreichbaren Werte ermöglichen:

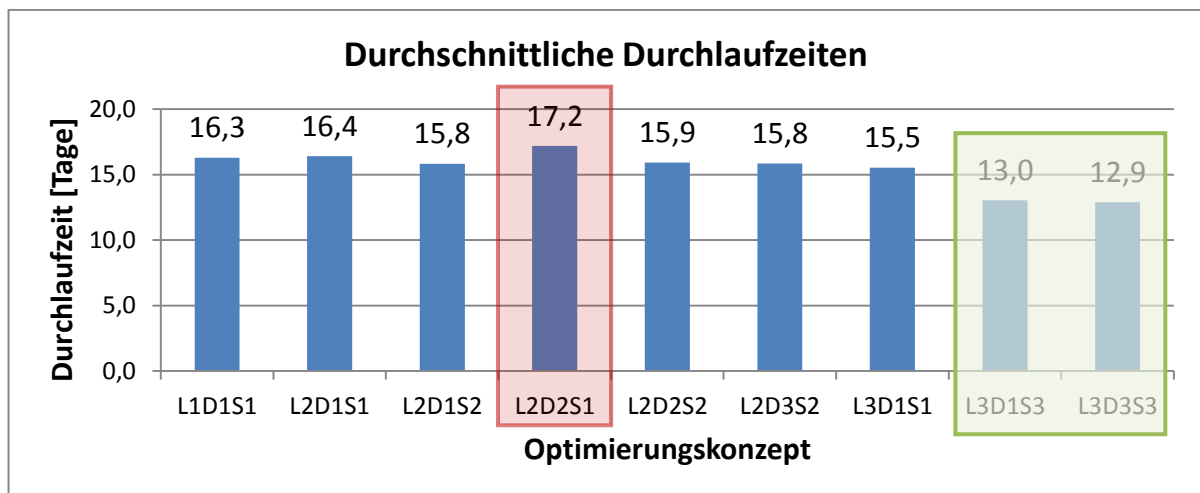


Abbildung 4-7: Durchschnittliche Durchlaufzeiten

Wiederum zeigt sich, dass die effizientesten Simulationsmodelle die Variantenkombinationen L3D1S3 und L3D3S3 sind. Dies sind dabei die einzigen zwei Kombinationen, die die Variante S3 beinhalten. Der Wegfall des Qualifikationsengpasses bedeutet im Vergleich zum Ist-Modell L2D1S1 eine Differenz von etwa 3 Tagen. Das schlechteste Ergebnis bezüglich der Durchlaufzeit liefert die Variantenkombination L2D2S1. Eine Erklärung dafür wird durch eine Faktorenanalyse möglich und in Kapitel 4.5 geliefert.

4.4 Einfluss auf die Durchsatzleistung

Wie bereits bei der Analyse der Liefertreue und Durchlaufzeit soll auch hier zuerst eine Darstellung des zeitlichen Verlaufes gegeben werden (Abbildung 4-8). Bis auf einen kleinen Zeitraum im Herbst (ab ca. KW 41) stimmen auch hier die Kurven der Simulationsmodelle gut mit den historischen Daten überein. Die Struktur des Kurvenverlaufes ist dabei bei allen Simulationsvarianten sehr ähnlich. Ebenfalls ersichtlich sind das Sommer- und Weihnachtsloch. Im Realsystem wurde zu diesen Zeitpunkten an manchen Einzelstationen ein stark reduzierter Betrieb aufrecht gehalten, was jedoch nicht in die Simulationsmodelle implementiert wurde (Betriebsurlaub). Die Auswertungen berücksichtigen diese Zeitpunkte deshalb durch deren Ausschließen bei der Durchschnittsbildung.

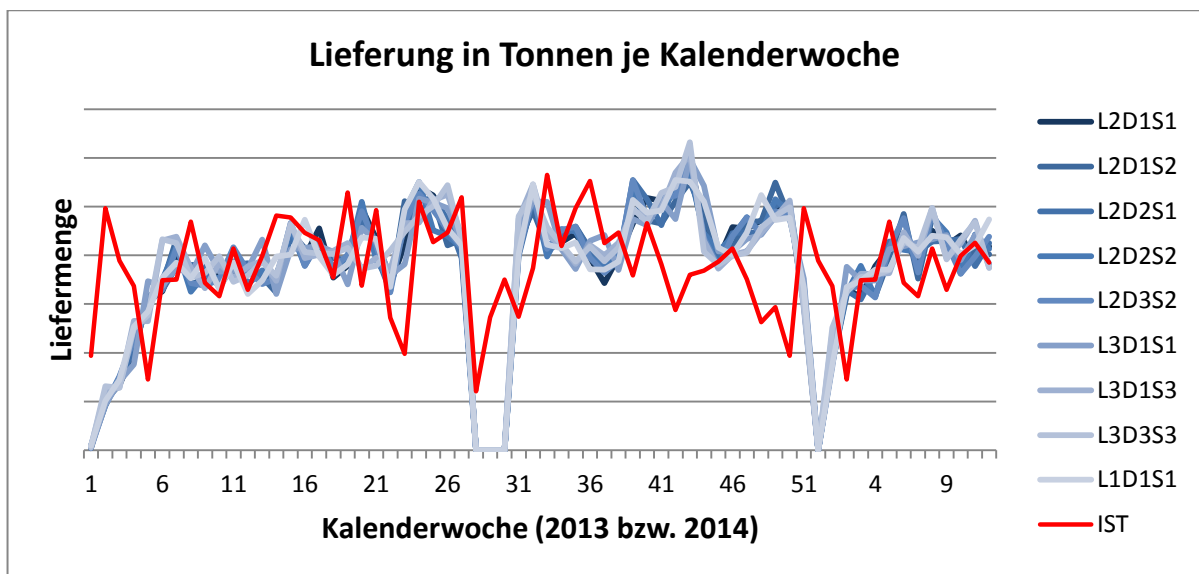


Abbildung 4-8: Wöchentlicher Durchsatz

Wiederum weisen die unterschiedlichen Kurvenverläufe noch geringe quantitative Aussagekraft auf, weswegen wiederum Durchschnittswerte gebildet werden:

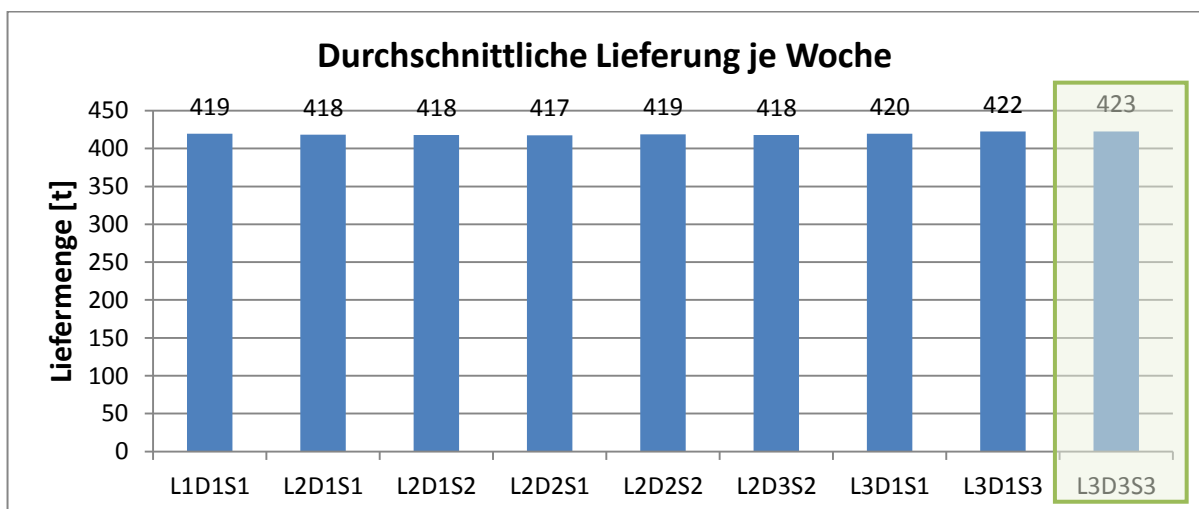


Abbildung 4-9: Durchschnittlicher Durchsatz je Woche

Diese Darstellung lässt nun erkennen, dass sich im Bereich der Durchsatzleistung nur marginale Unterschiede zwischen den Optimierungskonzepten ergeben. Die Differenz zwischen dem besten (L3D3S3, 423 t/KW) und dem schlechtesten (L2D2S1, 417 t/KW) beträgt lediglich 6t pro Kalenderwoche, was ein vernachlässigbarer Wert ist. Die weiter oben besprochene deutliche Verringerung der Durchlaufzeit durch S3 bewirkt ebenfalls keine Auswirkung auf die Durchsatzleistung. Die Auswirkung zeigt sich jedoch in einer signifikanten Reduktion der Bestände um durchschnittlich 23% (L2D1S1 auf L3D3S3).

4.5 Beurteilung der Ergebnisse

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erläutert, ist es wichtig, den exakten Werten der Simulationsergebnisse nicht einen zu hohen Stellenwert beizumessen. Bedingt durch die Komplexität und Flexibilität des Realsystems müssen die Ergebnisse – auch bei dem erreichten hohen Abbildungsniveau der Simulationsmodelle – als mathematisch und analytisch sehr gut abgeschätzte Bewertungen von Optimierungspotentialen gesehen werden. Eine seriöse Quantifizierung konnte aufgrund der hohen Systemkomplexität und Flexibilität nur durch eine Simulationsstudie erreicht werden. Abschließend soll nun eine zusammenfassende Bewertung der Optimierungspotentiale erfolgen.

Da das vorrangige Ziel der Untersuchungen eine Erhöhung der Liefertreue darstellt, wird nun der Einfluss jeder Simulationsvariante auf diese Zielgröße extrahiert. Dabei wird als Basis stets die Variantenkombination L2D1S1 herangezogen, da diese das aktuelle Ist-System darstellt. Dieses Simulationsmodell weist eine gewichtete durchschnittliche Liefertreue von 82,0% auf. In Abbildung 4-10 wird diese Liefertreue als 0-Niveau festgesetzt.

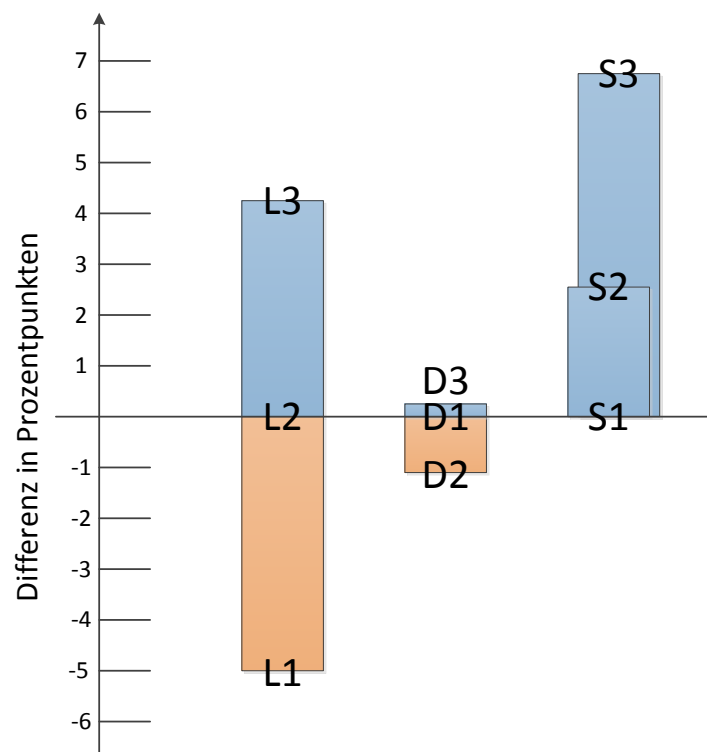


Abbildung 4-10: Analyse der Optimierungsvarianten

Die Bewertung der Varianten erfolgt nun dadurch, dass man von einer Variantenkombination ausgehend stets nur eine Variante ändert und dann die Auswirkung auf die Zielgröße bestimmt. Beim Vorliegen mehrerer Ergebnisse wird der Mittelwert gebildet. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden:

Es soll der Einfluss der Varianten S2 des Paketes „Schichtmodelle & Qualifikationen“ bestimmt werden. Zuerst werden jene Simulationsmodelle gesucht, die sich lediglich durch die Komponente S2 unterscheiden. Dies sind in diesem Fall die Variantenkombinationen L2D1S1 („Ist-Modell“) bezogen auf L2D1S2 und L2D2S1 bezogen auf L2D2S2. Es werden daher folgende Differenzen gebildet:

$$LT_{L2D1S2} - LT_{L2D1S1} = 84,2 - 82,0 = 2,2 \quad \text{Gl. 4-2}$$

$$LT_{L2D2S2} - LT_{L2D2S1} = 83,4 - 80,5 = 2,9 \quad \text{Gl. 4-3}$$

Nun wird der Mittelwert dieser beiden Zahlen gebildet.

$$\text{Einfluss}_{S2} = \frac{2,2 + 2,9}{2} \approx 2,5 \quad \text{Gl. 4-4}$$

Die Implementierung der Variante S2, d.h. die Optimierung des Mitarbeiter-Schichtkalenders, wird mit einer Verbesserung der Liefertreue um etwa 2,5 Prozentpunkte bewertet. Dieses Ergebnis wird in Abbildung 4-10 dargestellt. Dieselbe Berechnung erfolgt auch für alle anderen Varianten. Diese Darstellung erlaubt dadurch eine kompakte visuelle Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse des Masterarbeitsprojekts.

Die so berechneten und oben illustrierten Ergebnisse können auch in Tabellenform in einem Ranking von der sinnvollsten bis zur wenigsten sinnvollen Variante gereiht werden:

Tabelle 4-1: Bewertung der Varianten bezogen auf den Ist-Zustand

S3	6,9
L3	4,1
S2	2,5
D3	0,2
D2	-1,1
L1	-5

Neben all den oben besprochenen Teilergebnissen können nun bezogen auf die Zielgröße „Liefertreue“ folgende Key-Statements formuliert werden:

- Die Qualifikationen der Mitarbeiter stellen einen Engpass dar und sollten weiter ausgebaut werden. Der Vorteil dieser Optimierungsrichtung ergibt sich vor allem dadurch, dass die Investition kontinuierlich erfolgen kann und sich daher als äußerst risikoarm darstellt. Das Ergebnis von +6,9% der Liefertreue muss jedoch als absolute Obergrenze des maximal Möglichen gesehen werden und nicht als durch realistische Zusatzqualifikationen erreichbares Ziel. Es handelt sich wie bei den anderen Ergebnissen um die Quantifizierung eines Potentials.

- Die Investition in „Pater-Noster-Systeme“ wird mit einer Liefertreuen-Verbesserung von +4,1% bewertet. Dies stellt eine drastische Verbesserung dar und kann somit Thema eines detaillierten Investitionsprojektes sein. Dabei müssen die vergleichsweise hohen Investitionskosten daher der konkreten Kostenersparnis gegenübergestellt werden.
- Bei der Mitarbeiter-Schichtplangestaltung sollte stets darauf geachtet werden, dass in jeder Schicht genügend qualifizierte Mitarbeiter zur Verfügung stehen. In der Simulation konnte durch die Schichtplanoptimierung ein Potential von +2,5% festgestellt werden.
- Die Entwicklung eines Optimal-Layouts brachte nicht die erhofften Ergebnisse. Es konnte lediglich ein vernachlässigbares Potential von +0,2% festgestellt werden. Dies ist dadurch begründet, dass der Transportanteil der Aufträge einen äußerst geringen relativen Anteil an der Gesamtdurchlaufzeit aufweist und eine Verbesserung in diesem Segment daher kaum messbare Erfolge erzielen kann.
- Die rein bestandsorientierte Materialflussgestaltung ist nicht zielführend. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass die neue Route nicht auf den vorliegenden Schichtplan abgestimmt ist und sich die Wartezeiten der Aufträge noch zusätzlich erhöhen.

5 Zusammenfassung

Die Materialflusssimulation zeigte sich im vorliegenden Projekt als effektives Werkzeug um die komplexe Systemstruktur abbilden und analysieren zu können. Die Ergebnisse sind wissenschaftlich abgeschätzte Bewertungen von Optimierungspotentialen, die richtungsgebend für folgende Investitionsprojekte sein können. Vor allem die weitere Qualifikation von bestehenden Mitarbeitern und die Implementierung eines neuen Lagersystems stellen sich als besonders vielversprechende Möglichkeiten dar um das System noch leistungsfähiger zu gestalten. Ebenso können durch optimierte Schichtplangestaltung bereits vorhandene Ressourcen noch effizienter genutzt werden. Aus diesem Grund würde es sich anbieten, hier Folgeprojekte mit der detaillierten Aufarbeitung dieser Thematiken zu initiieren.

Neben dieser Optimierungspotential-Analyse war es auch Anspruch der Arbeit, die Komplexität des Systems durch eine detaillierte Ist-Analyse etwas greifbarer zu machen. Die umfassende Datenaufbereitung zu Beginn des Projektes stellt daher nicht nur den benötigten Simulationsmodell-Input dar, sondern ebenso eine strukturierte Analyse der System- und Auftragseigenschaften. Die Visualisierung der Materialflüsse von Ist- und Planprozessen in den Sankey-Diagrammen ermöglicht schlussendlich noch die Visualisierung der dem System zugrundeliegenden Produktionsprozesse.

Die Arbeit versteht sich somit zusammenfassend als Aufarbeitung eines komplexen Produktionssystems mit möglicherweise gestalterischem Charakter.

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

[AF09] Arnold, D., & Furmans, K. (2009). *Materialfluss in Logistiksystemen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[BÖH14a] Böhler Edelstahl GmbH & Co KG. (2011). Abgerufen am 2. Dezember 2014 von www.boehler-edelstahl.com

[BÖH14b] Böhler Edelstahl GmbH & Co KG. (2014). *Pressemappe*. Kapfenberg.

[DIN25424] DIN 25424. (1982). *Fehlerbaumanalyse*. Berlin: Beuth.

[DIN66001] DIN 66001. (1983). *Sinnbilder für Datenfluß- und Programmablaufpläne*.

[ELE12] Eley, M. (2012). *Simulation in der Logistik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[GRU09] Grundig, C.-G. (2009). *Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*. München: Carl Hanser Verlag.

[GUD12] Gudehus, T. (2012). *Logistik 1* (4. Ausg.). Hamburg, Deutschland: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[HAR90] Hartberger, H. (1990). *Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme. Diss.* TU München.

[KG95] Kosturiak, J., & Gregor, M. (1995). *Simulation von Produktionssystemen*. Wien; New York: Springer-Verlag Wien.

[KUH93] Kuhn, A., Reinhardt, A., & Wiendahl, H.-P. (1993). *Handbuch der Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag.

[KÜH06] Kühn, W. (2006). *Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG.

[KUG13] Kummer, S., Grün, O., & Jammerneegg, W. (2013). *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik* (3 Ausg.). Wien: Pearson.

[PAT92] Patzak, G. (1992). *Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme*. Berlin Heidelberg, New York: Springer-Verlag.

- [RSW08] Rabe, M., Spieckermann, S., & Wenzel, S. (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- [ROP75] Rophol, G. (1975). *Systemtechnik - Grundlagen und Anwendungen*. München, Wien: Hanser Verlag.
- [SIM15a] SimPlan AG. (kein Datum). *Automod - Simulating Reality*. Abgerufen am 1. Januar 2015 von www.automod.de
- [SIM15b] SimPlan AG. (kein Datum). *Demo3D - Systemdesign, Animation*. Abgerufen am 1. Januar 2015 von <https://www.demo3d.de/demo3d.html>
- [STR02] Strohrmann, G. (2002). *Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse: eine Einführung für Techniker und Ingenieure*. München, Wien: Oldenbourg Industrieverlag GmbH.
- [VDI3633] VDI Richtlinie 3633. *Simulation von Logistik- Materialfluss- und Produktionssystemen - Blatt 1 (1993), Blatt 3 (1997), Blatt 5 (1997)*.
- [VOE14] voestalpine AG. (2014). *Überblick*. Abgerufen am 2. Dezember 2014 von www.voestalpine.com

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Marktmix, (nach [BÖH14b]).....	10
Abbildung 1-2: Vereinfachte Prozesskette (nach [BÖH14b])	11
Abbildung 2-1: Das Produktionssystem, (nach [KUG13]).....	13
Abbildung 2-2: Das Produktionssystem Halle 8, (in Anlehnung an [KUG13]) ...	16
Abbildung 2-3: Unterschiedliche Systembetrachtungen (nach [ROP75])	17
Abbildung 2-4: Allgemeine Struktur eines Leistungssystems (Quelle: [GUD12])	20
Abbildung 2-5: Darstellung einer Leistungsstelle (Quelle: [GUD12])	21
Abbildung 2-6: Einfache Systemelemente (nach [GUD12])	21
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung eines Wartesystems (Quelle: [GUD12])	24
Abbildung 2-8: Markov-Kette eines Wartesystems (nach [AF09]).....	26
Abbildung 2-9: Ankunftsprozess, WK der Systemzustände, Bedienprozess (Quelle: [AF09]).....	26
Abbildung 2-10: Markov-Kette für den Zustand $j=0$ (Quelle: [AF09])	27
Abbildung 2-11: NW und NS in Abhängigkeit von ρ im $M M 1$ – Wartesystem (Quelle: [AF09]).....	29
Abbildung 2-12: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Systemen (Quelle: [STR02]).....	30
Abbildung 2-13: Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ für ein konstantes λ (Quelle: [AF09]).....	31
Abbildung 2-14: Markov-Kette der Verfügbarkeit.....	31
Abbildung 2-15: Modellierung materialflusstechnischer Systeme (nach [AF09])	33
Abbildung 2-16: Beispiel-Symbole für Flussdiagramme nach [DIN66001].....	34
Abbildung 2-17: Graphen: a) vollständiger ungerichteter Graph b) vollständiger Digraph c)Schlinge d)Parallelpfeil	35
Abbildung 2-18: Graph eines Produktionssystems (nach [AF09])	35
Abbildung 2-19: Beispiel für Adjazenzmatrix.....	36
Abbildung 2-20: Exemplarische Zusammensetzung einer Fördereinheit FE aus Ladungsträgern und Fördergütern	37
Abbildung 2-21: Exemplarische Darstellung einer Transportmatrix $A(G)$ (nach [AF09]).....	38
Abbildung 2-22: Die Binomialverteilung	40
Abbildung 2-23: Die Poissonverteilung.....	41
Abbildung 2-24: Die stetige Gleichverteilung (Quelle: [AF09])	42
Abbildung 2-25: Dichtefunktion und Verteilungsfunktion der Exponentialverteilung (Quelle: [AF09]).....	43
Abbildung 2-26: Die Normalverteilung.....	43
Abbildung 2-27: Aufsummieren der Transportanzahl	45
Abbildung 2-28: Schmigalla, 1. und 2. Schritt.....	45
Abbildung 2-29: Schmigalla, 3. Schritt	46
Abbildung 2-30: Grundprinzip der Simulationsmethode (nach [KUH93]).....	47
Abbildung 2-31: Klassifizierung diskreter Simulationsmodelle (nach [KG95]) ..	49
Abbildung 2-32: Simulationsaufwand unterschiedlicher Simulationskonzepte (nach: [KÜH06]).....	51
Abbildung 2-33: Beispiel eines Demo3D-Modells (Quelle: [SIM15b]).....	53

Abbildung 3-1: Projektplan.....	54
Abbildung 3-2: Monatliche Liefertreue des Produktionssystems Halle 8.....	56
Abbildung 3-3: Positive Einflussnahme sinkender Bestände auf den ROI, nach [KUG13].....	57
Abbildung 3-4: Mögliche Transportwege der Flachstähle.....	58
Abbildung 3-5: Prozessabfolge Halle 8.....	58
Abbildung 3-6: Gliederung der Datenaufbereitung in zwei Bereiche.....	58
Abbildung 3-7: Datenherkunft	59
Abbildung 3-8: Informationsfluss der IT-Systemlandschaft.....	60
Abbildung 3-9: Monatliche Entwicklung der Auftragslage, 2011-2013.....	62
Abbildung 3-10: Prozentuelle Anteile der Werkstoff-Qualitäten.....	63
Abbildung 3-11: Anzahl der Einzelstäbe pro Auftrag.....	64
Abbildung 3-12: Querschnitte der Flachstähle.....	64
Abbildung 3-13: Streudiagramm: Querschnitt und Stabanzahl je Auftrag	65
Abbildung 3-14: Verrechnetes Gewicht je Auftrag	66
Abbildung 3-15: Spezifische Auswertungen nach Werkstoffqualität	66
Abbildung 3-16: Umformeinheit einer Rollenrichtmaschine	68
Abbildung 3-17: Zwischenlagerung in Rampen	70
Abbildung 3-18: Brückenkran zum innerbetrieblichen Transport	70
Abbildung 3-19: Auftragsbelastung der Bearbeitungsstationen	71
Abbildung 3-20: Aufbereitung der Zeitdaten (nach [KÜH06]).....	72
Abbildung 3-21: Korrelation zwischen Bearbeitungszeit und Stabanzahl am Beispiel MRRM7	73
Abbildung 3-22: Drei Modelle der Bearbeitungszeit-Bestimmung.....	74
Abbildung 3-23: Vorgehensweise bei der Ermittlung einer stochastischen Funktion	75
Abbildung 3-24: Aufteilung der Statistikerfassungszeit in Plant Simulation ...	76
Abbildung 3-25: Verfügbarkeiten leistungsrelevanter Einzelstationen	76
Abbildung 3-26: Streudiagramme zur Zuweisung von Einzelstations-Schichtmodellen.....	77
Abbildung 3-27: Schematische Qualifikationsmatrix als Simulations-Input	79
Abbildung 3-28: Layout Halle 8.....	80
Abbildung 3-29: Vorgehensweise der Materialfluss-Visualisierung.....	81
Abbildung 3-30: Sankey-Diagramm der geplanten Materialflüsse	84
Abbildung 3-31: Vorgehensweise der zweiten Projektphase.....	85
Abbildung 3-32: Stichworte und Notizen zu Systemschwachstellen.....	86
Abbildung 3-33: Gliederung der Stichworte und Statement-Bildung	87
Abbildung 3-34: Optimierungskonzept-Pakete und ihre zugehörigen Optimierungsvarianten	88
Abbildung 3-35: Prinzip der chaotischen Ein- & Auslagerung	89
Abbildung 3-36: Prinzip der prioritätengesteuerten Lagerführung	89
Abbildung 3-37: Lösungskonzept für Variante L2.....	90
Abbildung 3-38: Prinzip der termingesteuerten Auftragsabarbeitung	90
Abbildung 3-39: Gegenseitige Begrenzung personeller Ressourcen (rechts: optimiert).....	92
Abbildung 3-40: Vollständige Qualifikationsmatrix als Optimum; Schema	93
Abbildung 3-41: Grundprinzip des Modellaufbaus.....	94
Abbildung 3-42: Vollständiger Variantenbaum aller Kombinationsmöglichkeiten	94

Abbildung 3-43: Variantenbaum der Simulationsexperimente	95
Abbildung 3-44: ERM des Simulationsmodells.....	97
Abbildung 3-45: Auftragserzeugung	98
Abbildung 3-46: Tabelle "Lieferliste"	98
Abbildung 3-47: Auftragsfenster in Plant Simulation	99
Abbildung 3-48: Beispiel eines hinterlegten Arbeitsplans	100
Abbildung 3-49: Modellausschnitt Layout	100
Abbildung 3-50: Fahrzeuge des Simulationsmodells.....	101
Abbildung 3-51: Transport mittels Querverschiebewagen.....	102
Abbildung 3-52: Entladevorgang des Querverschiebewagens durch einen Brückenkran	102
Abbildung 3-53: Matrix der Transportmethoden	103
Abbildung 3-54: Bearbeitung eines Auftrags am Beispiel "STR/GU"	104
Abbildung 3-55: Vermittlung von Arbeiter und Einzelstation via Broker im ERM	105
Abbildung 3-56: "Verifikation im Kleinen"	106
Abbildung 3-57: Prinzipdarstellung des Validierungsprozesses.....	107
Abbildung 3-58: Vergleich von Bestandsentwicklungen (Bsp: STR/GU).....	108
Abbildung 3-59: Vergleich der Liefertreue.....	108
Abbildung 3-60: Ablauflogik Variante L2	109
Abbildung 3-61: Technische Rahmenbedingungen der Einzelstationen	110
Abbildung 3-62: ABC-Analyse Halle 8	110
Abbildung 3-63: Schmigalla-Verfahren: 1. Schritt	111
Abbildung 3-64: Schmigalla-Verfahren: 2. Schritt	111
Abbildung 3-65: Ist-Layout (oben) und Grüne-Wiese-Layout (unten)	112
Abbildung 3-66: Drei Matrizen als Grundlage des genetischen Algorithmus...	114
Abbildung 3-67: Entwicklung der Individuen des genetischen Algorithmus	114
Abbildung 4-1: Überprüfung der statistischen Schwankungen.....	117
Abbildung 4-2: Sankey-Diagramm des Ist-Zustandes.....	118
Abbildung 4-3: Monatliche Liefertreue	120
Abbildung 4-4: Gewichtete durchschnittliche Liefertreue	121
Abbildung 4-5: Relative Veränderung der gemittelten Liefertreue bezogen auf den Ist-Zustand	121
Abbildung 4-6: Monatlich gemittelte Durchlaufzeit.....	122
Abbildung 4-7: Durchschnittliche Durchlaufzeiten.....	122
Abbildung 4-8: Wöchentlicher Durchsatz in Tonnen.....	123
Abbildung 4-9: Durchschnittlicher Durchsatz je Woche	123
Abbildung 4-10: Analyse der Optimierungsvarianten	124

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Unternehmenskennzahlen (GJ 2014) Böhler Edelstahl GmbH & Co KG, [BÖH14b]	10
Tabelle 2-1: Systemmerkmale und deren Ausprägungen	18
Tabelle 2-2: Teilsysteme komplexer Produktionssysteme (nach [KG95])	18
Tabelle 3-1: Relative Zeitanteile der einzelnen Projektphasen	55
Tabelle 3-2: Produktabmessungen der gewalzten Flachstähle (nach [BÖH14b])	61
Tabelle 3-3: Anzahl der erledigten Aufträge seit 2011	61
Tabelle 3-4: Attribute eines Produktionsauftrags	62
Tabelle 3-5: Einzelstationen des Produktionssystems Halle 8	67
Tabelle 3-6: Dimensionszuordnung der PAL, Angaben in [mm].....	68
Tabelle 3-7: Abbildung des Bearbeitungszeitverhaltens der Einzelstationen ...	73
Tabelle 3-8: Bearbeitungszeit-Verteilungen der PK- und TS-Stationen	75
Tabelle 3-9: Schichtzeiten Halle 8.....	77
Tabelle 3-10: Validierung von Durchlaufzeit und Durchsatz	108
Tabelle 3-11: Parameter des genetischen Algorithmus.....	114
Tabelle 4-1: Bewertung der Varianten bezogen auf den Ist-Zustand.....	125

Erstellung der Sankey – Diagramme

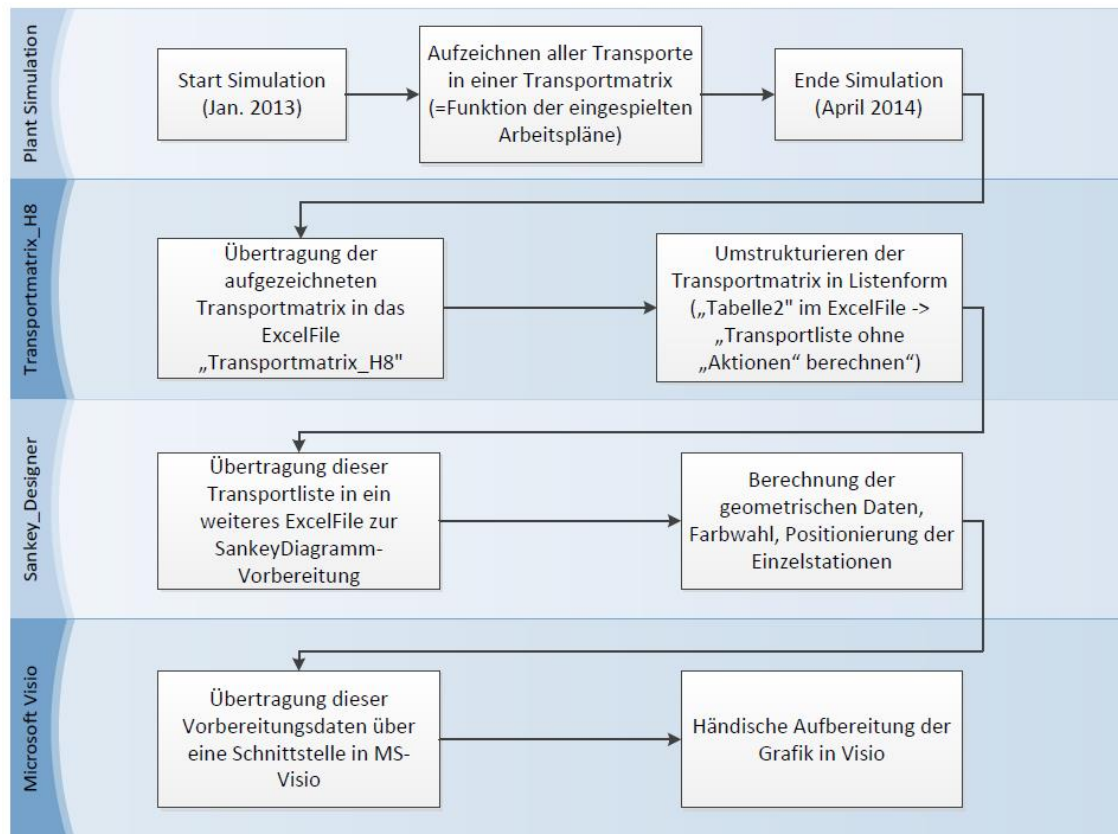


Abbildung des Simulationsmodells

