

Hannes Müller-Sommer

**Wirtschaftliche Generierung von Belieferungssimulationen unter
Verwendung rechnerunterstützter Plausibilisierungsmethoden für
die Bewertung der Eingangsdaten**

**Wirtschaftliche Generierung von
Belieferungssimulationen unter Verwendung
rechnerunterstützter
Plausibilisierungsmethoden für die
Bewertung der Eingangsdaten**

Hannes Müller-Sommer



Universitätsverlag Ilmenau

2013

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen

Tag der Einreichung: 1. Februar 2012

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Straßburger
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Oliver Rose
(Universität der Bundeswehr München)

3. Gutachter: Dr.-Ing. Jochen Beyer
(Technische Universität Ilmenau)

Tag der Verteidigung: 25. Juni 2012

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-86360-058-7 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012000438

Für meine Familie.

Ein herzliches Dankeschön gilt Prof. Dr. Steffen Straßburger für das Vertrauen, die Unterstützung und die Geduld. Bei Prof. Dr. Oliver Rose möchte ich mich für die Übernahme des Koreferats und für das konstruktive Feedback bedanken.

Besonders für den Beistand und den väterlichen Rat möchte ich mich herzlich bedanken bei:

Dr. Martin Daferner

Dr. Ulrich Zeile

Abstract

Das Konzept der Digitalen Fabrik bietet die Möglichkeit, ein Planungssystem mit einer einheitlichen Datengrundlage aufzubauen. Dies schafft die Voraussetzungen, um Belieferungssimulationen mit plausibilisierten Eingangsdaten weitestgehend automatisiert generieren zu können. Die Eingangsdaten sind der Schlüssel zum Erfolg. Nur wer in gewachsenen IT-Landschaften mit unzähligen Schnittstellen Transparenz schaffen kann, weiß, woher welche Daten kommen und wie diese erhoben werden, kann damit auch die Qualität der Eingangsdaten – und dadurch auch die Qualität der Simulationsergebnisse beurteilen.

Diese Dissertation möchte einen Beitrag leisten, wie diese Eingangsdaten mit unterschiedlichen, unabhängigen Methoden untersucht werden können. Es sollen nicht nur Fragen zur Vollständigkeit der Eingangsdaten beantwortet werden, sondern vielmehr Antworten gegeben werden, ob die Eingangsdaten korrekt sind. Es wird aufgezeigt, wie diese Methoden im Umfeld der Digitalen Fabrik zentral in einem Simulationsgerüst gebündelt werden können, um eine einheitliche Plattform zur Plausibilisierung zu schaffen. Darauf aufbauend können diese plausibilisierten Daten verwendet werden, um eine Belieferungssimulation aufzubauen, was nicht nur Zeit spart, sondern auch falsche Schlussfolgerungen auf Basis fehlerhafter Eingangsdaten verhindern kann.

The concept of the Digital-Factory provides a “single source of truth” Planning-System. This establishes a possibility to generate intra-logistic-simulations with validated input data through a standardized method. Therefore we have to take a closer look on input-data and its quality in order to understand its way back through all the IT-systems to the point of birth.

This dissertation provides an approach how to validate this input-data with different, independent methods, not only double-checking whether the information is complete but also giving an answer to the question: is this data correct? Those methods will be combined in a quality module in the Digital-Factory-Planning-System, showing inconsistencies which should be inspected. The objective is collecting all necessary input-data in the required quality in order to semi-automatic-generate a reliable simulation model in intra-logistics, avoiding costly iterations or even wrong conclusions.

Inhaltsverzeichnis

A	Abbildungsverzeichnis.....	XIII
B	Tabellenverzeichnis	XV
C	Abkürzungsverzeichnis.....	XVII
1	Einleitung.....	1
1.1	Spannungsfeld zwischen hoher Datenqualität, geringem Modellerstellungsaufwand und termingerechter Abgabe der Ergebnisse.....	1
1.2	Pre-Untersuchung.....	4
1.3	Zielsetzung und methodische Vorgehensweise.....	6
1.4	Aufbau der Arbeit	8
2	Stand der Technik.....	11
2.1	Produktionsplanung	11
2.2	Logistikplanung	12
2.2.1	Intralogistik der Produktion	13
2.2.2	Aufgaben der Intralogistik	14
2.2.3	Phasen der Logistikplanung	16
2.2.4	Standardisierung in der Intralogistik	17
2.2.5	Wertschöpfung und Durchlaufzeiten in der Intralogistik	18
2.3	Digitale Fabrik.....	19
2.3.1	Begriff und Ziel der Digitalen Fabrik	19
2.3.2	Aufgaben der Digitalen Fabrik	21
2.3.3	Komponenten der Digitalen Fabrik.....	22
2.4	Digitaler Materialfluss.....	22
2.4.1	Idee und Ziel	22
2.4.2	Aufbau des Mengengerüstes	23
2.4.3	Datenkonzept	24
2.5	Digitale Planungsabsicherung in der Logistik	28
2.5.1	Analytische Verfahren	29
2.5.2	Verfahren des Operations Research	29
2.5.3	Dynamische Ausprägung des OR in der logistischen Planungsabsicherung	30
2.6	Diskret-ereignisorientierte Materialflusssimulation in der Logistik	31
2.6.1	Werkssimulation	33
2.6.2	Belieferungssimulation	34
2.6.3	Verkehrsflusssimulation.....	36
2.6.4	Supply-Chain-Simulation.....	37
2.6.5	Ergebnis der Untersuchung: VDA Handlungsempfehlung 4810	38
2.6.6	Auswahl der Belieferungssimulation	39
2.6.7	Phasen einer Belieferungssimulation	39

2.7	Informationsqualität.....	41
2.7.1	Begriffsdefinitionen im Umfeld der Informationsqualität.....	42
2.7.1.1	Definition der Validierung und Verifikation von Simulationsmodellen	42
2.7.1.2	Definition der Plausibilisierung von Eingangsdaten	43
2.7.1.3	Definition der Qualität.....	44
2.7.2	Qualitätsmerkmale für Belieferungssimulationen.....	44
2.8	Simulationsrelevante Eingangsdaten	46
2.8.1	Planungssysteme der Digitalen Fabrik als Datenquelle	46
2.8.1.1	Einsetzbare Daten.....	47
2.8.1.2	Dezentrale simulationsrelevante Daten	49
2.8.1.3	Simulationsirrelevante Daten	50
2.8.2	Abhängigkeiten im Planungssystem der Digitalen Fabrik	51
2.8.3	Reifegradentwicklung der Digitalen Fabrik	52
2.8.4	Vorabplausibilisierung im Planungssystem der Digitalen Fabrik	53
2.9	Zusammenfassung und kritische Würdigung	54
3	<i>Stand der Wissenschaft.....</i>	55
3.1	Einordnung der vorhandenen Ansätze im Bezug auf Belieferungssimulationen.....	55
3.1.1	Rechnergestützte Simulationsmodellgenerierung zur dynamischen Absicherung der Montagelogistikplanung bei der Fahrzeugneutypplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik nach [ROO09].....	58
3.1.2	Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionsdatensystemen am Beispiel einer Job-Shop-Fertigung nach [JEN07].....	60
3.1.3	Entwicklung von Methoden zur automatischen Modellgenerierung nach [SEL05].....	62
3.1.4	Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik nach [FRI07]	63
3.1.5	Automatische Modellgenerierung von Simulationsmodellen auf Basis einer Socket- Lösung mit Planungsdatenbank und dem Simulationssystem Quest von Delmia nach [WAC03].....	64
3.2	Zusammenfassung	66
3.3	Abgeleitete Wissenslücke.....	67
3.4	Hypothese mit abgeleiteten Forschungsfragen.....	69
4	<i>Lösungskonzept.....</i>	71
4.1	Design des Simulationsgerüsts	73
4.1.1	Übersicht der Simulationsdaten.....	73
4.1.1.1	Gewichtung der Eingangsdaten	74
4.1.1.2	Identifikation der benötigten Ausprägungen mittels Morphologischem Kasten	74
4.1.1.3	Informationsqualität	75
4.1.1.4	Ergänzung der Planungsdaten in der frühen Planungsphase	75
4.1.2	Abbildung der Hallenstruktur in das Simulationswerkzeug.....	76
4.1.3	Initialisierung des Simulationsgerüsts	76
4.1.3.1	Implementierung von Expertenwissen	78
4.1.3.2	Aufbau der Klassenstruktur im Simulator	79

4.1.4	Filterklassen als Methode zur Plausibilisierung	82
4.1.5	Qualitätsmerkmal Vollständigkeit	83
4.1.6	Qualitätsmerkmal Korrektheit.....	84
4.2	Entwicklung von methodisch unabhängigen Filterklassen.....	84
4.2.1	Filterklasse „Referenzdatenbank“	85
4.2.2	Filterklasse „komplementäre Werkzeuge“	85
4.2.3	Filterklasse „Entscheidungsbaum-Schwellwertanalyse“	87
4.3	Validierung und Verifikation	90
4.3.1	Elemente der Validierung und Verifikation einer Belieferungssimulationsstudie	90
4.3.1.1	Validierung und Verifikation im Planungssystem.....	91
4.3.1.2	Validierung und Verifikation im Simulationsgerüst	92
4.3.1.3	Validierung und Verifikation des Simulationsmodells	92
4.3.2	Generierung der Teilenachfrage aus dem Produktionsprogramm und der Verbraurate	93
4.3.2.1	Statische und dynamische Nachfrage aus der Verbraurate.....	93
4.3.2.2	Gepulkte Nachfrage aus dem Produktionsprogramm.....	94
4.3.2.3	Auswahl der geeigneten Teilenachfrage für Belieferungssimulationen	94
4.4	Übergabe der vollständigen Eingangsdaten an den Simulator	95
5	Prototypische Anwendung.....	97
5.1	Anforderungen an die vorhandenen Systeme	97
5.1.1	Anbindung des Planungssystems	97
5.1.2	Auswahl des Simulators.....	97
5.2	Vorbereitungen für den Modellaufbau.....	98
5.2.1	Implementierung des Layouts	99
5.2.2	Analyse der Eingangsdaten.....	99
5.2.3	Festlegung benötigter Attribute.....	100
5.2.4	Aufgabe des Simulationsgerüsts während der Simulationsstudie	103
5.3	Bewertung der Informationsqualität durch die Filterklassen	104
5.4	Filterklasse 1: Referenzanalyse	106
5.4.1	Definition des Werkzeuges	106
5.4.2	Voraussetzung und Status der prototypischen Umsetzbarkeit	106
5.5	Filterklasse 2: komplementäre Analysen.....	107
5.5.1	Voraussetzung.....	107
5.5.2	Beispielwerkzeug Malaga	107
5.5.3	Voraussetzung und Status der prototypischen Umsetzbarkeit	108
5.6	Filterklasse 3: Entscheidungsbaum-Schwellwertanalyse.....	108
5.6.1	Definition des Werkzeuges	108
5.6.2	Aufbau Entscheidungsbaum	108
5.6.2.1	Definition der Entscheidungen im Entscheidungsbaum.....	110
5.6.2.2	Ergebnisdarstellung.....	118
5.6.2.3	Protokollierung in der Deltaliste	119
5.6.3	Zusammenfassung und Wertung der Filterklassen	120
5.6.4	Füllstandsmessung und Freigabequantil	121

5.7	Aufbau Simulationsgerüst und Modellgenerierung.....	122
5.7.1	Das Regelwerk im Simulationsgerüst	122
5.7.1.1	Aufbau und Anwendung des Regelwerkes.....	122
5.7.1.2	Import der Informationen aus der Logistikplanung	124
5.7.2	Generierung der Belieferungssimulation durch das Logistikmodul	126
5.7.2.1	Exemplarisches Verhalten der Belieferungssimulation	127
5.7.2.2	Parametrierung der Belieferungssimulation	128
5.8	Zusammenfassung Kapitel 5.....	130
5.8.1	Stand der Umsetzbarkeit	130
5.8.2	Weiterer Handlungsbedarf	131
6	Zusammenfassung und kritische Würdigung.....	133
6.1	Beantwortung der Forschungsfragen (Post-Untersuchung)	133
6.2	Findungsanspruch	138
6.3	Kritische Würdigung.....	138
6.4	Ausblick und weiterer Handlungsbedarf.....	139
7	Literaturverzeichnis	141
8	Anhang	149
8.1	SQL Statements der Filterklasse 3	149
8.2	Aufbau des Graphenmodells für Filterklasse 3.....	151
8.2.1	Informationsbedarf des Graphenmodells	151
8.2.2	Aufbau des Graphenmodells	153
8.2.3	Matrixmodell.....	156
8.2.3.1	Adjazenzmatrix	156
8.2.3.2	Vorgängermatrix	157
8.2.3.3	Bewertungsmatrix	158
8.2.4	Ermittlung kürzester Wege.....	159

A Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1.1: AUFWAND BEI MODELLERSTELLUNG [BRH06].....	3
ABBILDUNG 1.2: SPANNUNGSFELD ZWISCHEN MODELLIERUNGS-AUFWAND, DATENPLAUSIBILISIERUNG UND PROJEKTZEIT	4
ABBILDUNG 1.3: AUFWÄNDE DER BELIEFERUNGSSIMULATION [MÜL10].....	5
ABBILDUNG 1.4: AUSGANGSSITUATION AUFWÄNDE EINER BELIEFERUNGSSIMULATION	6
ABBILDUNG 1.5: PORTFOLIOANALYSE DER BELIEFERUNGSSIMULATIONEN MIT DEN DIMENSIONEN WIEDERVERWENDUNG UND DETAILLIERUNGSGRAD	6
ABBILDUNG 1.6: ZIELSETZUNG DER ARBEIT	7
ABBILDUNG 1.7: VERWENDETE METHODEN ZUR WISSENSGENERIERUNG IN DIESER ARBEIT	8
ABBILDUNG 1.8: GESTALTUNGSRAHMENKONZEPT DER ARBEIT.....	9
ABBILDUNG 2.1: AUFBAU KAPITEL 2	11
ABBILDUNG 2.2: WIRKUNGSBEREICH DER BELIEFERUNGSSIMULATION	13
ABBILDUNG 2.3: AUFGABEN DER INTRALOGISTIK.....	14
ABBILDUNG 2.4: DENDROGRAMM FÜR EINSATZFAKTOREN [RMW10]	16
ABBILDUNG 2.5: MEILENSTEINE IM PLANUNGSPROZESS [SCH08], ERWEITERT UM DIE BELIEFERUNGSSIMULATION	17
ABBILDUNG 2.6 STANDARDISIERUNG DER PROZESSPLANUNG IN DER INTRALOGISTIK NACH [ROO09].....	18
ABBILDUNG 2.7: DEFINITIONEN DER DIGITALEN FABRIK [BWG09]	19
ABBILDUNG 2.8: DIE DIGITALE FABRIK IM UMFELD DES PRODUKTENTSTEHUNGSPROZESS UND KUNDENAUFTRAGSENTWICKLUNGSPROZESS, ANGELEHNT AN [SCH08]	20
ABBILDUNG 2.9: AUSGEWÄHLTE ANWENDUNGSFELDER DER DIGITALEN FABRIK [BWG09]	21
ABBILDUNG 2.10: KREISLAUF DES INFORMATIONEN- UND MATERIALFLUSS BEI DER PULL- VERSORGUNG.....	23
ABBILDUNG 2.11: DIGITALER LOGISTIKPLANUNGSPROZESS EINES DEUTSCHEN AUTOMOBILHERSTELLERS (OHNE ITERATIONSSCHLEIFEN) [BRA04]	24
ABBILDUNG 2.12: BEZIEHUNG DER SACHNUMMER IN BELIEFERUNGSSIMULATIONEN	25
ABBILDUNG 2.13: PARAMETRIERUNG EINES TRANSPORTBAUSTEINS IM PLANUNGSSYSTEM	27
ABBILDUNG 2.14: AUSPRÄGUNGEN MÖGLICHER ABRISKAUSALITÄTEN	28
ABBILDUNG 2.15: AUSPRÄGUNGEN DER SIMULATION [BAC97]	30
ABBILDUNG 2.16: AUSPRÄGUNGEN DER LOGISTIKSIMULATIONEN [MS09].....	32
ABBILDUNG 2.17: AUSPRÄGUNGEN DER LOGISTIKSIMULATIONEN, PORTFOLIOANALYSE	39
ABBILDUNG 2.18: ERWEITERTES VORGEHENSMODELL ZUR SIMULATIONSERSTELLUNG [WWC08]	40
ABBILDUNG 2.19: VORGEHENSMODELL VALIDIERUNG UND VERIFIKATION [RSW08].....	42
ABBILDUNG 2.20: ZUSAMMENHANG DER PLAUSIBILISIERUNG, VALIDIERUNG UND VERIFIKATION	43
ABBILDUNG 2.21: MÖGLICHE PLAUSIBILISIERUNGSOBJEKTE EINER LOGISTIKKETTE	46
ABBILDUNG 2.22: SCHNITTMENGE DER VORHANDENEN UND BENÖTIGTEN DATEN DER BELIEFERUNGSSIMULATION	47
ABBILDUNG 2.23: IDEALISIERTE SICHTWEISE DER LOGISTIKPLANUNG UND DER BELIEFERUNGSSIMULATION	50
ABBILDUNG 2.24: ENTSTEHUNG DER EINGANGSDATEN DER BELIEFERUNGSSIMULATION.....	51
ABBILDUNG 2.25: SENSITIVITÄTEN DER BENÖTIGTEN INFORMATIONEN [ROO09].....	52
ABBILDUNG 2.26: PLAUSIBILISIERUNG AUF VOLLSTÄNDIGKEIT IM PLANUNGSSYSTEM DER DIGITALEN FABRIK.....	53
ABBILDUNG 3.1: KLASSEKATION VORHANDENER ANSÄTZE ZUR MODELLGENERIERUNG	56
ABBILDUNG 3.2: VORHANDENE ANSÄTZE DER MODELLGENERIERUNG NACH [SPL95], [JEN07], [SEL05], [WAC03].....	66
ABBILDUNG 3.3: VORHANDENE ANSÄTZE DER MODELLGENERIERUNG NACH [ROO09].....	67

ABBILDUNG 3.4: MODELLGENERIERUNG MITTELS SIMULATIONSGERÜST.....	68
ABBILDUNG 4.1: VORGEHENSMODELL MODELLGENERIERUNG EINER BELIEFERUNGSSIMULATION	72
ABBILDUNG 4.2: PRODUKT, PROZESS UND RESSOURCENSICHT MIT FREIHEITSGRADEN	75
ABBILDUNG 4.3: VORGEHENSMODELL ABBILDUNG VON EXPERTENWISSEN	79
ABBILDUNG 4.4: VERVOLLSTÄNDIGUNG DER SIMULATIONSRELEVANTEN DATEN.....	79
ABBILDUNG 4.5: MODELLIERUNG EINER KREUZUNG IN <i>PLANTSIMULATION</i>	81
ABBILDUNG 4.6: ABLAUFDIAGRAMM PLAUSIBILISIERUNG VON TRANSPORTKETTEN	82
ABBILDUNG 4.7: REFERENZBAUREIHEN.....	85
ABBILDUNG 4.8: PLAUSIBILISIERUNG DES MENGENGERÜSTES DURCH KOMPLEMENTÄRE WERKZEUGE.....	86
ABBILDUNG 4.9: ENTSCHEIDUNGSFINDUNG MIT AGGREGIERTEM SCHWELLWERT.....	88
ABBILDUNG 4.10: ENTSCHEIDUNGSBAUM-SCHWELLWERTANALYSE AM BEISPIEL DER STANDARDBELIEFERUNGSFORM	89
ABBILDUNG 4.11: CHECKLISTE DER VALIDIERUNG UND VERIFIKATION DER BELIEFERUNGSSIMULATION.....	90
ABBILDUNG 4.12: INFORMATIONSFLUSS DER BETEILIGTEN PARTEIEN IM RAHMEN EINER BELIEFERUNGSSIMULATIONSSTUDIE.....	91
ABBILDUNG 4.13: FÜLLSTANDAUSWERTUNG FÜR DIE BEURTEILUNG DER AUSSAGEKRAFT DER SIMULATIONSSTUDIE	91
ABBILDUNG 5.1: RELATIONALES DATENBANKSCHEMA DES SIMULATIONSGERÜSTES	103
ABBILDUNG 5.2: EINSTIEG IN DAS SAP-BI-CHANNEL SYSTEM	104
ABBILDUNG 5.3: ABRUF DES MENGENGERÜSTES ALS STANDARDISIERTER BERICHT.....	105
ABBILDUNG 5.4: IMPORTIERTE TABELLEN IN DER <i>MYSQL</i> -DATENBANK.....	105
ABBILDUNG 5.5: DATENBANKZUGRIFF AUS DEM SIMULATIONSGERÜST.....	106
ABBILDUNG 5.6: ANZAHL DER KORRIGIERTEN FEHLER EINES KOMPLEMENTÄREN WERKZEUGES.....	108
ABBILDUNG 5.7: ENTSCHEIDUNGSFINDUNG DES STANDARDBELIEFERUNGSPROZESSES	109
ABBILDUNG 5.8: ENTSCHEIDUNGSAST 1 DER FILTERKLASSE 3	111
ABBILDUNG 5.9: ENTSCHEIDUNGSAST 2.1 DER FILTERKLASSE 3	114
ABBILDUNG 5.10: ENTSCHEIDUNGSAST 2.2 DER FILTERKLASSE 3	115
ABBILDUNG 5.11: ENTSCHEIDUNGSAST 2.3 DER FILTERKLASSE 3	115
ABBILDUNG 5.12: ENTSCHEIDUNGSAST 3 DER FILTERKLASSE 3	117
ABBILDUNG 5.13: ASPEKT DER ENTSCHEIDUNGSFINDUNG EINER TÄGLICHEN WIRTSCHAFTLICHEN ANLIEFERUNG BEI EINER PRODUKTION IN SÜDDEUTSCHLAND.....	118
ABBILDUNG 5.14: AUSWERTUNG FILTERKLASSE 3 IM SIMULATIONSGERÜST	119
ABBILDUNG 5.15: FÜLLSTAND DER EINGANGSDATEN AUS DEM PLANUNGSSYSTEM	121
ABBILDUNG 5.16: REGELWERK IM SIMULATIONSGERÜST.....	126
ABBILDUNG 5.17: AUFBAU DES LOGISTIKMODULS.....	127
ABBILDUNG 5.18: EINRICHTUNG DER ODBC-SCHNITTSTELLE.....	129
ABBILDUNG 5.19: HALLENLAYOUT IM SIMULATOR.....	130
ABBILDUNG 6.1: FESTLEGUNG DES ARBEITSPUNKTES BEI KOMPLETTEN BELIEFERUNGSSIMULATIONEN	134
ABBILDUNG 6.2: ERREICHTE ZIELSETZUNG DIESER ARBEIT.....	139
ABBILDUNG 8.1: WEGENETZ IM LAYOUT MIT KNOTENPUNKTEN.....	153
ABBILDUNG 8.2: UNGERICHTETER UND BEWERTETER GRAPH DER MONTAGEHALLE	154
ABBILDUNG 8.3: GRAPHEN UNGERICHTET (LINKS) UND GERICHTET (RECHTS)	155
ABBILDUNG 8.4: VISUALISIERUNG EINSEITIG BEWERTETER KANTEN	155
ABBILDUNG 8.5: TRANSPORTWEG ZWISCHEN LAGER UND BEREITSTELLORT MIT KNOTENABFOLGE.....	156
ABBILDUNG 8.6: AUSZUG DER ADJAZENZMATRIX.....	157
ABBILDUNG 8.7: ENTWICKLUNG DER VORGÄNGERMATRIX.....	157
ABBILDUNG 8.8: ENTWICKLUNG DER BEWEGUNGSMATRIX.....	158

B Tabellenverzeichnis

TABELLE 2.1: VERFAHREN DER ABSICHERUNG IM VERGLEICH	29
TABELLE 2.2: WERKSSIMULATION IM DETAIL	34
TABELLE 2.3: BELIEFERUNGSSIMULATION IM DETAIL	35
TABELLE 2.4: VERKEHRSFLUSSSIMULATION IM DETAIL	37
TABELLE 2.5: SUPPLY-CHAIN-SIMULATION IM DETAIL	38
TABELLE 2.6: PHASEN DER SIMULATIONSMODELLERSTELLUNG IM VERGLEICH	41
TABELLE 2.7: QUALITÄTSMERKMALE BEZOGEN AUF DATENWERTE NACH [HEL02]	45
TABELLE 3.1: MORPHOLOGISCHER KASTEN FÜR METHODEN ZUR MODELLERSTELLUNG [SBM10]	57
TABELLE 4.1: ÜBERSICHT DER FILTERKLASSEN	83
TABELLE 4.2: GEFUNDENE FEHLER IM KOMPLEMENTÄREN SYSTEM DER UNTERSUCHTEN BAUREIHE	87
TABELLE 5.1: ENTITÄT PRODUKT	100
TABELLE 5.2: ENTITÄT VERSORGUNGSPROZESS	101
TABELLE 5.3: ENTITÄT LAYOUTELEMENTE	101
TABELLE 5.4: ENTITÄT LOGISTIKSTATION	102
TABELLE 5.5: ENTITÄT FLURFÖRDERZEUGE	102
TABELLE 5.6: ENTITÄT LADUNGSTRÄGER	103
TABELLE 5.7: PARAMETER ENTSCHEIDUNGSFRAGE 1 DER FILTERKLASSE 3	110
TABELLE 5.8: PARAMETER ENTSCHEIDUNGSFRAGE 2.1 DER FILTERKLASSE 3	113
TABELLE 5.9: PARAMETER ENTSCHEIDUNGSFRAGE 2.2 DER FILTERKLASSE 3	114
TABELLE 5.10: PARAMETER ENTSCHEIDUNGSFRAGE 2.3 DER FILTERKLASSE 3	115
TABELLE 5.11: PARAMETER ENTSCHEIDUNGSFRAGE 3 DER FILTERKLASSE 3	116
TABELLE 5.12: DELTALISTE „STANDARDBELIEFERUNGSFORM“	120
TABELLE 5.13: ANWENDUNG DES REGELWERKES	125
TABELLE 8.1: INFORMATIONSBEDARF DES GRAPHENMODELLS	152

C Abkürzungsverzeichnis

AKL	Automatisiertes Kleinteilelager
AMG	Automatische Modellgenerierung
ASIM	Arbeitsgemeinschaft Simulation
AT	Arbeitstag
BDE	Betriebsdatenerfassung
BE	Bewegliches Element, <i>in der Belieferungssimulation</i> : Ladungsträger, FFZ
BO	Bereitstellort, Übergabefläche des Ladungsträger am Verbauort
BR	Baureihe
CAD	Computer Aided Design, rechnergestützter Entwurf
CART	Classification and Regression Tree, Entscheidungsbaum
CSV	Comma Separated Values, kommagetrennte Inhalte (<i>Dateiformat</i>)
DPE	<i>Delmia Process Engineer</i> , Planungssystem
EBS-Analyse	Entscheidungsbaum-Schwellwert Analyse
EDL	Externer Dienstleister
FFZ	Flurförderzeug
GSL-FT	Generische Simulationslösung für Fördertechniksysteme
GSL-L	Generische Simulationslösung für Logistiksysteme
GLT	Großladungsträger
IT	Information Technology
JIS	Just-in-Sequenz Belieferung
JIT	Just-in-Time Belieferung
KLT	Kleinladungsträger
LE	Ladungseinheit (Lage)
LLZ	Lieferanten Logistik Zentrum, Konsignationslagerhaltung
LP	Logistikplan, Transportkette
LSP	Logistikstation Prozess
LSR	Logistikstation Resource
LVV	Leer-vor-Voll Versorgungsprozess
MDE	Maschinendatenerfassung
MTM	Methods of Time Measurement, Zeitbaustein für einzelne Prozessschritte
MTBF	Mean Time Between Failures, mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen
MTTR	Mean Time to Repair, mittlere Reparaturzeit
ODBC	Open Database Connectivity, offene Datenbank-Verbindungsschnittstelle

OEM	Original Equipment Manufacturer, <i>hier</i> : Automobilhersteller
PLM	Product Lifecycle Management
PosV	Positionsvariante
PPR	Produkt, Prozess, Ressource
PPS	Produktionsplanungs- und Steuerungssystem
RuleML	Rule Markup Language, XML-Sprache zur Adjustierung und semantischen Interpretation
SAP-BI	Business Intelligence, Reporting Portal der Firma <i>SAP</i>
SDX	Simulation Data Exchange
SLT	Sonderladungsträger
SNR	Sachnummer
SOP	Start of Production, Produktionsstart der Serienfahrzeuge
SQL	Structured Query Language, Datenbankabfragesprache
SST	Schnittstelle (<i>zwischen IT-Systemen</i>)
TB	Transportbaustein
TF	Teilefamilie
TV	Transportvariante
ULT	Universalladungsträger
VBA	Visual Basic for Applications
VBR	Vorgängerbaureihe
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VO	Verbauort der Montage, vgl. BO
VVL	Voll-vor-Leer Versorgungsprozess
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

1.1 Spannungsfeld zwischen hoher Datenqualität, geringem Modellerstellungsaufwand und termingerechter Abgabe der Ergebnisse

Um Planungen digital abzusichern werden in der Automobilindustrie seit vielen Jahren erfolgreich Simulationen eingesetzt. Dies reicht von der Prozesssimulation von Umformprozessen über das Digitale Montage-Mock-Up bis zu Materialflusssimulationen (u.a. nach [KR98]). Eine Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind [VDI08a]. Die Reduktion von Planungs- und Produktionskosten [KRA01] ist einer der Gründe für die zunehmende Verbreitung und Akzeptanz von Simulationen. Diese Kostenreduktion wird durch die Verlagerung der Absicherung aus der Praxis hin in die Digitale Fabrik [VDI08b] erreicht. Zudem wird die interdisziplinäre Zusammenarbeit der unterschiedlichen Spezialisten gefördert, da dank definierter Schnittstellen parallel mit der gleichen Datengrundlage gearbeitet werden kann.

Die diskret ereignisorientierte Simulation hat sich als Standardmethode für dynamische Absicherungen durchgesetzt [WEN02]. Eine diskret ereignisorientierte Simulation berechnet den neuen Zustand eines Modells zu Ereigniszeitpunkten, während sich der Zustand des Modells zwischen Ereignissen nicht verändert. Daraus entwickelte sich das Werkzeug der Materialflusssimulation, das im Umfeld der Automobilproduktion etabliert ist [BCW03]. Die Simulationswerkzeuge haben sich in den letzten Jahren sowohl im Funktionsumfang wie auch in der Anwenderfreundlichkeit weiterentwickelt und geben heute Antworten auf die unterschiedlichsten Fragestellungen. Dank der Schnittstellenversorgung von Produktionsplanungssystemen durch [JEN07], [SEL05] und [SPL95]; der Schnittstelle (SST) der Fördertechnik durch [WAC03] und der SST der Prozess- und Layoutplanung von [ROO09] können Simulatoren aus den vorhandenen Eingangsdaten (teil-)automatisiert Modelle aufbauen. Die Materialflusssimulation wird von allen deutschen Automobilherstellern (OEMs) als Absicherungs- und Optimierungswerkzeug verwendet, jedoch lassen die unterschiedlichen Historien und Organisationsstrukturen keine direkten Vergleiche bezüglich des Einsatzes und der Verbreitung von Logistiksimulationen zu [BCW03]. Gerade aber diese Vergleichbarkeit bringt entscheidende Vorteile mit sich, ohne dass die OEMs ihre Kernkompetenzen offen legen, angefangen von dem gemeinsamen Begriffsverständnis über die Ausschreibung von Simulationsprojekten für Dienstleister bis hin zum gemeinsamen Erkennen von Handlungsfeldern für übergreifende Forschungsvorhaben.

In den letzten Jahren nahm der Einsatz der Simulationswerkzeuge im Bereich Logistik deutlich zu. Auf Grund von inhomogenen Prozess-, Organisations- und IT-Landschaften der OEMs sind auch die Anforderungen an die verwendeten Simulationswerkzeuge unterschiedlich. In der heutigen Zeit kann sich keiner der OEMs auf Grund von wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, gestiegener Variantenzahl und verschärftem Wettbewerbsdruck Unwirtschaftlichkeit leisten. Daher ist die Standardisierung der unterschiedlichen Logistiksimulationen wichtiger denn je. Ziel ist es, teure Mehrfachentwicklungen einzusparen, den Aufwand der jeweiligen

Datenbeschaffung wirtschaftlich zu halten [RSW08], [BRH06]. Gleichzeitig werden mit einer gemeinsamen Strategie die daraus resultierenden Synergieeffekte wie ein gemeinsames Anforderungsmanagement gewinnbringend genutzt. Dies bezieht sich auf den kompletten Produktentstehungs- und Produktlebenszyklus. Das Ergebnis ist nicht nur die Reduktion der Kosten für alle Beteiligten, z.B. durch gemeinsame Entwicklungen, sondern schafft eine vergleichbare Tiefe von Logistiksimulationsprojekten auf der Suche nach dem Optimum.

Der Produktionsplanungsprozess der heutigen Intralogistik für Montagegewerke wird von einer Vielzahl an Methoden unterstützt, die die Planungsdauer reduzieren bei gleichzeitiger Steigerung der Planungsqualität. Ziel der Montagelogistik ist es, zu jeder Zeit das richtige Bauteil an der richtigen Station am Band der Montage bereitzustellen. Somit ist eine der Prämissen, Abrisskausalitäten (Grund, der zu einem Bestandsabriss am Montageband führt) am Bereitstellort zu vermeiden. Um diese Abrisskausalitäten in der Planung zu vermeiden, müssen diese vorab identifiziert werden. Dafür eignen sich sowohl szenario-basierte Methoden wie statische und dynamische Modelle, aber auch die Methoden des Operations-Research wie mathematische Optimierung oder Heuristiken. Die Simulation ist hierfür geeignet, Aussagen zur Vermeidung von Abrisskausalitäten zu treffen, da diese Methode als einzige das Zusammenspiel der einzelnen Prozesse detailliert und unkomprimiert mit zeitabhängigen (dynamischen) Einflussfaktoren untersucht.

Eine Simulationsstudie ist mit beachtlichem Aufwand verbunden (vgl. Abbildung 1.1). Dieser umfasst die Definition und der Datenerhebung über die Erstellung und Visualisierung des Modells bis hin zur Durchführung und Auswertung der Experimente. Die Verwertbarkeit der Ergebnisse und der daraus resultierenden Aussagen ist unmittelbar an die Qualität der Eingangsdaten gekoppelt [WAC03]. Hier sind die größten Aufwände der Simulationsstudie zu finden, nach Baier, Ruf und Hill [BRH06] machen die Phasen vor der Modellerstellung bereits 45% des Zeitaufwandes aus. Durch das gleichzeitige Fortschreiben der Planung ändern sich die Eingangsparameter während des Simulationsprojektes kontinuierlich. Daher sind aufwändige Iterationsschleifen notwendig, um die Datenqualität des Modells und seine Aussagekraft stets aktuell zu halten. Diese Aufwände sind auf Grund der aufwändigen Beschaffung der Eingangsdaten sowie deren Schnelllebigkeit im Planungsprozess den Kunden der Simulationsstudien nur bedingt vermittelbar. Der Kostendruck im Unternehmen zwingt das Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen der Simulationsmodelle zu hinterfragen. Die Aufwände einer Simulationsstudie amortisieren sich in der Regel sehr schnell in der Praxis durch die exakte Bestimmung der Einsatzfaktoren. Allerdings ist die Argumentation bezüglich der eingesparten Kosten nur bedingt auf die Simulation umzurechnen, da in der Regel gleich das optimale Simulationsergebnis in der Praxis umgesetzt wird. Die schlechteren Alternativen werden somit nicht bewertet.

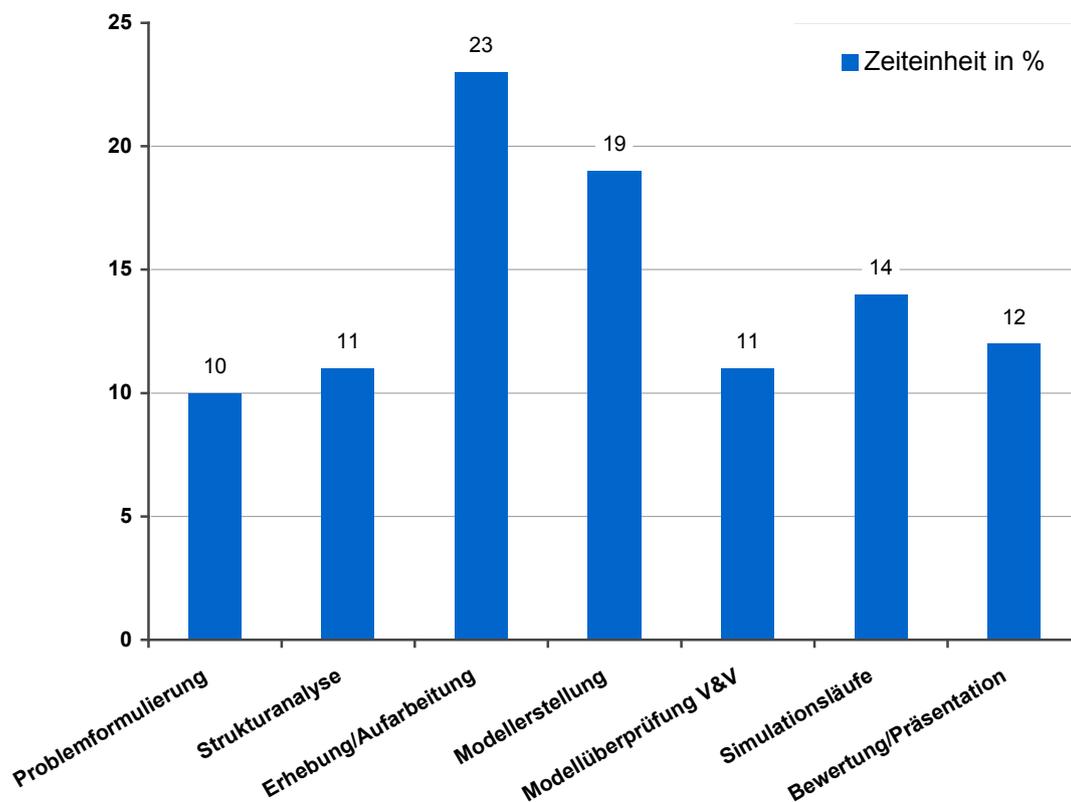


Abbildung 1.1: Aufwand bei Modellerstellung [BRH06]

Diese Arbeit betrachtet die Belieferungssimulation für Montageumfänge in der Neutypplanung (Planung neuer Baureihen vor Produktionsstart). Die Systemgrenzen dieser Simulationsausprägungen werden in Kapitel 2.6 definiert. Die Belieferungssimulation eignet sich von allen untersuchten Logistiksimulationen auf Grund ihrer hohen Detaillierung besonders für die Entwicklung einer Methodik zum beschleunigten Modellaufbau. Auf Grund der abstrakten Planung und größeren Gestaltungsfreiräumen in der Planung liegt der Schwerpunkt auf der planungsbegleitenden Belieferungssimulation. Als zu belieferndes Gewerk wird hier die Montage exemplarisch untersucht, da die Anforderungen als auch die Auswirkungen aufgrund der hohen Teileanzahl sowie unterschiedlicher Belieferungsprozesse und Steuerstrategien am größten sind.

Das Spannungsfeld (vgl. Abbildung 1.2) hat drei verschiedenen Achsen. Die erste Achse beschreibt den Aufwand der Datenplausibilisierung, die zweite Achse beschreibt den Aufwand der Modellierung und dritte Achse beschreibt die definierte Projektzeit der Simulationsstudie. Um die Projektzeit unter definierten Ressourcen einhalten zu können, müssen sowohl die Modellierung als auch die Datenplausibilisierung in einer definierten Projektzeit bearbeitet werden können. Zudem müssen im Vorfeld einer Simulationsstudie hinreichende Plandaten mit einer belastbaren Informationsqualität vorliegen, um ein entsprechend belastbares Ergebnis zu erreichen.

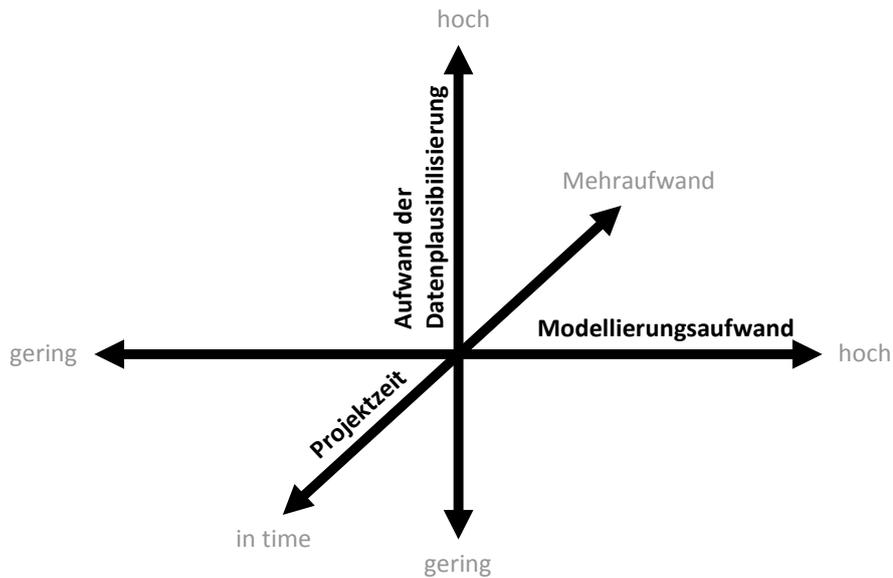


Abbildung 1.2: Spannungsfeld zwischen Modellierungsaufwand, Datenplausibilisierung und Projektzeit

Bereits bei Projektstart ist die Definition der benötigten Daten sowie deren Beschaffung zu bestimmen. Die Organisation der Digitalen Fabrik mit ihrer ganzheitlichen digitalen Planung ist die Basis für die Eingangsdaten und somit für einen aufwandreduzierten Simulationsaufbau. Die Digitale Fabrik beinhaltet vier Hauptkomponenten: eine durchgängige Datenbasis als Kern, eine Integrationsplattform als Kommunikationsbasis zwischen Daten und IT-Werkzeugen, digitale Werkzeuge, die über Schnittstellen angebunden sind und einen übergreifenden Planungsworkflow [VDI08b]. Eine Vielzahl der für die Parametrisierung und Modellierung benötigten Daten werden bereits in den Planungssystemen der Digitalen Fabrik vorgehalten. Diese sind plausibilisiert tagesaktuell in den Simulator zu übertragen. Zusätzlich zu den Planungsdaten aus der Digitalen Fabrik werden weitere Eingangsdaten benötigt wie beispielsweise Steuerstrategien, das Layout und die Abrufe der Programmplanung. Die Menge an unterschiedlichen Daten erfordert ein standardisiertes Konzept, um den Aufwand der Datenerhebung und Datenplausibilisierung auf ein Minimum zu beschränken und den Nutzern somit mehr Zeit für Bewertungen und Optimierungen und Umsetzungsempfehlungen zu gewinnen. Das Ziel der Simulation ist die Absicherung und Verbesserung der Planung und der Produktion [ROO09].

1.2 Pre-Untersuchung

Eine mit den Mitgliedern des VDA-Unterarbeitskreises Ablaufsimulation durchgeführte Befragung hatte das Ziel, ein gemeinsames Verständnis der im VDA organisierten Simulationsexperten zum Thema Logistiksimulation zu schaffen und die unterschiedlichen Simulationsarten und deren Derivate im Bereich Logistik einheitlich zu beschreiben. Prinzipiell ist dieses Befragung auch für andere Industriebranchen übertragbar. Diese Befragung wurde im Februar 2009 als strukturiertes Interview mit sechs Simulationsexperten der einzelnen OEMs

durchgeführt. Trotz des kleinen Stichprobenumfangs ist davon auszugehen, dass die Antworten der Teilnehmer ein substantiiertes Gesamtbild der momentan von den Automobilherstellern eingesetzten Logistiksimulationen widerspiegeln, da der Bereich der Logistiksimulation auf Grund des hohen Aufwandes bisher nicht flächendeckend eingesetzt wird.

Die Fragestellungen der Umfrage adressieren die unterschiedlichen Simulationsarten, die im Bereich Logistik unter dem Begriff „Logistiksimulation“ zusammengefasst werden. Die zugrunde liegende Methode ist hierbei jeweils die diskret-ereignisgesteuerte Simulation, mit ihrem Anwendungsfokus der Materialflusssimulation. Die Ergebnisse dieser Untersuchung finden sich in Abbildung 1.3.

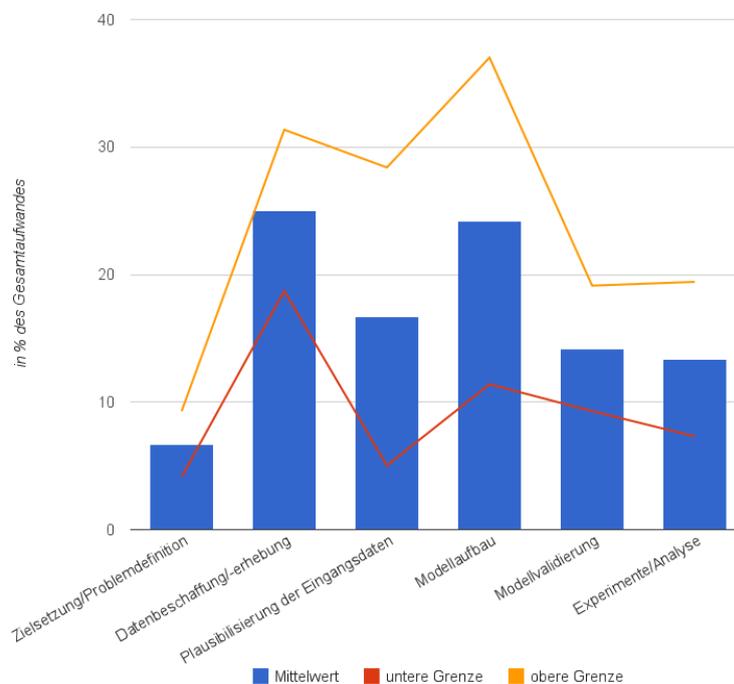


Abbildung 1.3: Aufwände der Belieferungssimulation [MÜL10]

Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass analog zu der Untersuchung von [BRH06] die Beschaffung der Eingangsdaten und deren Plausibilisierung ein signifikanter Aufwand einer Simulationsstudie ist.

1.3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise

Die Ausgangssituation wird in Abbildung 1.4 beschrieben. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag leisten, die Planungsqualität der Neutypplanung mittels Simulation zu verbessern um damit den Reifegrad der Planung zu erhöhen. Gleichzeitig soll der Erstellungsaufwand für Belieferungssimulationen selbst signifikant reduziert werden.



Abbildung 1.4: Ausgangssituation Aufwände einer Belieferungssimulation

Als direktes Ergebnis einer Belieferungssimulationsstudie entstehen Aussagen zu den benötigten Einsatzfaktoren der Logistik beispielsweise die Anzahl an Versorgungsfahrzeugen unter der Prämisse, keinen Versorgungsabbruch zu provozieren. Dieses Konzept soll den Zielkonflikt zwischen der kontinuierlichen Versorgung der Verbauorte (Montage) / Bereitstellorte (Logistik) und einer möglichst geringen Anzahl an Einsatzfaktoren wie Stapler und Routenzügen schon in der Planung lösen. Damit kann in der Logistik die kostenoptimierte Planung, wie auch die kostenoptimierte Produktion, realisiert werden. Als indirektes Ergebnis wird der Reifegrad durch die verbesserte Planungsqualität erhöht. Somit können wertvolle Planungsressourcen eingespart bzw. effizienter eingesetzt werden.

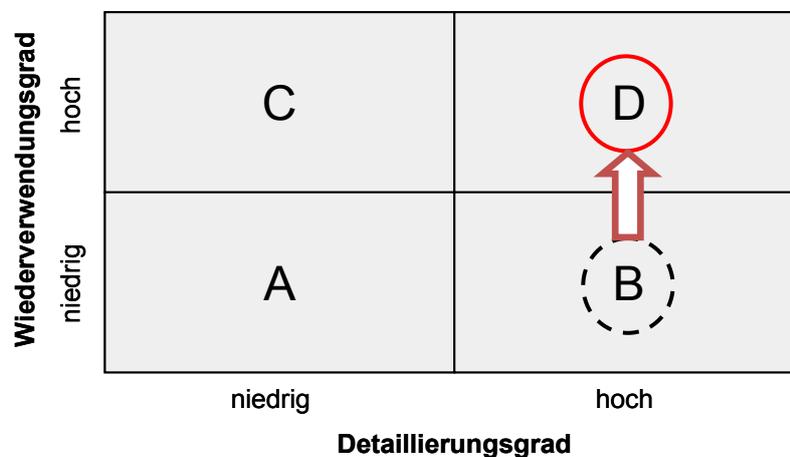


Abbildung 1.5: Portfolioanalyse der Belieferungssimulationen mit den Dimensionen Wiederverwendung und Detaillierungsgrad

Die Zielsetzung des Konzeptes ist im Portfolio (Abbildung 1.5) abgebildet. Mit der Verschiebung der sich in Quadrant B befindlichen Belieferungssimulation [MS09] in Richtung Quadrant D kann die Wirtschaftlichkeit gesteigert werden. Gleichzeitig wird die Mitarbeiterkapazität von der Erstellung und Parametrisierung des Modells hin zu intensiveren Untersuchungen von Experimentvarianten und deren Ergebnissen verlagert. Somit können nicht nur die Plandaten abgesichert, sondern auch neue Impulse aus der Simulation in die Planung und Produktionslogistik gegeben werden. Dies bietet dem Management neue Entscheidungsgrundlagen und Erkenntnisse, um die in der Einleitung aufgeführten Herausforderungen zu meistern. Das Datenkonzept der Digitalen Fabrik mit ihrer ganzheitlichen Sicht bietet, wie Eingang beschrieben, einen geeigneten Aufsatzpunkt für die Materialflusssimulation. Durch die Verankerung mit definierten Meilensteinen im Produktentstehungsprozess legt diese die Grundlage für die standardisierte Datenerhebung im Planungsprozess. Dank der kompletten Planung in einer Planungsdatenbank werden redundante Daten vermieden. Dieses „single-source-of-truth“-Konzept schafft die notwendige Transparenz, Datensätze wie Transportketten so aufzubereiten, dass der Simulator direkt auf die vollständige Datenbank zugreifen und das Modell generieren kann. Die Zielsetzung ist in Abbildung 1.6 abgebildet.

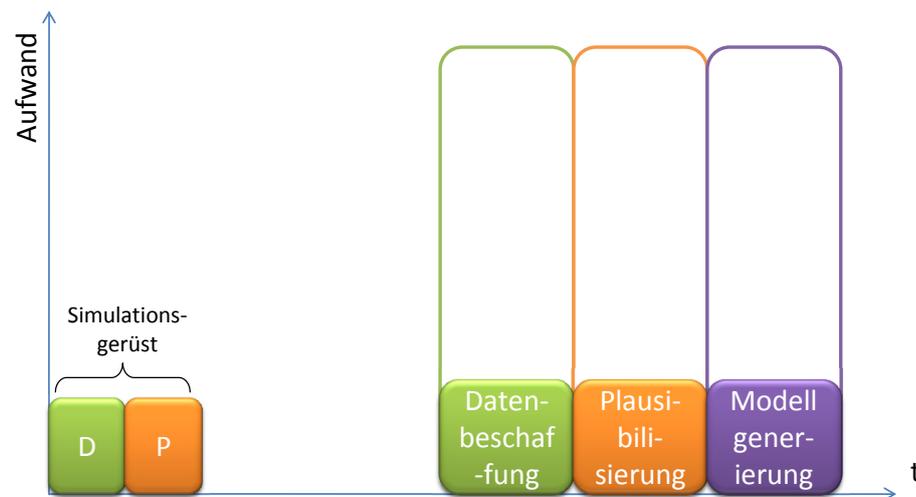


Abbildung 1.6: Zielsetzung der Arbeit

Für einen transparenten Aufbau der Arbeit wurde ein Gestaltungsrahmen (vgl. Abbildung 1.8) definiert. Als Methoden zur Wissensgenerierung (vgl. Abbildung 1.7) werden in der Definition der Problemstellung sowohl die Literaturlauswertung als auch eine Befragung der Experten im Gebiet der diskret-ereignisorientierten Materialflusssimulation verwendet. Im Lösungskonzept wird als Methode die Referenzmodellierung eingesetzt, welche mittels der Entwicklung eines Prototyps (Demonstrators) evaluiert wird.

Das Lösungskonzept unterteilt sich in zwei Teilbereiche:

Im ersten Teil des Lösungskonzeptes wird die Methode des Simulationsgerüsts entwickelt, mit der die verwendbaren Eingangsdaten aus dem Planungssystem der Digitalen Fabrik mit den dezentralen, nicht zwangsläufig digital vorhandenen, dynamischen Simulationsparametern verbunden werden, um Belieferungssimulationsmodelle zu generieren.

Der zweite Teil beinhaltet rechnergestützte Methoden zur automatisierten Plausibilisierung der Eingangsdaten. Nach der Untersuchung von [BRH06] (vgl. Abbildung 1.1) nimmt die Plausibilisierung der Eingangsdaten einen der größten Aufwände im Rahmen einer Simulationsstudie, insbesondere bei den detaillierten Belieferungssimulationen (vgl. Abbildung 1.3), ein. Somit ist die Zielsetzung eine signifikante Reduktion des Aufwandes der Plausibilisierung und daraus resultierend eine bessere Qualität bei Simulationsstudien.

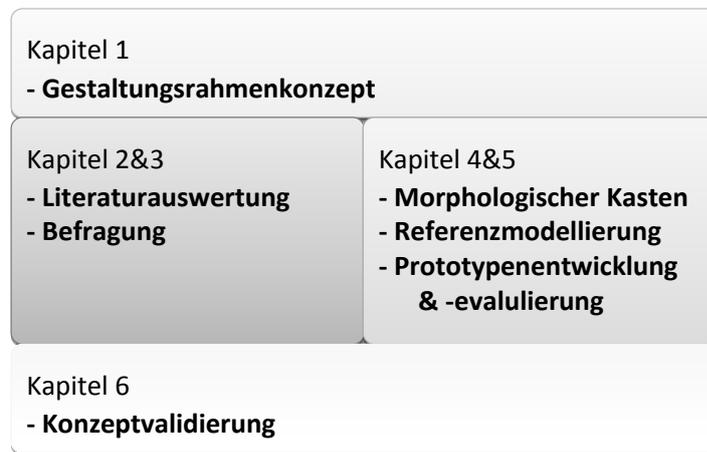


Abbildung 1.7: verwendete Methoden zur Wissensgenerierung in dieser Arbeit

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit wird durch das Gestaltungsrahmenkonzept in Abbildung 1.8 beschrieben. Die einzelnen Kapitel ergeben sich aus den Meilensteinen aus dem Gestaltungsrahmen. Dazu gehören als Grundlage neben der Problemstellung der aktuelle Stand der Technik und der aktuelle Stand der Wissenschaft, bevor das Lösungskonzept einen möglichen Weg aufzeigt, dieser Problemstellung zu begegnen. Das erarbeitete Lösungskonzept wird im darauf folgenden Kapitel prototypisch umgesetzt und abschließend kritisch bewertet. Im Folgenden werden die einzelnen Kapitel vorgestellt:

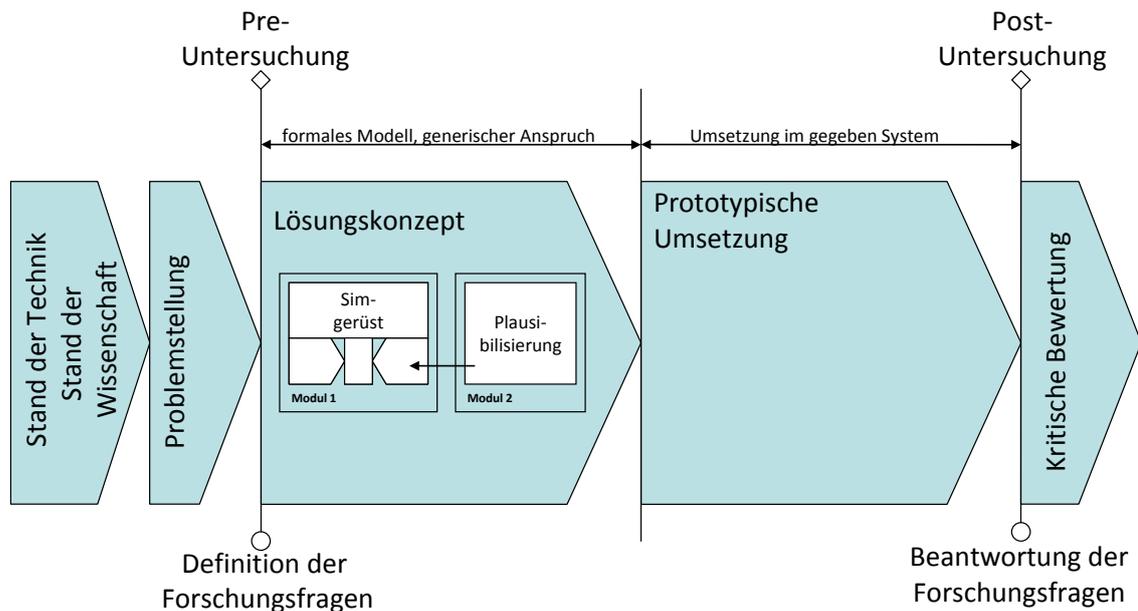


Abbildung 1.8: Gestaltungsrahmenkonzept der Arbeit

Kapitel 2 beschreibt den aktuellen Stand der Technik im Umfeld der Belieferungssimulation. Ausgehend von den Aufgaben der Logistikplanung und dem Konzept der Digitalen Fabrik wird der digitale Materialfluss beschrieben. Weiter werden Methoden der Absicherung der Planung diskutiert. Weiter wird die notwendige Informationsqualität für Belieferungssimulationen definiert und aufgezeigt, welcher Informationsbedarf für eine Simulationsstudie notwendig ist und wie sich der Bedarf an Eingangsdaten von statischen Absicherungen unterscheidet.

Kapitel 3 diskutiert die vorhandenen wissenschaftlichen Ansätze in diesem Kontext und untersucht diese auf Aussagen über die Qualität der Eingangsdaten, zu der Modellgenerierung mit Steuerungen und letztlich zu den Aussagen zur Modellvalidierung und Modellverifikation. Dabei stellte sich heraus, dass es zwar viele Ansätze gibt, Simulationsmodelle semi-automatisch zu generieren, allerdings bisher keine Ansätze bzgl. der Plausibilisierung der Eingangsdaten vorhanden sind. Diese Plausibilisierung der Eingangsdaten ist, wie in Kapitel 2 beschrieben, einer der signifikanten Aufwände einer Simulationsstudie. Durch die Bewertung der vorhandenen wissenschaftlichen Ansätze für eine Belieferungssimulation werden die Handlungsfelder aufgezeigt und im folgenden Kapitel in das Lösungskonzept überführt.

In **Kapitel 4** wird das Lösungskonzept erarbeitet. Hierzu werden die Eingangsdaten analysiert und gegebenenfalls mit einem Regelwerk noch nicht ausgeplante, fehlende, aber für die Belieferungssimulation relevante Daten ergänzt, was in frühen Planungsphasen der Fall sein kann. Auch wird die standardisierte Anbindung an das Planungssystem erarbeitet. Im zweiten Schritt erfolgt der Aufbau des Simulationsgerüsts, der zentralen Steuerstelle der Simulationsgenerierung. Das Simulationsgerüst ist ein Expertensystem, in welches das Layout integriert wird. Auch die Implementierung von nicht zwangsläufig digital vorhandenem Expertenwissen sowie der Aufbau der Klassenbibliothek für den Simulator sind im Simulationsgerüst enthalten. Im dritten Schritt werden für die qualitative Bewertung der

Eingangsdaten aus dem Planungssystem der Digitalen Fabrik Methoden zur rechnergestützten Plausibilisierung (Filterklassen) entwickelt. Sollten die Eingangsdaten einer definierten Mindestqualität entsprechen, kann das Simulationsmodell generiert werden. Im Anschluss wird aufgezeigt, wie die Belieferungssimulation zu validieren und zu verifizieren ist, um belastbare Experimente durchzuführen zu können. Dieses Konzept soll die Iterationsschleifen für die Modellvalidierung und -verifikation signifikant verkürzen.

In **Kapitel 5** wird das im vorangestellten Kapitel beschriebene Lösungskonzept prototypisch in einem Demonstrator umgesetzt. Die Umsetzung wird in einer produktiv genutzten Systemlandschaft implementiert, um die Praxistauglichkeit des Lösungskonzeptes unter Beweis zu stellen. Im Anschluss wird das Simulationsgerüst initialisiert, das Hallenlayout der Montage einer Baureihe integriert mit der *mysql*-Datenbank verbunden. Im nächsten Schritt werden die eingelesenen Planungsdaten von den Filterklassen auf ihre Plausibilität untersucht. Vor dem Modellaufbau wird zusätzlich noch das aufgebaute Regelwerk angewendet, um ggf. fehlende, für die Belieferungssimulation relevante Informationen zu errechnen. Der letzte Schritt beschreibt den Modellaufbau.

Die Bewertung der prototypischen Umsetzung und die Beantwortung der Forschungsfragen finden sich in **Kapitel 6**. Hier stehen vor allem die kritische Bewertung und die notwendigen Anpassungen des Planungssystems der Digitalen Fabrik und des Simulators im Vordergrund. Auch wird ein Ausblick gegeben, in welchen Bereichen ein weiterer Bedarf an Untersuchungen sinnvoll erscheint.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen beschrieben, die für das Lösungskonzept und den darauf aufbauenden Prototypen notwendig sind. Der Aufbau des Kapitels wird in Abbildung 2.1 beschrieben.

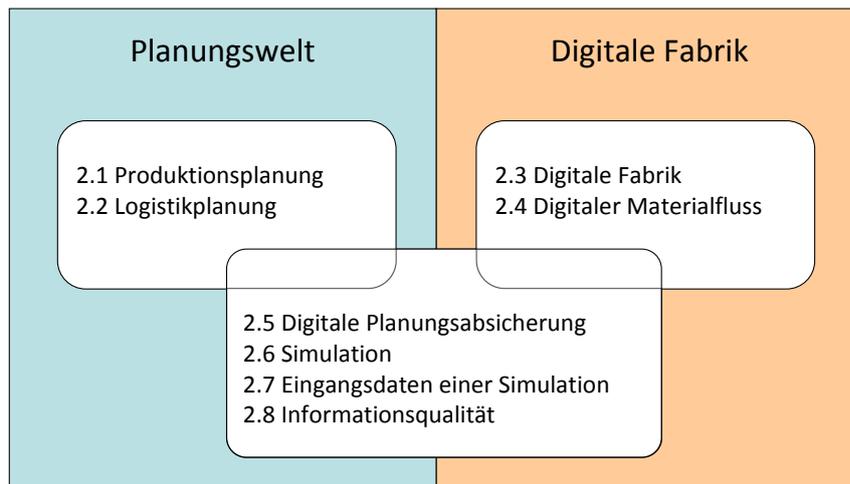


Abbildung 2.1: Aufbau Kapitel 2

2.1 Produktionsplanung

Die Produktionsplanung ist der Prozess der zielgerichteten Entscheidungsfindung zur Herstellung von Produkten und der Festlegung des Produktionsprozesses unter Berücksichtigung der dafür verfügbaren Produktionsfaktoren [DSV97]. Der Produktionsplanungsprozess setzt sich nach [SCH08] aus der Fabrikplanung, der Logistikplanung und der Fertigungsplanung, sowie der Produktentwicklung zusammen. Die Fabrikplanung schafft die Voraussetzungen für die Erreichung der betrieblichen Vorgaben. Ziele sind nach [VDI09] ein günstiger Produktions- und Fertigungsfluss, arbeitergerechte Arbeitsbedingungen, Flächen- und Raumausnutzung sowie Flexibilität der Bauten, Anlagen und Einrichtungen. Zu der Fertigungsplanung gehören die Arbeitsstationen, die Mechanisierungen, die Fördertechnik, die Lagerflächen sowie das Zusammenspiel innerhalb des Produktionsprozesses. Die Produktentwicklung beschäftigt sich mit der Entwicklung und Konstruktion neuer Baureihen von der Idee bis zum baufähigen Fahrzeug. Unter der Logistikplanung wird nach [DS08] der grundsätzlich systematische Prozess verstanden, der auf Grundlage unvollkommener Informationen Lösungen von Entscheidungsproblemen unter Beachtung der logistischen Ziele findet. Das Zusammenspiel der einzelnen Disziplinen wird durch definierte gemeinsame Meilensteine im Produktentstehungsprozess sichergestellt.

Die Produktionsplanung ist von der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) abzugrenzen: In der Produktionsplanung werden die strategischen und taktischen Entscheidungen für die Produktion festgelegt. Die PPS hingegen beschreibt nach [HAC89] den gesamten Serien-Produktlebenszyklus mit der Produktionsprogrammplanung, der Materialwirtschaft, der Termin-

und Kapazitätsplanung sowie die Auftragsfreigabe. Nach [LE01] umfasst die PPS die gesamte technische Auftragsabwicklung von der Angebotsbearbeitung bis hin zum Versand. Sie plant und steuert die betrieblichen operativen Aufgabenbereiche Konstruktion, Vertrieb, Einkauf, Teilefertigung, Montage und Versand [LE01]. Ein Betrachtungsansatz für das ganzheitliche Produktionssystem bietet das Aachener Modell [SCH06b]. Vorrangiges Ziel der PPS ist somit die operative Auftragsabwicklung.

Die Digitale Produktionsplanung bezeichnet nach [BWG09] die Rechnerunterstützung in der Produktionsplanung zur schnelleren Umsetzung von Produktdaten in Prozessdaten zur materiellen Erzeugung. Dabei ist ein wesentlicher Faktor die Verbindung von prozess- und produktorientierten Modellen zu einem integrierten Produktionsmodell [BWG09].

2.2 Logistikplanung

"Logistik ist die marktorientierte, integrierte Planung, Gestaltung, Abwicklung und Kontrolle des gesamten Material- und dazugehörigen Informationsflusses zwischen einem Unternehmen und seinen Lieferanten, innerhalb des Unternehmens, sowie zwischen dem Unternehmen und seinen Kunden" [SCH09].

Die Logistik besteht aus der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionslogistik.

Beschaffungslogistik:

Unter Beschaffung versteht man sowohl den Einkauf als auch die Beschaffungslogistik. Aufgaben des Einkaufs sind Beschaffungsmarktforschung, Ausschreiben und Prüfung der Angebote, Vertragsverhandlung und –Ausgestaltung und die Auswahl der Lieferanten (nach Lieferzeit, Termintreue, Flexibilität). „Die Aufgabe der Beschaffungslogistik besteht in der Planung, Steuerung und Implementierung aller notwendigen Strukturen und Prozesse zur bedarfsgerechten Versorgung des Unternehmens mit Gütern und Dienstleistungen (...), Ziel der Beschaffungslogistik ist die Sicherstellung der Versorgung des Unternehmens mit den von den nachgelagerten Wertschöpfungsstufen benötigten Einsatzgütern und Informationen" [HOM07a].

Produktionslogistik:

Wesentliche Funktionen der Produktionslogistik sind Transport- und Lageraufgaben, die Schaffung einer materialflussgerechten Fabrikstruktur bzw. Fabrikplanung, Produktionsplanung und -steuerung sowie die interne Materialbereitstellung in der Produktion und Montage. Die Produktionslogistik plant, steuert und überwacht den Materialfluss vom Rohmateriallager der Beschaffung über die Stufen des Fertigungsprozesses bis hin zum Fertigwarenlager [SCH09]. Die Intralogistik ist ein Teil der Produktionslogistik (vgl. Abbildung 2.2).

Distributionslogistik:

Sie stellt das Bindeglied zwischen der Produktion und der Absatzseite eines Unternehmens dar. Sie ist gekennzeichnet durch die Wahl der Absatzwege, die Gestaltung des Distributionskanals, die Tourenplanung, die Lagerhaltung im Vertriebsweg und die physische Warendistribution. Distributionslogistik befasst sich

also mit allen physischen, dispositiven und administrativen Prozessen der Warenverteilung von einem Unternehmen zum Kunden, Elemente sind die Auftragsabwicklung, Lagerhaltung und der Transport [SCH09].

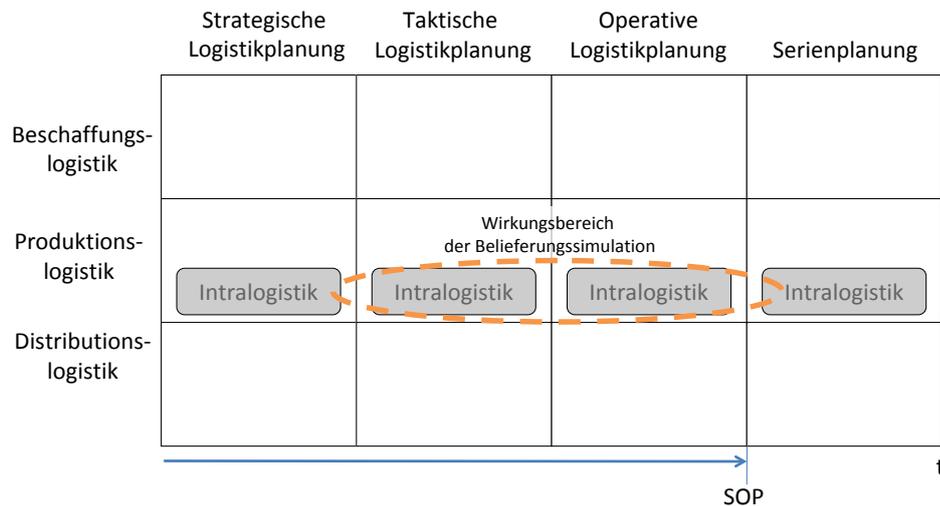


Abbildung 2.2: Wirkungsbereich der Belieferungssimulation

2.2.1 Intralogistik der Produktion

Die Intralogistik ist ein Teilgebiet der Produktionslogistik (vgl. Abbildung 2.2) und umfasst nach [ARN06] die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlages in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen. Dabei behandelt die Intralogistik nach [VDM04] die Prozesse von der Rampe (Wareneingang) bis zur Rampe (Warenausgang). Alle innerbetrieblichen Materialflüsse, Warenbewegungen und die damit verbundenen Arbeitsabläufe sind somit Bestandteile der intralogistischen Prozesse. Auch die organisatorische, steuerungs- und softwaretechnische Vernetzung sämtlicher Prozesse gehört nach dem VDMA dazu [VDM04].

Die Schnittstellen zur Beschaffungs- und Distributionslogistik sind somit der Wareneingang und -ausgang. Zu der Intralogistik gehören die Umfänge wie Logistikstationen (Lager, Kommissionierflächen, Bereitstellorte) und Ressourcen wie Flurförderzeuge und Ladungsträger. Die zentrale Herausforderung der Intralogistik ist die Beherrschung der Komplexität zu vertretbaren Kosten. Durch das Zusammenspiel mit weiteren Zielparametern wie der Durchlaufzeit, der Prozessflexibilität (Reduktion und Erhöhung der Materialflussmenge in einem Zeitintervall), der Termintreue, einer gleichzeitig hohen Robustheit sowie gegebene Nachverfolgbarkeit der Materialflüsse entsteht ein vielschichtiges Zielsystem [TKH06]. In der Automobilindustrie wurden in den letzten Jahrzehnten Konzepte entwickelt, die zur Komplexitätsbeherrschung und -bewältigung beitragen. Insbesondere in der Produktionslogistik kommen hier die Konzepte der Just-in-Time (JIT) Anlieferung und Just-in-Sequence (JIS) Anlieferung zum Einsatz [CZA09]. Die Intralogistik der Automobilindustrie hat ihren größten

Leistungsbedarf in der Montage, weil dort im Gegensatz zum Presswerk, zum Karosseriebau (Rohbau) und zur Karosserielackierung (Oberfläche) die größte Teilevielfalt mit den meisten Varianten in einem definierten Montagetak ohne Bestandsabrisse benötigt wird.

Abbildung 2.2 verdeutlicht den Wirkungsbereich der Belieferungssimulation. Im Folgenden wird die Belieferungssimulation insbesondere im Umfeld der taktischen Logistikplanung, welche „[...] alle einmalig zu treffenden Maßnahmen bezüglich der Gestaltung eines Logistiksystems und der darin stattfindenden Logistikprozesse auf der Fließsystemebene“ [SCH09a] untersucht. Die taktische Logistikplanung ist im Rahmen des Produktionsentstehungsprozesses detailliert genug, um belastbare Aussagen zu generieren, allerdings noch früh genug, um mit den Ergebnissen der Belieferungssimulation noch Einfluss auf die logistikgerechte Gestaltung von Prozessen vor der Produktion des ersten Fahrzeuges zu nehmen.

2.2.2 Aufgaben der Intralogistik

„70-80% der Kosten eines Produktes werden im Produktentwicklungsprozess definiert; die Qualität der Ergebnisse der Logistikplanung vor SOP tragen maßgeblich dazu bei, zu welchen Kosten ein Produkt später hergestellt werden kann“ [BHZ03], Seite 13. Die Qualität der Logistikplanung hat ebenfalls große Auswirkungen auf die Herstellkosten [MEN05]. Die Aufgabe der Intralogistik umfassen drei Hauptaufgaben, die teilweise eng mit anderen Domänen verzahnt sind (vgl. Abbildung 2.3):



Abbildung 2.3: Aufgaben der Intralogistik

Materialflussplanung

Aufgabe der Materialflussplanung ist die Gestaltung der einzelnen Transportketten je Produkt. Eine Transportkette beschreibt nach [DIN89] eine Folge „von technischen und organisatorisch miteinander verknüpften Vorgängen, bei den Personen oder Güter von einer Quelle zu einem Ziel bewegt werden“, d.h. von der Quelle über Lager- und Umschlagpunkte bis zur Senke. In

der Prozessplanung ist die Transportkette je nach layoutgerechter Auslegung der Versorgungsprozesse unterschiedlich ausgeprägt. Konkret wird für jedes benötigte Bauteil (vgl. Abbildung 2.6) eine Transportkette ausgearbeitet, die die unterschiedliche Logistikstationen vom Wareneingang über unterschiedliche Lager zum Bereitstellort sowie der Rücktransport leeren Ladungsträgers (Leergut) zum Warenausgang als abstrakter Prozess mit allen relevanten Ressourcen, darunter der Ladungsträger und das Transportmittel, verbindet.

Die Layoutplanung beschäftigt sich mit der Flächenplanung zur Erreichung der logistikgerechten Gestaltung auf Basis des Layouts. Als Beispiel kann hier das Finden der kürzesten Wege zwischen Lager und Bereitstellort aufgeführt werden. Sollten die Wegestrecken zu lange sein, kann eine Umsetzung des Lagers näher an die Bereitstellorte veranlasst werden. Dies umfasst zum einen die frühzeitige Einflussnahme auf die logistikgerechte Fabrikgestaltung, durch die Planung einer effizienten, internen Beschaffungskette auf Basis von Layoutdaten und allen Transportketten der Prozessplanung. Die Planung erfolgt in einer gewerkeübergreifenden, integrierten Planungsplattform auf definierten Standards (vgl. Konzept der Digitalen Fabrik, Kapitel 2.3).

Das Mengengerüst beschreibt die qualitative und quantitative Zusammensetzung einer Baureihe und bildet für jedes logistische Bauteil die passende Transportkette mit den dazugehörigen Ressourcen ab.

Die übergeordneten Ziele der Materialflussplanung sind die frühzeitige Einflussnahme auf die Fabrikgestaltung (logistikgerechte Fabrik), die Planung prozesssicherer und kostengünstiger Transportketten auf Basis der Prozess- und Layoutplanung, die Schaffung einer gewerkeübergreifenden Planungsplattform sowie der flächendeckende Einsatz von Standardmethoden. Die Materialflussplanung schafft die Voraussetzung für eine dynamische Absicherung mittels diskret-ereignisorientierter Materialflusssimulation.

Ladungsträgerplanung

Ein Ladungsträger ist ein Förderhilfsmittel und dient nach [DIN89] zum Transport, zum Umschlag und zum Schutz des Ladeguts. In der Regel ist ein Ladungsträger wieder verwendbar, teilweise über Vereine und Verbände wie den VDI und über den VDA standardisiert (z.B. VDA-Empfehlung 4500 [VDA10], DIN EN 13199 [DIN00]). Die Ladungsträgerplanung wählt diese Förderhilfsmittel unter Einbeziehung der beteiligten Partner unter der Prämisse aus, die zu verbauenden Teile wirtschaftlich und ohne Qualitätseinbußen zu transportieren. Ausprägungen sind neben Gewicht, Größe und Material auch Attribute wie Stapelfähigkeit und Klappbarkeit, was einen direkten Einfluss auf das Transportvolumen und den benötigten Platz im Lager hat. Die Standardisierung der Förderhilfsmittel ermöglicht zudem eine automatisierte Lagerhaltung in Hochregallagern bzw. automatischen Kleinteilelagern. Die Ladungsträgerplanung bündelt alle Informationen in einer zentralen Datenbank (Ladungsträgermanagement) mit Schnittstellen in die Digitale Fabrik. Insbesondere die Stammdaten der Ladungsträger mit den Eigenschaften Kapazität, Abmessungen, Gewicht und Zusatzfunktionen wie stapelbar und klappbar sind später für die Belieferungssimulation relevant. Um eine hohe Packungsdichte zu erreichen werden heute in der Ladungsträgerplanung virtuelle Packversuche durchgeführt, welche wiederum rückwirkend einen Einfluss auf die Produktgestaltung nehmen.

Einsatzfaktorenplanung

Nach [RMW10] gibt der Einsatzfaktor das Verhältnis von Einsatzmenge einer Kostenstelle zu ihrer Ausbringungsmenge an (vgl. Abbildung 2.4). In der Logistik werden unter Einsatzfaktoren Objekte verstanden, durch welche Ladungsträger bewegt werden. Dazu gehören unter anderem Flurförderzeuge (FFZ) wie Stapler und Umfuhzüge (Routenzüge, Trolleyzüge). Die Anzahl der neu zu beschaffenden FFZ vor dem SOP einer neuen Baureihe ergibt sich aus der Hochrechnung abzüglich der Anzahl vorhandener und erneut einsetzbarer FFZ. Die Einsatzfaktorenplanung steht in der Verantwortung, zum SOP die benötigte Anzahl an FFZ bereitzustellen. Zur Ermittlung der benötigten Einsatzfaktoren werden sowohl statistische wie dynamische Verfahren eingesetzt. Um eine gleichverteilte Auslastung über den Arbeitstag zu erzielen ist der statistische Mittelwert ausreichend. Für die Ermittlung und Visualisierung von Bedarfsspitzen sind dynamische Methoden wie der Einsatz der Belieferungssimulation notwendig.

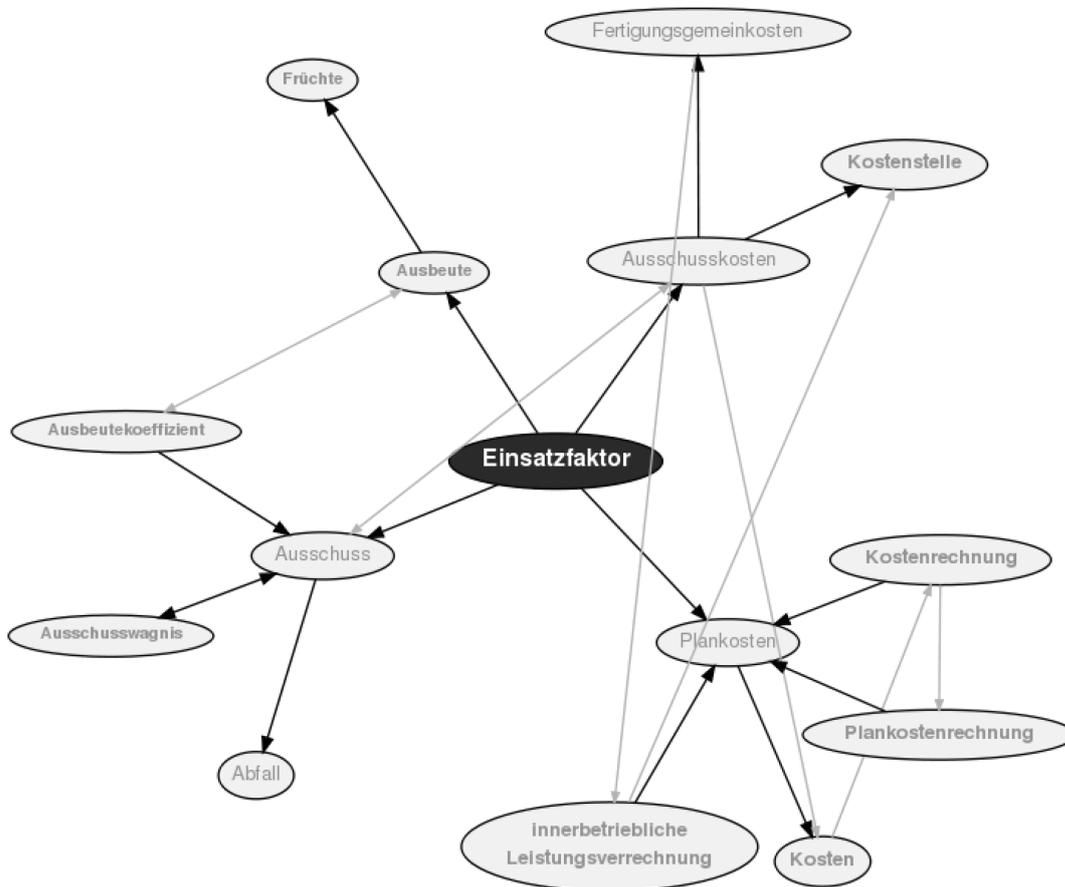


Abbildung 2.4: Dendrogramm für Einsatzfaktoren [RMW10]

2.2.3 Phasen der Logistikplanung

Die Logistikplanung lässt sich in vier Phasen unterteilen, drei vor dem SOP sowie eine nach SOP (vgl. Abbildung 2.5). Diese Phasen sind die strategische Phase, die taktische Phase mit operativer Phase sowie die Serienplanung. Die strategische Phase entscheidet auf Basis von

technischen Produktbeschreibungen und Informationen aus Referenzprodukten vorrangig kostenorientiert über Standorte [BIE04]. In der taktischen Logistikplanung werden alle einmalig zu treffenden Maßnahmen bezüglich der Gestaltung eines Logistiksystems und der darin stattfindenden Logistikprozesse auf der Fließsystemebene verstanden [SCH08]. Hierbei beginnt die Planung der Produktionslogistik, das Lieferantenmanagement beginnt mit den Verhandlungen, die Ladungsträgerplanung bestimmt den Ladungsträgerumlauffaktor je potentiellen Lieferanten und errechnet die benötigten Behälter. Weiter beginnt die Materialflussplanung, auf Grundlage von Standardprozessen je nach Belieferungsform die einzelnen Transportketten (Logistikpläne) nach [DIN89] auszuarbeiten und mit den entsprechenden Ressourcen auszustatten. In der Phase der operativen Logistikplanung übernimmt das Anlaufmanagement die termin- und qualitätsgerechte Versorgung der Anlaufproduktion mit Teilen und überführt die Vorserienprozesse schrittweise in die im Rahmen der taktischen Logistikplanung aufgebauten Serienprozesse. Diese Phase kann in die drei Phasen Vorserie, Nullserie und Produktionshochlauf weiter unterteilt werden [FIT06]. Die Serienplanung wickelt den Auftrag auf Basis vorhandener Kundenaufträge (Built-To-Order-Prozess) ab. Dies wird größtenteils in der Produktionsplanung- und Steuerung abgebildet. Dazu stehen die notwendigen Ressourcen und die definierten Anlieferkonzepte zur Verfügung [SCH08].

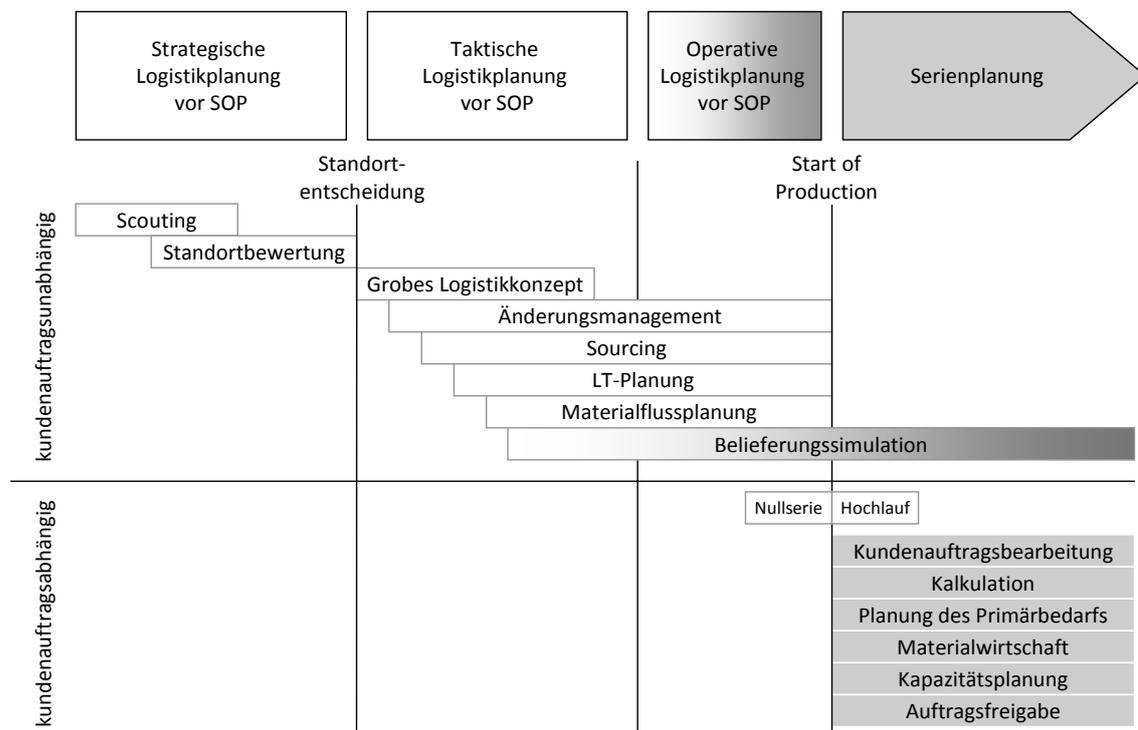


Abbildung 2.5: Meilensteine im Planungsprozess [SCH08], erweitert um die Belieferungssimulation

2.2.4 Standardisierung in der Intralogistik

Um den Anforderungen an die Prozesse der Intralogistik gerecht zu werden, ist eine „wesentliche Grundvoraussetzung für hohe Flexibilität [...] ist die Definition von verfügbaren

Prozessstandards“ [RB07]. Die Standards in der Intralogistik stellen sicher, dass eine hohe Anzahl an heterogenen Anforderungen durch eine geringe Anzahl an standardisierten Prozessen bedient werden kann [GH07]. Mit dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit ist ebenfalls das Argument der Beherrschung der Komplexität eng verzahnt. Nach [HOM07b] reduzieren Standardprozesse den Planungs- und Steueraufwand und können somit zur Komplexitätsreduzierung beitragen. Die Einführung von standardisierten Prozessen zur Verminderung hoher Komplexität kann die logistischen Prozesse transparenter und wirtschaftlicher machen [BS06]. Abbildung 2.6 verdeutlicht eine standardisierte Vorgehensweise für die Planung einer Transportkette.

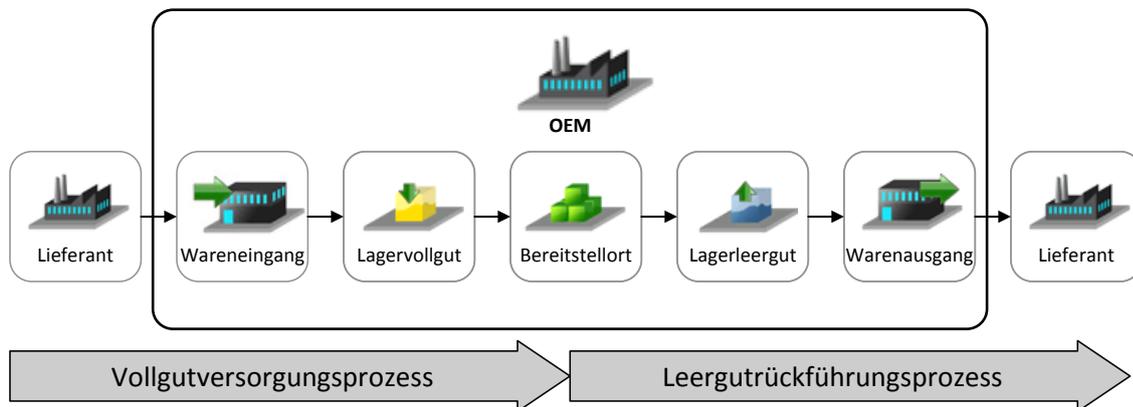


Abbildung 2.6 Standardisierung der Prozessplanung in der Intralogistik nach [ROO09]

2.2.5 Wertschöpfung und Durchlaufzeiten in der Intralogistik

Auch die Wertschöpfung ist zu berücksichtigen: diese wird nach [EVE96] definiert als Rohertrag einer Aktivität abzüglich der Vorleistung einer Aktivität. Die Wertschöpfung kann mit der Wertkettenanalyse nach [POR04] visualisiert werden. Diese Wertkette und die darin ablaufenden Transaktionen müssen den Kosten gegenübergestellt und deren Kostentreiber analysiert werden [WIL02].

Die Intralogistik ist nach der Definition von [LW06] nicht wertschöpfend, allerdings ist diese zwingend notwendig, um wertschöpfende Tätigkeiten zu ermöglichen und diese zu unterstützen. Im Sinne des ökonomischen Prinzips ist das Minimalprinzip anzuwenden: die Durchführung des innerbetrieblichen Materialflusses in definierter Qualität mit einem geringen Aufwand (Zeit, Weg, Kosten).

Für die Wertkette nach [POR04] ist die Durchlaufzeit eine der wichtigen Kenngrößen. Übertragen auf die Intralogistik ist die Durchlaufzeit der einzelnen Bauteile ein wichtiger Indikator für die Anzahl an Beständen. Eine geringe Durchlaufzeit setzt niedrige Bestände, und damit wenig Lagerzeit und –kosten, voraus. Nach [EVE96] muss das logistische Ziel der Produktion niedrige Bestände und schnellstmögliche, pünktliche Kundenbelieferung sein, basierend auf Littles Gesetz [LIT61] zur Warteschlange. Dazu gehören bereits in der Produktionsplanung die Definition der Lagerflächen in nächster Nähe von Wareneingängen und Bereitstellorten, um lange Transportwege in der Montagehalle zu vermeiden.

2.3 Digitale Fabrik

2.3.1 Begriff und Ziel der Digitalen Fabrik

Die Digitale Fabrik wird nach [VDI08b] definiert als ein „[...] Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen und Methoden unter anderem der Simulation und 3D-Visualisierung. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ Die Digitale Fabrik betrachtet zwei Dimensionen. Die erste Dimension bildet die reale Fabrik mit all ihren Prozessen in einer hinreichenden Detaillierung ab. Die zweite Dimension ist an der Zeitachse des Produktlebenszyklus angelegt und besteht aus den Tätigkeitsfeldern Produktentwicklung, Produktionsplanung und Betrieb (Produktion). [ERS10] fasst den Begriff enger, er versteht unter der Digitalen Fabrik die Digitalisierung der Produktionsplanung. Eine Übersicht ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

Autor	Hauptpunkte	Nebenpunkte
Bley u. Franke	Modellmanagement Datenaustausch Wissensmanagement	-Mitarbeiterwissen -Produktmodell -Prozessmodell -Simulationssoftware
Dombrowski	Virtuell zu betreibendes Modell der realen Fabrik Rechnergestützte Abbildung aller Gestaltungsmerkmale und Prozesse der Fabrik	-Simulation und Visualisierung -Prozesse und Produktion -Virtuelle Inbetriebnahme
Bracht	Bindeglied zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung	-Simulation und Visualisierung -Prozesse und Produktion -Virtuelle Inbetriebnahme
Wiendahl	Rechnermodell	-Organisationsstrukturen -Logistische Prozesse -Gebäude/Technik/Betriebsmittel
Westkämper	Datenmodell	-Organisation und Planungsworkflow -Datenbasis und -management -Visualisierung und Simulation
Wenzel	Vernetzte digitale Modelle, Methoden und Werkzeuge	-Organisation und Planungsworkflow -Datenbasis und -management -Visualisierung und Simulation
Marczinsk	Rechnergestützte Engineeringwerkzeuge	-Methodenplanung -Fabrikplanung (Struktur, Werk) -Logistikplanung und Materialfluss

Abbildung 2.7: Definitionen der Digitalen Fabrik [BWG09]

In der vorliegenden Arbeit wird unter dem Begriff der Digitalen Fabrik das Konzept verstanden, die Produktionsplanung mit digitalen Methoden zu unterstützen und daraus neue Synergien nutzen zu können.

Ziel der Digitalen Fabrik ist die Gestaltung einer ganzheitlichen Produktentwicklung, Produktionsplanung und Produktion in turbulenten Absatzmärkten und abnehmenden Produktlebenszyklen [WZ09]. Nach [VDI08b] ist der Zweck der Digitalen Fabrik die ganzheitliche Planung, Realisierung und Steuerung und kontinuierliche Verbesserung aller wesentlichen Fabrikprozesse und –ressourcen in Verbindung mit dem Produkt zu schaffen. Die Digitale Fabrik bildet nach [ROO09] die Grundlage für die integrierte Zusammenarbeit zwischen Produktentwicklung, da die simultane Produkt- und Produktionsentwicklung ermöglicht wird. Dahinter steht der Standardisierungsgedanke, um Skaleneffekte bei weiteren Produkten bzw. Baureihen zu schaffen und damit sowohl Investitions- wie operative Kosten zu sparen. Um dieser Herausforderung zu begegnen ist eine weitere Spezialisierung der Mitarbeiter notwendig. Die verkürzte Entwicklungs- und Planungszeit sowie die Koordination der verteilten Aufgaben auf unterschiedliche Fachexperten erfordern durchgängige Prozesse sowohl organisatorisch wie systemseitig. Gerade die Produktionsplanung als Bindeglied zwischen der Produktentwicklung und der Produktion profitiert im Besonderen von der Digitalen Fabrik (vgl. Abbildung 2.8).

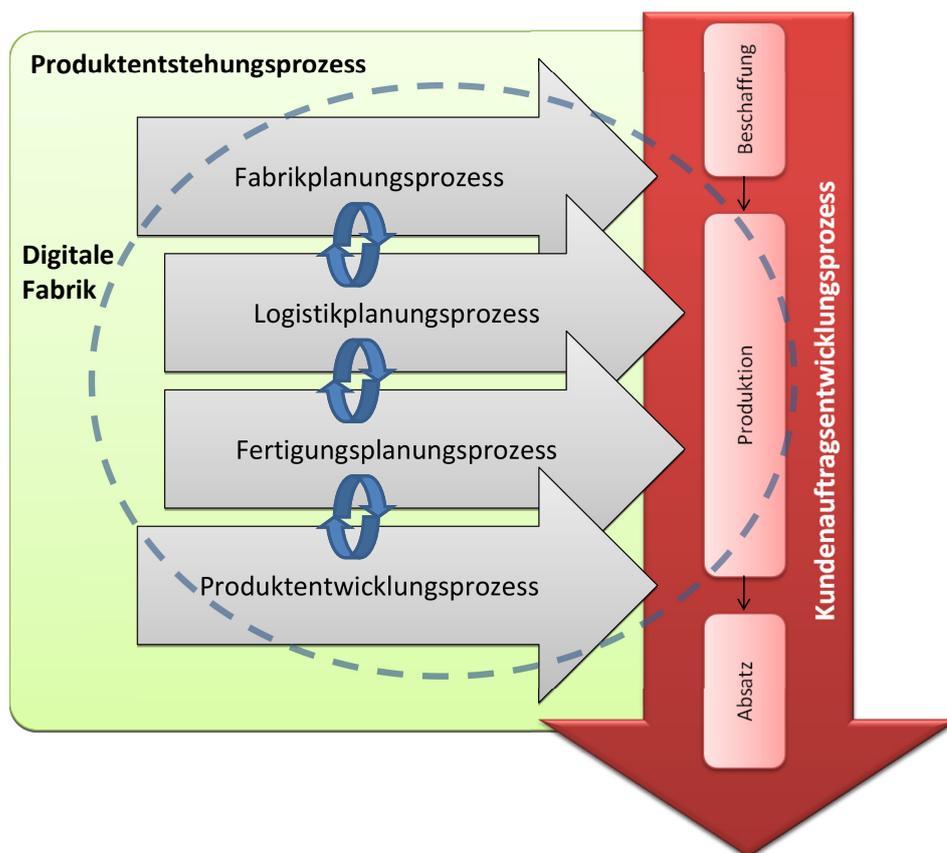


Abbildung 2.8: Die Digitale Fabrik im Umfeld des Produktentstehungsprozess und Kundenauftragsentwicklungsprozess, angelehnt an [SCH08]

2.3.2 Aufgaben der Digitalen Fabrik

Nach [KÜH06] beruht die Digitale Fabrik auf vier Stoßrichtungen: die Integration aller betriebsrelevanten Daten an einem zentralen Speicher (Single Source Of Truth), die Standardisierung von Prozessen und Ressourcen, die digitale Unterstützung von Arbeitsabläufen und die Auslegung der Prozesse für eine Automatisierung. Daraus abgeleitet sind nach [VDI08b] die Fachaufgaben der Digitalen Fabrik unter anderem:

- Übernahme der Produktplanungsdaten der Produktentwicklung
- Prozesszeitenplanung
- Planung der Produktionsprozesse
- Planung der Einsatzfaktoren
- Layoutplanung der Fabrik, der Gewerke, der Bereiche und der Arbeitsplätze
- Kostenauswertungen
- Absicherung der Planungsergebnisse, beispielsweise über Simulationsprojekte
- Übergabe von validen Daten an den Betrieb

Die Digitale Fabrik ermöglicht Produktionsanlagen und –prozesse digital zu beplanen, die Herstellbarkeit des Produkts sowie die Planungsstände frühzeitig abzusichern und die Planungsgewerke mit einer gemeinsamen strukturierten Datenbasis zu verbinden. Dazu gehören in der Produktionsplanung die Fabrikplanung (Gebäudeplanung, Einrichtungsplanung), die Rohbauplanung, die Oberflächenplanung (Lackplanung), die Montageplanung und die Logistikplanung. Die Digitale Fabrik ist nach der Definition des ausgewählten deutschen Automobilherstellers ein Hauptstellhebel zur Umsetzung von Effizienzsteigerung, Standardisierung und zur Erhöhung der Planungsqualität. Ansatzpunkte sind die Optimierung der Planungsprozesse durch digitale Methoden und Werkzeuge, die frühzeitige Absicherung der Planungsumfänge bzgl. Herstellbarkeit, die gewerkeübergreifende Integration mit einer engen Verzahnung von Entwicklung und Produktion, das Entwickeln von Standards und Bibliotheken sowie die Sicherstellung der Datendurchgängigkeit und –versorgung. Anwender der Digitalen Fabrik sind die Prozess- und Layoutplaner aus den unterschiedlichen Gewerken. Abbildung 2.9 zeigt ausgewählte Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik nach [BWG09].



Abbildung 2.9: Ausgewählte Anwendungsfelder der Digitalen Fabrik [BWG09]

2.3.3 Komponenten der Digitalen Fabrik

Die Digitale Fabrik besteht aus einer organisatorischen und einer systemtechnischen Komponente, die eng miteinander verzahnt werden müssen [BM07], [BRK04]. Die Digitale Fabrik ist somit nicht ausschließlich Software, sie muss im Gesamtkontext der Unternehmung gesehen werden [ROO09].

Der Erfolg der Digitalen Fabrik setzt eine wandlungsfähige Organisation voraus. Die Digitale Fabrik schafft keine Ordnung, sie setzt Ordnung voraus [HIN04]. Daher setzt eine erfolgreiche Implementierung die Schaffung von klaren Methoden, Verbindlichkeiten und Verantwortlichkeiten voraus [ROO09]. Da die Digitale Fabrik nur mit allen Beteiligten gemeinsam gelebt werden kann, befindet sich der Arbeitspunkt in der Mitte eines Top-Down- und eines Bottom-Up-Prozesses. Der Top-Down-Prozess gibt die Vorgaben und die Rahmenbedingungen und stellt die notwendigen Ressourcen zur Verfügung. Der Bottom-Up-Prozess identifiziert in interdisziplinären Workshops auf Sachbearbeiterebene die einzelnen Planungsprozesse, die analysiert und anschließend anhand von Best-Practise zu abgestimmten Soll-Prozessen überführt werden [KÖT03]. Für die Gestaltung der Planungsmethoden und –prozesse ist die Mitwirkung der Planungsexperten notwendig, da diese nach der Einführung mit den Werkzeugen der Digitalen Fabrik arbeiten werden [GSS06]. Insbesondere ist die Verankerung eines Change-Managements hervorzuheben, um das Planungssystem an veränderte Anforderungen der Planung anpassen zu können. Nach [ROO09] hat es sich nach der Einführung der Planungsmethodiken gezeigt, dass die Transparenz des Planungssystems eine große Bedeutung hat, nur offengelegte und nachvollziehbare Prozesse, Funktionen und Methoden finden einen die Akzeptanz der Planer.

Nach der Implementierung der Digitalen Fabrik stellt organisatorisch ein digitaler Planungsworkflow mit definierten Meilensteinen im Planungsprozess sicher, dass die notwendigen Daten in der richtigen Detaillierung zum richtigen Zeitpunkt in der benötigten Qualität zur Verfügung stehen. Systemtechnisch werden alle relevanten Planungsdaten erfasst und zentral verwaltet. Die unterschiedlichen Fachexperten können somit auf den identischen aktuellen Datenbestand zugreifen. Dabei liegt das Hauptaugenmerk nicht in der Entwicklung und Bereitstellung einer neuen übergreifenden Softwarelösung, vielmehr steht das systematische Zusammenführen bereits vorhandener, leistungsfähiger Werkzeuge zu einer integrierten Planungsumgebung im Vordergrund [BK08].

2.4 Digitaler Materialfluss

2.4.1 Idee und Ziel

Die Idee des digitalen Materialflusses beschreibt die virtuelle Planung logistischer Prozesse und Strukturen [HHR04]. Als virtuell wird die Eigenschaft eines Objektes nach [HHR04] bezeichnet, physisch nicht vorhanden zu sein. Der digitale Materialfluss bildet die Transportkette durch einen Logistikplan ab. Der betrachtete Versorgungsprozess pro Teil reicht vom Wareneingang bis zum Bereitstellort, der Entsorgungsprozess betrachtet die leeren Ladungsträger vom Bereitstellort zurück zum Warenausgang.

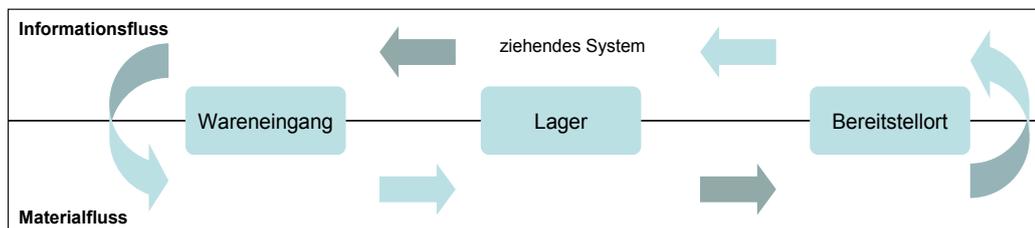


Abbildung 2.10: Kreislauf des Informations- und Materialfluss bei der Pull-Versorgung

2.4.2 Aufbau des Mengengerüsts

Das Mengengerüst beschreibt im Umfeld der Automobilindustrie in der taktischen Logistikplanung die qualitative und quantitative Zusammensetzung aller relevanten Bauteile und bildet pro Teilefamilie die passende Transportkette mit den dazugehörigen Ressourcen ab [SO06]. Abgebildet wird das Mengengerüst in der Planungsdatenbank der Digitalen Fabrik. Mit der Definition der werks- und hallenspezifischen Parameter wird das Mengengerüst aufgesetzt. Die Initialbefüllung besteht aus der Übernahme der wichtigsten Umfänge der sich bereits in der Serienproduktion befindlichen Vorgängerbaureihe. Hierzu werden alle JIS (Just-in-Sequence), JIT (Just-in-Time) und SLT (Sonderladungsträger) Umfänge gezählt. Die Stammdaten der Bauteile werden angelegt und in Teilefamilien gebündelt. Um die Teilefamilien übersichtlich zu halten, werden sämtliche Positionsvarianten mit gleichen Geometrien von Prozessplanern zusammengefasst (Voraussetzung sind identische Logistikprozesse, identische Ladungsträger, identischer Ladungsträgerinhalt, identischer BO, identischer Lieferant). Zur Unterstützung stehen detaillierte Geometrieinformationen aus der Produktentwicklung bereit.

Nach der Bündelung der Teilefamilien werden die passenden Ladungsträger für die Bauteile definiert. Hier stechen drei Aspekte hervor: größtmöglicher Schutz der Bauteile, bestmögliche Raumausnutzung sowie leichtes Abgreifen der Bauteile am Band. Bevorzugt werden Universalladungsträger (ULT) eingesetzt, da diese von den Kosten und von der Verbreitung Vorteile gegenüber Spezialanfertigungen mit sich bringen. Nach [BIE04] hat die richtige Auswahl, Zuordnung und Befüllung der Ladungsträger das größte Potential für Optimierungen. Weiter ist die Zuordnung von Bauteil zu Ladungsträger eine der Voraussetzungen für die Bandaustaktung in der Montage sowie bietet diese dem Einkauf die Basis für detaillierte Ausschreibungen [ROO09]. Die Maximierung der Teileanzahl pro Ladungsträger wird unter folgenden Prämissen ermittelt: bevorzugte Verwendung eines Standardladungsträgers, Vermeiden von Berührungen (Kollisionen) während des Transports, ergonomisches Be- und Entladen sowie die Stapel- und Klappbarkeit des Ladungsträgers.

Im nächsten Schritt werden die unterschiedlichen Bereitstellorte den Teilefamilien zugeordnet. Damit können die ersten Transportketten (Prozess) angelegt werden, basierend auf den Standardbelieferungsformen (JIS, JIT, LLZ (Lieferanten-Logistik-Zentrum)). Ziel ist ein vollständig parametrisiertes Prozessmodell pro Bauteil mit allen dazugehörigen Ressourcen. Dies ist die Leistung des Logistikplaners und wird händisch geplant und im Mengengerüst dokumentiert. Der Versorgungsprozess zeichnet sich durch eine regelmäßige Abfolge von Transportvorgängen aus [ROO09] und erstreckt sich über die gesamte Belieferungskette als

Vollgutversorgungsprozess vom Lieferanten über den Wareneingang und über ein oder mehrere Lager zum Bereitstellort. Der Leergutrückführungsprozess erstreckt sich vom Bereitstellort über ein Lagerleergut zurück zum Lieferanten.

Abschließend wird die Teilefamilie mit den Transportketten verknüpft, zusätzlich wird der Lieferant mit angebunden, sofern die Umfänge bereits vergeben sind. Bereits jetzt werden erste Einsatzfaktoren statisch berechnet sowie die Kostenberechnung der Logistik sukzessiv aufgesetzt. Nach der Beplanung der volumenstarken Umfänge werden die verbleibenden GLT und KLT in das Mengengerüst implementiert. Bei einem Bereitstellort links und rechts am Montageband (unterschiedliche Verbauposition) werden die Teilefamilien dupliziert, um bei der Belieferung den Aufwand größtmöglich zu reduzieren. Dies hat allerdings auch zur Folge, dass die vorgelagerten Prozesse sich ändern können (Meistereibezug, Routenzug, ...). Mit der entsprechenden Layoutreife werden die Logistikstationen (Prozess) der Transportketten mit den tatsächlichen Layoutflächen (Ressource) verknüpft sowie die tatsächlichen Bereitstellorte der Montage zugeordnet. Ab der Zuordnung von Transportkette und Bereitstellort kann statisch mittels heuristischer Verfahren die Routenermittlung für FFZ ermittelt werden. Im Anschluss können erste Belieferungssimulationen aufgebaut werden.



Abbildung 2.11: Digitaler Logistikplanungsprozess eines deutschen Automobilherstellers (ohne Iterationsschleifen) [BRA04]

In der digitalen Planungsunterstützung unterscheiden sich die einzelnen Phasen von der Materialflussplanung, der Prozess ist in Abbildung 2.11 abgebildet.

2.4.3 Datenkonzept

Die in der Einleitung angesprochenen Umfrageergebnisse [MS09] zeigen den Bedarf einer Methodik, mit welcher die Effizienz der Erstellung einer Belieferungssimulation erhöht – und damit die Kosten reduziert werden können. Insbesondere die Thematik der Modellgenerierung und -aktualisierung sowie die Datenqualität von Belieferungssimulationen sind von hohem personellem und monetärem Aufwand begleitet, der bisher einer weiteren Verbreitung entgegenwirkt.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, werden vorab die hinreichende Granularität (Grob- oder Detailplanung) und die benötigte Informationsqualität definiert. Eine Belieferungssimulation ist auf Grund ihrer Beschaffenheit sehr detailliert, da im Gegensatz zu anderen Ausprägungen der Materialflusssimulationen die Komplexität durch die Interaktion vieler individueller Transportprozesse entsteht. Aus diesem Grund ist eine entsprechende große Detaillierungsebene notwendig, da Abstraktionen Auswirkungen auf das Verhalten der einzelnen Objekte haben können – und damit die Aussagekraft der Ergebnisse einschränken. Dank der Methodik der Digitalen Fabrik sind die meisten der Eingangsdaten in der benötigten Detaillierung mit MTM-Zeiten der einzelnen Prozesse bereits im Mengengerüst hinterlegt.

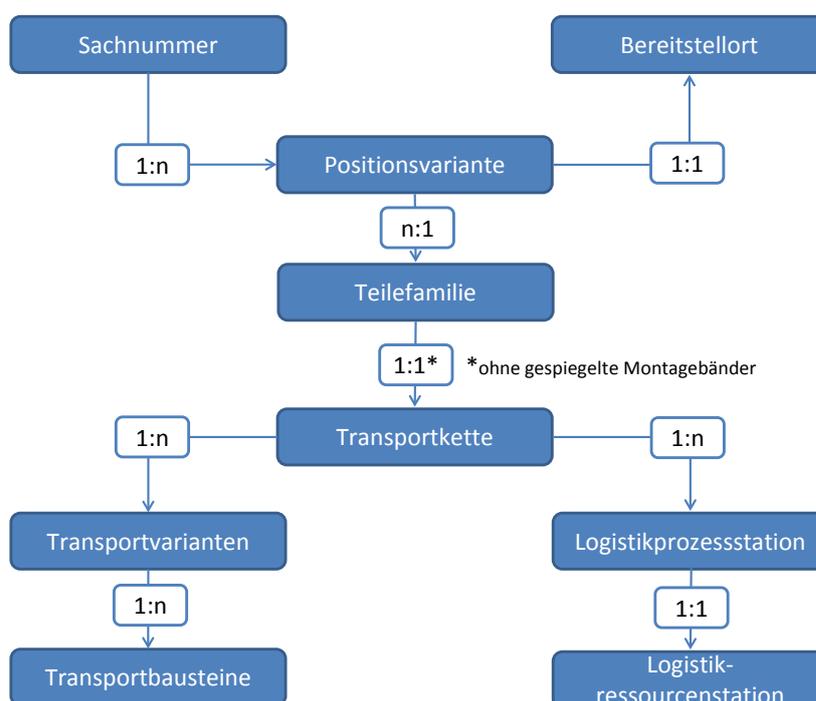


Abbildung 2.12: Beziehung der Sachnummer in Belieferungssimulationen

Im Planungsprozess werden Positionsvarianten (PosV) mit voraussichtlich identischer Logistik (Beförderungsform, Ladungsträger (LT), LT-Inhalt, Lieferant, ...) zu Teilefamilien gebündelt. Für jede Teilefamilie wird eine Transportkette ausgeplant. Diese Transportkette enthält den Prozess (Logistikstation-Prozess, LSP), die Ressourcen (Ladeeinheiten, Ladungsträger sowie Transportmittel) und die entsprechenden Koordinaten in der Montagehalle (Logistikstation-Ressource, LSR). Die Beziehung dieser Elemente wird in der Übersicht Abbildung 2.12 visualisiert.

Sachnummer

Jedes Bauteil muss eindeutig und unverwechselbar ansprechbar sein. Dies ist in DIN 6763 [DIN85] definiert. Die Sachnummer erlaubt durch den numerischen Aufbau mit einer eindeutigen Nomenklatur zudem eine gewisse Klassifizierung der Bauteile zu bestimmten Bauteilgruppen.

Positionsvariante

Die Positionsvariante (PosV) beschreibt 1 bis n identische Bauteile, die am gleichen Bereitstellort angeliefert werden, sich jedoch an ihrem zeitlichen und sachlichen Verbauort unterscheiden. Die Positionsvariante zeigt jeweils auf ein konkretes Bauteil (Sachnummer).

Teilefamilie (Logistik-Prozess-Teilefamilie)

Die Teilefamilie ist die Summe aller Positionsvarianten, die am identischen Bereitstellort angeliefert und der identischen Montagestation verbaut werden. Durch die Bildung der Teilefamilie lassen sich die Positionsvarianten in Gruppen zusammenfassen, welche in der gleichen Transportkette ausgeplant werden. Dies führt zu einer Effizienzsteigerung und ist somit einer der primären Aufgaben der digitalen Logistikplanung in der Digitalen Fabrik.

Transportkette

Die Transportkette enthält alle relevanten Informationen für Transport und Handling zwischen für jede Teilefamilie. Die Transportkette setzt sich zusammen aus den Logistikprozessstationen, verbunden mit den entsprechenden Transportvarianten, verknüpft mit den dazu geplanten Ressourcen wie Flurförderzeuge und den Logistikressourcenstationen.

Bereitstellort

Der Bereitstellort ist die Logistikfläche am geplanten Montageband. Hier erfolgt der Übergang zwischen logistischer Bereitstellung des Ladungsträgers und dem montageseitigen Entnahme der Bauteile aus dem Ladungsträger.

Logistikprozessstationen

Die Logistikstation-Prozess (LSP) ist ein Prozessobjekt, in welchem wegeunabhängige Prozesse an einem Ort (z.B.: Lagervollgut) gebündelt werden. Als Teil der Transportkette stellt die Logistikprozessstation eine Beziehung zwischen zwei Transportvarianten dar. Zudem wird die LSP im späteren Planungsverlauf mit den Koordinaten der Logistikressourcenstation verknüpft, um für die Ermittlung der Entfernungen als Knotenpunkte zu fungieren.

Logistikressourcenstation

Die Logistikstation-Ressource (LSR) ist ein Ressourcenobjekt im Layout. Die LSR repräsentiert eine Angebotsfläche im Hallenlayout. Mit der Verknüpfung zu der Logistikprozessstation wird eine 1:1 Beziehung hergestellt und die LSR ist als Knotenpunkt in den verschiedenen Transportketten sichtbar.

Transportvariante

Die Transportvariante (TV) bündelt n einzelne Prozessschritte (Transportbausteine) zwischen zwei Logistikprozessstationen von wegeabhängigen und wegeunabhängigen Logistikprozessen mit den benötigten Ressourcen. Somit beschreibt die TV alle für einen Transport notwendigen Schritte zwischen zwei Logistikprozessstationen.

Transportbaustein

Der Transportbaustein (TB) ist das kleinste Prozesselement in der Prozessplanung in der Logistik. Als Bestandteil der Transportvariante beschreibt der TB Transport- und Handlingsprozesse. Bei den Transportprozessen ergeben sich die Transportzeiten aus Wegstrecke und den Eigenschaften des verknüpften Transportmittels. Bei Handlingsprozessen ergeben sich diese Handlingszeiten aus den MTM-Werten.

Die Fahrzeiten werden bei der maßstabsgetreuen Abbildung des Montagelayouts errechnet, die TBs mit Handlingszeiten sind nach der MTM-Methode ermittelt. Dazu werden zusätzlich pauschal 20% der Fahrzeit für Störverkehr, Bremsen an Kreuzungen oder vor Kurven dazugerechnet. Durch die Zuweisung eines Ressourcenpools (Logistik-Meisterei) werden die einzelnen TBs parametrisiert und der Transportvariante zugeordnet. Ein Beispiel für einen Transportbaustein ist ein Fahrweg zwischen einem Lager und einem Bereitstellort mit einem definierten Transportmittel, ein weiteres Beispiel ist das Handling für die Bereitstellung eines Ladungsträgers in einem Lager. Abbildung 2.13 zeigt die Parametrierung eines Transportbausteins im Planungssystem der Digitalen Fabrik.

Abbildung 2.13: Parametrierung eines Transportbausteins im Planungssystem

Um eine Belieferungssimulation durchführen zu können, müssen alle oben beschriebenen Objekte der Belieferung für jedes benötigte Bauteil vollständig parametrisiert sein. Damit werden die Voraussetzungen geschaffen, ein belastbares Modell aufzubauen und die Plandaten qualifiziert zu bewerten. Ein Verständnis der Datenstruktur und ein Verständnis des Verhaltens im Simulationsmodell wird vorausgesetzt, um im Nachgang die Modellvalidierung und – Verifikation (vgl. Kapitel 2.7.1.1), durchführen zu können.

2.5 Digitale Planungsabsicherung in der Logistik

Der Produktionsplanungsprozess der heutigen Intralogistik für Montagegewerke wird von einer Vielzahl an Methoden unterstützt, die die Planungsdauer bei gleichzeitiger Steigerung der Planungsqualität reduzieren.

Die oberste Prämisse der Intralogistik ist es, zu jeder Zeit das richtige Bauteil am richtigen Bandabschnitt der Montage bereitzustellen, um Abrisskausalitäten am Bereitstellort zu vermeiden. Daher müssen diese Kausalitäten vorab identifiziert werden. Dafür eignen sich sowohl statische Methoden, ebenso wie Methoden des Operations-Research wie mathematische Optimierung, Heuristiken und die Simulation.

Um die Abrisskausalitäten zu identifizieren, müssen die einzelnen Materialflüsse sowohl individuell als auch im Zusammenspiel untersucht werden. Die Ursachen für einen Abriss der Versorgung können im Material und im Informationsfluss begründet sein (vgl. Abbildung 2.14).

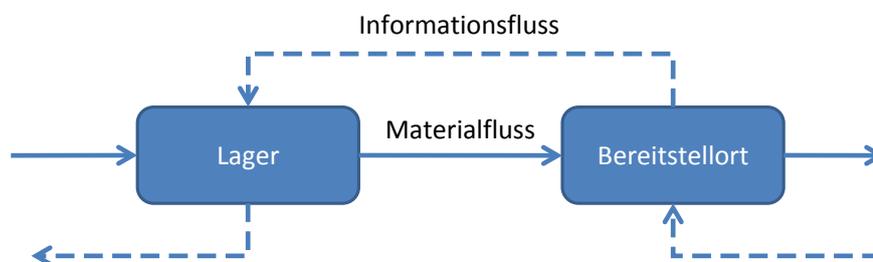


Abbildung 2.14: Ausprägungen möglicher Abrisskausalitäten

Die Möglichkeiten für einen Bestandsabriss sind vielfältig, Ursachen auf Seiten der Logistik können fehlendes Material im Lager sein, das angelieferte Material ist defekt oder wurde falsch ausgeliefert, die Transporte sind falsch getaktet oder der Platz am Bereitstellort wurde falsch dimensioniert. Weitere Abrisskausalitäten sind, dass Transporte auf Grund von Fahrwegüberlastung nicht oder nur verspätet stattfinden, oder es treten technische oder organisatorische Schwierigkeiten auf. Weiter kann eine mangelnde Verfügbarkeit von Transportfahrzeugen zu einem Abriss führen, aber auch falsche Ladungsträger, Lagerüberlastung, falsch kalkulierte Bearbeitungsvorgänge sowie Versorgungsengpässe durch Engpässe an Logistikflächen. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über verschiedene Verfahren der Planungsabsicherung in der Intralogistik.

Verfahren	Abbildungsgüte	Informations-Verdichtung	Transparenz	Aussagekraft
Analytische Verfahren	gering	gering	hoch	gering
OR	gering	hoch	gering	gering-mittelhoch
Simulation	hoch	gering	hoch	hoch

Tabelle 2.1: Verfahren der Absicherung in Bezug auf Belieferungsanalysen im Vergleich

2.5.1 Analytische Verfahren

Der Planungsqualität kann durch eine stetige Kontrolle erhöht werden [ROO09]. Diese Plausibilisierung der Eingangsdaten kann aus mehreren Stufen bestehen, angefangen bei einfachen Überprüfungen bei der Eingabe (nur positive Werte erlaubt) bis hin zur Überprüfung kompletter Logistikpläne (alle Ressourcen sind verknüpft). Diese Verfahren können mit überschaubarem Aufwand belastbar und transparent Ergebnisse erzeugen. Die Werkzeuge der Digitalen Fabrik sollen nach [ROO09] den Planer bereits während seiner Planungstätigkeit dahin gehend unterstützen, unplausible Planungsergebnisse zu erkennen bzw. zu vermeiden. Dazu gehören unter anderen fehlerhaften Relationen zwischen Planungsobjekten, falsche Arbeitsschrittfolgen, sowie fehlende oder unkorrekte Planungsparameter und somit invalider Prozesse [ROO09]. Darstellbar ist das im Planungssystem durch vordefinierte Bausteine und Eingabefelder mit Plausibilitätsprüfungen.

Nach [BRH06] reicht eine rein statische Untersuchung zur Absicherung der Planungsobjekte jedoch nicht mehr aus. Die Dynamik und Stochastik von Produktions- und Logistiksystemen kann Ausbringungsverluste verursachen, welche unter Verwendung statischer Abschätzungen nur sehr grob unter Anwendung von pauschalen Zuschlägen berücksichtigt werden. Somit beinhalten nach [FRI07] statische Abschätzungen in der Regel deutliche Unschärfen. Trotzdem können statische Auswertungen gute Näherungswerte errechnen.

2.5.2 Verfahren des Operations Research

„Operations Research (OR) bezeichnet einen Wissenszweig, der sich mit der Analyse von praxisnahen, komplexen Problemstellungen [...] zum Zweck der Vorbereitung von möglichst optimalen Entscheidungen durch die Anwendung mathematischer Methoden beschäftigt“ [DD05].

Anwendungsgebiet im Umfeld der Logistik ist bspw. die innerbetriebliche Routenoptimierung von Umfuhrzügen [DN09] sowie Fragestellungen mit geringer Detaillierung und geringer Untersuchungshäufigkeit [FRI07]. Gerade Warteschlangenmodelle stellen gegenüber statischen Verfahren eine verbesserte Analyseverfahren dar, jedoch kann die Abbildungsgüte von dynamischen Verfahren nicht erreicht werden [FRI07].

Die Grenzen werden bei den Methoden des OR erreicht, wenn stochastische Einflüsse ein relevanter Faktor sind. Diese können evtl. noch über Warteschlangenmodelle abgebildet werden. Für Untersuchungen in eng definierten Grenzen können OR-Verfahren mit

entsprechender Software belastbare Ergebnisse erzeugen. Die Abbildungsgüte liegt nach [FRI07] deutlich über statischen Abschätzungen. Weiter spricht [FRI07] von einer übereinstimmenden Ergebnisqualität von Warteschlangenmodellen und Simulationsmodellen, wenn die einschränkenden Voraussetzungen hinsichtlich der betrachteten Struktur erfüllt sind.

2.5.3 Dynamische Ausprägung des OR in der logistischen Planungsabsicherung

Dynamische Ansätze sind eine Ausprägung von OR-Verfahren, die auf Grund ihrer stochastischen Elemente als eigene Ausprägung behandelt werden.

Für die Untersuchung zeitdynamischer Sachverhalte hat sich die ereignisorientierte Simulation als Methodik in der Produktion und Logistik durchgesetzt [WEN02]. Unter Simulation wird allgemein die Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem System mit Hilfe eines experimentierfähigen Modells verstanden, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden [VDI08a]. Nach [ARN95] ist die Simulation kein exaktes mathematisches Verfahren, sondern eher ein experimentelles Vorgehen; sie kann mit Erfolg überall dort eingesetzt werden, wo exakte Verfahren zu aufwendig oder nicht möglich sind. Die verschiedenen Ansätze zur Klassifizierung der Simulation wurden von [BAC97] beschrieben, vgl. dazu Abbildung 2.15.

Im Gegensatz zu kontinuierlichen Simulatoren, die stetige Änderungen des Modellzustandes über die Zeit zulassen, ändern ereignisorientierte Materialflusssimulatoren ihren Zustand nur zu festen Zeiten, die durch ein Ereignis (Zustandsänderung) ausgelöst werden.

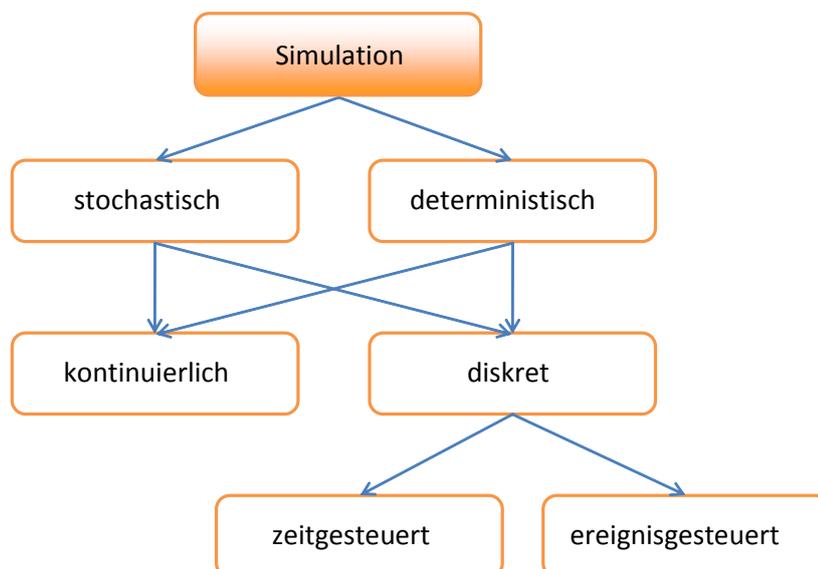


Abbildung 2.15: Ausprägungen der Simulation [BAC97]

Die Simulation ist kein Optimierungswerkzeug, die Optimierung wird durch die Definition unterschiedlicher Experimente herbeigeführt und deren Auswertung durch den Simulationsexperten. Die iterative Vorgehensweise besteht aus der Definition von Experimenten, Interpretation der Ergebnisse mit Rückschlüssen auf die Korrelation von Ein- und Ausgangsgrößen. Dank der guten Visualisierungsmöglichkeiten ist eine hohe Transparenz des Verfahrens gegeben.

Eine Simulation sollte nur durchgeführt werden, wenn ein vernünftiges Kosten-Nutzen-Verhältnis gewährleistet werden kann, die Komplexität der Fragestellung nicht mit analytischen oder OR-Modellen abbildbar ist.

Die Grenzen der Simulation sind eine beschränkte Aussagekraft durch mangelnde Berücksichtigung relevanter Rahmenbedingungen (falsche oder ungenaue Simulationsprämissen) aber auch eine zu hohe/niedrige Granularität, die sich negativ auf die Ergebnisqualität auswirken. Prinzipiell muss das Modell zur Problemstellung passen, nicht umgekehrt.

2.6 Diskret-ereignisorientierte Materialflusssimulation in der Logistik

Im Kontext der Digitalen Fabrik wurde bisher als Anwendung der Materialflusssimulation insbesondere der Bereich Produktion betrachtet. Hier existiert unter den OEMs bereits ein breites gemeinsames Verständnis. In der „Produktionssimulation“ steht das Werkstück selbst, d.h. die Karosse, im Mittelpunkt der Untersuchung, betrachtet wird der Karossenfluss durch die Produktion. Die einzelnen Ausprägungen der Logistiksimulation wurden in der VDA-Handlungsempfehlung 4810 standardisiert [VDA11]:

In der Logistik treffen vier unterschiedliche Betrachtungsdimensionen aufeinander: der Auftrag/die Information (Auftragsfluss), das Werkstück (Karossenfluss), die zu verbauenden Teile (Teilefluss, teilweise wird auch die Karosse als Teil betrachtet) und das Transportmittel (Verkehrsfluss). Daraus lassen sich folgende Ausprägungen der Simulation identifizieren, die im Umfeld der automobilen Logistik angewendet werden:

- Werkssimulation
- Belieferungssimulation
- Supply-Chain-Simulation
- Verkehrsflusssimulation

Abbildung 2.16 gibt einen Überblick über die in den einzelnen Ausprägungen der Logistiksimulationen betrachteten Simulationsumfänge.

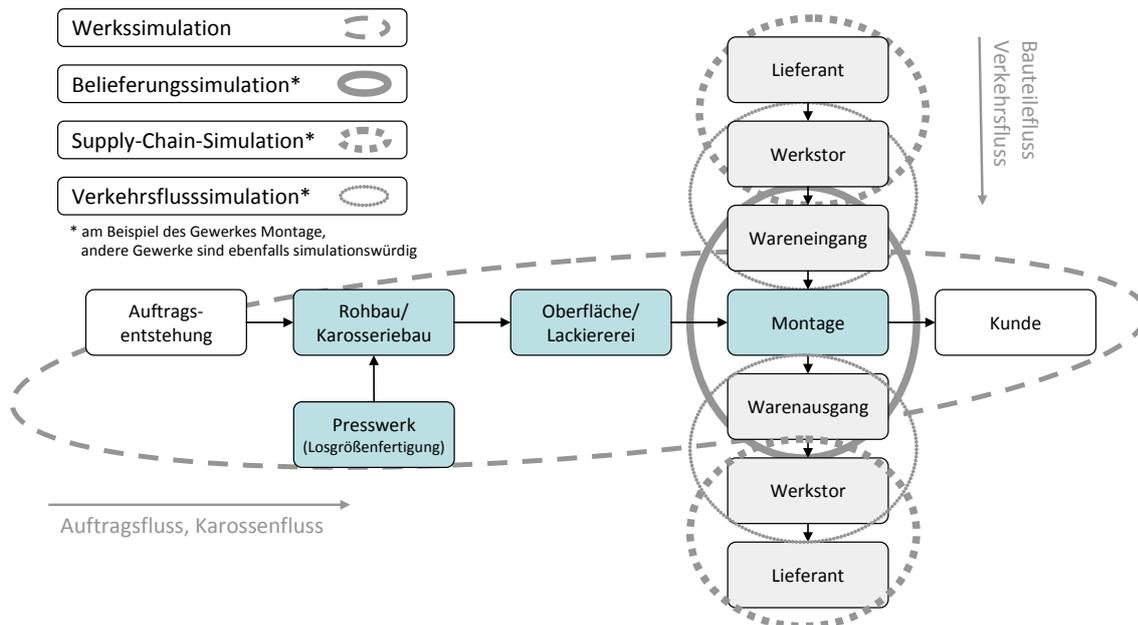


Abbildung 2.16: Ausprägungen der Logistiksimulationen [MS09]

Diese unterschiedlichen Ausprägungen der Logistiksimulation wurden im Rahmen VDA-Handlungsempfehlung bezüglich der folgenden Kriterien untersucht:

Systemgrenzen

Die Systemgrenzen definieren die Quelle und die Senke der BEs innerhalb des Modells. Je nach Fragestellung sind diese Grenzen enger oder weiter gefasst.

Gewerke

Festlegung, in welchem Gewerk die Simulation aufgebaut wird. Die Fragestellung der Untersuchung unterscheidet sich von Gewerk zu Gewerk.

Simulationszeitpunkt im Produktentstehungsprozess (PEP) /Lebenszyklus

Der Simulationszeitpunkt bezeichnet das Zeitfenster, in welchem die Simulation den größten Mehrwert bieten kann. Dazu gehören planungsbegleitende (vor SOP) und betriebsbegleitende (nach SOP) Simulationen, auch überschneidende Simulationen sind möglich.

Detaillierung

Unter der Detaillierung wird definiert, wie genau die (geplante) Realität abgebildet werden muss, um für die definierten Fragestellungen zu belastbaren Aussagen zu gelangen.

Wiederverwendung

Die Wiederverwendung gibt an, ob das gleiche Modell, ggf. neu parametrisiert, ggf. für weitere Fragestellungen, zu einem späteren Zeitpunkt im PEP wiederverwendet werden kann.

Umfang

Der Umfang beschreibt den Aufwand in Arbeitstagen, -wochen oder -monaten, die erforderlich sind, ein vollständiges Modell aufzubauen. Dazu gehören die Datenaufbereitung, die Modellierung und die Verifikation und Validierung des Modells. Dies setzt jedoch eine vollständige und plausibilisierte Datenbasis voraus, dieser Umfang wird nicht abgefragt.

Platz-/Längenorientierung

Die Platzorientierung zeigt an, dass für die Simulation sowie für die Simulationsergebnisse ein abstraktes Verhalten ausreichend ist, insbesondere ohne Berücksichtigung von geometrischen Details. Die Längenorientierung zeigt an, dass ein maßstabsgetreue Abbildung, bspw. mit unterschiedlichen FFZ-Längen oder mit einem Brems- und Anfahrverzögerung relevant für die Simulationsergebnisse sind.

2.6.1 Werkssimulation

Eine Werkssimulation ist die gewerkeübergreifende Simulation von starr verbundenen Förderanlagen. Starr bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Entkopplungspuffer zwischen den Gewerken mit einer endlichen Größe zur Verfügung stehen. Das Ziel der Werkssimulation ist die Abbildung der gewerkeübergreifenden Prozesskette, um gesamtheitliche wie auch detaillierte Fragestellungen bearbeiten zu können [BCW03]. Betrachtet werden zum einen der Produktfluss – der Weg der Karossen durch die Produktion. Zum anderen steht der Auftragsfluss (erweiterte Systemgrenzen in Vergleich zum Produktfluss, Quelle ist der Ort der Auftragsentstehung, Senke ist die Übergabe an den Kunden) der Weg des Kundenauftrages mit seiner Reihenfolgegüte im Fokus. Daraus lassen sich unter anderem folgende Fragestellungen ableiten [BCW03]:

- Bestimmung der Reihenfolgegüte
- Durchsatz, Durchlaufzeiten
- Auslastung
- Steuerung der Gewerke
- Dimensionierung der Entkopplungspuffer zwischen den Gewerken
- Absicherung von unterschiedlichen Arbeitszeitmodellen zwischen den Gewerken

In der Regel werden Werkssimulationen mit einem abstrakten Detaillierungsgrad modelliert und eingesetzt. Der Aufwand für die Datenbeschaffung, Modellierung, Validierung & Verifikation sowie für Experimente ist, verglichen mit den folgenden Simulationsausprägungen, hoch. Grob betrachtet sind die einzelnen Gewerke als Black-Boxen dargestellt, was als Abbildungstiefe für die gesamtheitlichen Fragestellungen in der Regel ausreicht [BCW03]. Für gewerkespezifische Fragestellungen können die einzelnen Black-Boxen weiter detailliert werden. Alternativ besteht auch die Möglichkeit der Modellkopplung über branchenübergreifende Standards wie die High-Level-Architecture [SSH03], [INS00]. Wichtig ist hier allerdings die Beherrschbarkeit der Detaillierung [WAC03]. Werkssimulationen werden über den gesamten Produktentstehungsprozess eingesetzt, meist wird das Modell über den Lebenszyklus auf dem

aktuellen Stand gehalten. Aber auch bei relativ kleinen Projekten, beispielsweise einem geplanten Umbau eines Sortierpuffers, werden Werkssimulationen eingesetzt, um geplante Investitionen im Bezug auf ihre Wirtschaftlichkeit wie auf ihre Integration in das vorhandene Netzwerk abzusichern. Dies spiegelt sich auch in einer hohen Wiederverwendung der einzelnen Modelle wider. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die Dimensionen der Werkssimulation.

BETRACHTUNG	Auftrags- und Karossenfluss
SYSTEMGRENZEN	Auftrag – Kunde
GEWERK	gewerkübergreifend (Presswerk, Rohbau, Lack, Montage)
ZEITPUNKT IM PEP	kontinuierlich / PEP-unabhängig
DETAILLIERUNG	planungsbegleitend: abstrakt (Schichtmodelle, Puffer) betriebsbegleitend: detailliert (Leitstand)
WIEDERVERWENDUNG	sehr hoch (im Vergleich mit den anderen Logistiks simulationsausprägungen)
ERSTELLUNGS-AUFWAND	Aufwand i.d.R. zwischen einer Woche und einem Monat pro Werkssimulation
ORIENTIERUNG	platzorientiert

Tabelle 2.2: Werkssimulation im Detail

2.6.2 Belieferungssimulation

Nach dem Verständnis der VDA-Arbeitsgruppe „Ablaufsimulation“ [MS09], [VDA11] untersucht die Belieferungssimulation das Zusammenspiel der unterschiedlichen Belieferungsprozesse mit den Einsatzfaktoren in Abhängigkeit der anderen Gewerke. Die Belieferungssimulation legt ihren Fokus auf den Teilefluss. Das Simulationsmodell basiert auf dem Layout der Produktionshalle. Ziel ist es, die zu verbauenden Teile unter den logistischen Vorgaben ausreichend am Bereitstellort vorzuhalten, und dies mittels der Simulation dynamisch abzusichern. Daraus lassen sich folgende Untersuchungen identifizieren [MS09]:

- Betrachtung unterschiedlicher Versorgungsvarianten
- Versorgungssicherheit (Anzahl Abrisse) in Abhängigkeit vom Teilebestand am Bereitstellort
- Abrufintervalle und Wiederbeschaffungszeiten
- Bestimmung der Einsatzfaktoren bspw. Anzahl und Auslastung von Staplern
- Glättung von Bedarfsspitzen
- Strategiebetrachtung (z.B. Teilebedarfssteuerung über Kanbankarten/Knopfabruf)
- Szenarienbetrachtung (z.B. staplerfreie Versorgung)

Die Systemgrenzen sind in der Regel der Wareneingang (Quelle) und der BO (Senke), für die komplette Abbildung inklusive der Entsorgungsprozesse sind die Systemgrenzen der Wareneingang und der Warenausgang. Belieferungssimulationen werden in allen Gewerken mit Logistikversorgung eingesetzt. Insbesondere das Presswerk, der Rohbau (Karosseriebau) und die Montage haben durch einen entsprechenden Teileumfang eine hohe Simulationswürdigkeit. Um belastbare Ergebnisse von Belieferungssimulationen zu erhalten, ist eine hohe Detaillierung notwendig. Dies bedeutet unter anderem, dass die einzelnen Routenzüge und Stapler mit dem zugehörigen Schichtmodell parametrisiert werden, im Idealfall sogar mit MTM-Werten (Methods-Time Measurement) für die einzelnen Handlungsschritte. Im Produktentstehungsprozess werden Belieferungssimulationen hauptsächlich in der späteren Planungsphase eingesetzt, wenn der Reifegrad der Belieferungsprozesse einen entsprechenden Stand erreicht hat. Aber auch betriebsbegleitend werden Belieferungssimulationen eingesetzt, unter anderem für Szenarien, weitere Baureihen auf einem Band zu fertigen. Durch die hohe Detaillierung und die spezifische Fragestellung ist in der Regel eine Wiederverwendung der Simulation bisher nur mit großem Aufwand realisierbar, in der Praxis werden diese Modelle daher in der Regel nur selten nochmals eingesetzt. Daraus lässt sich ableiten, dass „bereits kleine Änderungen des Anwendungsfalles [...] einen erheblichen Aufwand zur Anpassung des bestehenden Simulationsmodells bedeuten können“ [FRI09].

BETRACHTUNG	Teilefluss
SYSTEMGRENZEN	Wareneingang – Bereitstellort (Vollgut) Bereitstellort – Warenausgang (Leergut) Wareneingang – Warenausgang (Voll- und Leergut)
GEWERK	Presswerk / Rohbau / Montage
ZEITPUNKT IM PEP	planungsbegleitende und betriebsbegleitende Simulation
DETAILLIERUNG	Layout: maßstabsgetreu Ressourcen: reale Zeitwerte (MTM) Prozesse: vollständiges Mengengerüst, Logiken Dynamische Größen: Schichtmodelle, Verfügbarkeiten
WIEDERVERWENDUNG	sehr gering (im Vergleich mit den anderen Logistiksimulationsausprägungen)
ERSTELLUNGS-AUFWAND	i.d.R. > 1 Monat
ORIENTIERUNG	längenorientiert

Tabelle 2.3: Belieferungssimulation im Detail

Den größten Anteil der Eingangsdaten haben die parametrisierten Transportketten. Belieferungssimulationen in der Montage haben oft mehr als 1.000 verschiedene Bauteile und

damit mindestens so viele Transportketten. Eine Transportkette für sich ist erfassbar, die Komplexität entsteht durch die hohe Anzahl und die Interaktion untereinander. Daher sind die Eingangsdaten der Belieferungssimulation ein ideales Untersuchungsobjekt. Die Visualisierung von intralogistischen Prozessen dient zudem als Kommunikationsplattform für alle Beteiligten und verbessert dadurch auch die Akzeptanz der Simulation. Die Aufbau wird als hierarchisches Animationskonzept [DS94] dargestellt: im Hintergrund steht das Hallenlayout, in den darüber liegenden Ebenen werden neben dem Wegenetz, die Fahrzeuge und die Logistikstationen aufgebaut, darauf folgt die Ebene mit den Ladungsträgern. Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über die Dimensionen einer Belieferungssimulation.

Simulationswürdigkeit der Belieferungssimulation

Angesichts der Bedeutung der Logistik für den unternehmerischen Erfolg und den daraus resultierenden notwendigen Investitionenvolumina sind die Planungsergebnisse unbedingt abzusichern. Durch die Beschaffenheit von Belieferungssimulationen mit ihren umfangreichen Interpedenzen zwischen den einzelnen Ereignissen ist eine zeitdynamische Absicherung notwendig. Eine statistische Absicherung mit Methoden des Operations Research oder analytische Absicherung ist nicht in der Lage, die Logistikplanung umfassend zu bewerten. Durch die Komprimierung der Eingangsdaten können die zeitdynamischen Zusammenhänge nicht betrachtet bzw. nicht die gesamtheitliche Datengrundlage bewertet werden. Aus diesen Gründen ist die Absicherung der Logistikplanung nicht nur simulationswürdig, sondern die einzige Methode, eine unkomprimierte gesamtheitliche Absicherung durchzuführen.

2.6.3 Verkehrsflusssimulation

Die Simulation des Verkehrsflusses stellt eine wichtige, wenn auch überschaubare, Abbildung der Realität dar. Im Zentrum der Betrachtung stehen hier Untersuchungen zum innerbetrieblichen Werksverkehr. Ziel ist die optimale Austaktung und Aussagen zu der Verkehrswegebelaugung, beispielsweise das Verkehrsaufkommen bei der LKW-Anlieferung am Wareneingang. Daraus lassen sich Fragestellungen aus folgenden Themenfeldern ableiten:

- Aussagen zur internen Verkehrsbelastung
- Notwendige Anzahl von Abladestellen
- Anzahl der Parkplätze mit deren Auslastung und Vergabeschlüsseln
- Auslastung an den Werkstoren und an den Wareneingängen bzw. -ausgängen.

Die Systemgrenzen sind hier das Werkstor, ggf. die Parkflächen davor und der Wareneingang. Auf der anderen Seite ist es der Warenausgang und wieder das Werkstor. Die Detaillierung variiert je nach Aufgabenstellung, der Aufwand ist im Vergleich zu den anderen Logistiksimulationen allerdings relativ gering. Im Produktentstehungsprozess werden Verkehrsflusssimulationen in der Planung und in der Serie eingesetzt. Durch eine entsprechende Parametrisierung können auch Hüllkurvenuntersuchungen (Dreidimensionale Schlepplkurven) mit ausgewertet werden. Die Wiederverwendung dieser Modelle ist auf Grund der punktuellen Fragestellung recht gering, einzelne Module wie das Layout können jedoch auch von anderen

Modellen verwendet werden. Tabelle 2.4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Dimensionen der Verkehrsflusssimulation.

BETRACHTUNG	Transportmittel
SYSTEMGRENZEN	Werkstor - Wareneingang; Warenausgang – Werkstor; Transporte innerhalb der Werksgrenzen
GEWERK	gewerkunabhängig, engpassorientiert
ZEITPUNKT IM PEP	planungsbegleitende und betriebsbegleitende Simulation
DETAILLIERUNG	Fahrzeuge, Fahrwege; maßstabsgetreu
WIEDERVERWENDUNG	i.d.R. sehr gering, abhängig von der Fragestellung
ERSTELLUNGSAUFWAND	i.d.R. > 1 Woche
ORIENTIERUNG	längenorientiert

Tabelle 2.4: Verkehrsflusssimulation im Detail

2.6.4 Supply-Chain-Simulation

Die Supply-Chain-Simulation bildet auf Grundlage des Supply-Chain-Managements [BAU08] die Lieferkette von den Lieferanten bis zum Werkstor ab, weiter wird sowohl der Weg des fertigen Produktes zum Kunden oder der Rückweg des Leergutes zum Lieferanten betrachtet. Auch die Lieferkette zwischen den unterschiedlichen Werken innerhalb eines OEMs wird mit Supply-Chain-Simulationen untersucht, beispielsweise wenn der Antriebsstrang räumlich getrennt gefertigt und über das öffentliche Verkehrsnetz zur Montage geliefert wird. Ziel ist die organisatorische wie ökonomische Optimierung der Supply-Chain bei gleichzeitiger Sicherstellung der Versorgung. Hier lassen sich Untersuchungen aus folgenden Themenfeldern ableiten:

- Liefertreue, insbesondere im Rahmen einer weltweiten Zuliefererindustrie
- Prozessoptimierung
- Wirtschaftliche Standortauswahl

Die Systemgrenzen der Supply-Chain-Simulationen sind der externe oder interne Lieferant (1-tier), sowie das Werkstor. Auch mehrstufige (Lieferantenketten) Supply-Chain-Simulationen sind möglich. Auf der anderen Seite sind die Systemgrenzen vom Werkstor bis zum externen oder internen Kunden bzw. die Leergutrückführung zum Lieferanten definiert. Das Modell ist in der Regel wenig detailliert, im Vordergrund stehen Aussagen zu Liefertreue und über die Prozessoptimierung. Das Zusammenspiel der unterschiedlichen Gewerke innerhalb eines OEMs wird in dieser Art der Simulation nicht betrachtet, diese Fragestellungen werden in Werkssimulationen abgebildet. Supply-Chain-Simulationen werden im kompletten Produktentstehungsprozess wie auch über den Lifecycle eingesetzt, um die Belieferung

abzusichern. Die niedrige Wiederverwendungsrate der Simulationsmodelle resultiert aus einem in der Regel wenig reproduzierbaren Szenario und langfristig abgeschlossenen Prozessen und Lieferverträgen. Der Erstellungsaufwand ist je nach Projekt unterschiedlich, es reicht von wenigen Personenwochen bis hin zu mehreren Personenmonaten. Tabelle 2.5 gibt einen Überblick über die verschiedenen Dimensionen der Supply-Chain-Simulation.

BETRACHTUNG	Auftragsfluss; Produktfluss; Teilefluss
SYSTEMGRENZEN	Lieferant - Werkstor; Werkstor - Lieferant; Transporte innerhalb von Verbundswerken
GEWERK	gewerkeunabhängig
ZEITPUNKT IM PEP	PEP-unabhängig
DETAILLIERUNG	Abstrakt: Entfernungen von zwei Orten werden über gerade Kanten abgebildet. Durchschnittsgeschwindigkeit und pauschale Handlingszeiten
WIEDERVERWENDUNG	i.d.R. gering (für einzelne Fragestellungen)
ERSTELLUNGS-AUFWAND	i.d.R. bis zu einem Monat
ORIENTIERUNG	platzorientiert

Tabelle 2.5: Supply-Chain-Simulation im Detail

2.6.5 Ergebnis der Untersuchung: VDA Handlungsempfehlung 4810

Die oben beschriebenen Ausprägungen der Logistiksimulation wurden in der VDA Handlungsempfehlung 4810 [VDA11] vom März 2011 auf Grundlage dieser Arbeit standardisiert. Identifiziert und beschrieben wurden vier Ausprägungen der Simulation, die im Bereich der Logistik zur Anwendung kommen. In den unterschiedlichen Dimensionen konnte festgestellt werden, wie differenziert die einzelnen Simulationen zu betrachten sind und wie sich diese von den anderen abgrenzen.

Ziele dieser Standardisierung waren:

- einheitliche Definition der verwendeten Begriffe
- Reduktion von Planungs- und Produktionskosten
- Reduktion von Mehrfachentwicklungen (OEM-übergreifend)
- Reduktion von unternehmensspezifischen Anpassungen
- einheitliches Anforderungsmanagement gegenüber Softwareherstellern und Dienstleistern
- Unternehmensübergreifendes Verständnis für Dienstleister
- Unternehmensübergreifendes Verständnis für Forschungsvorhaben

Diese Handlungsempfehlung wird bei den beteiligten Unternehmen eingesetzt und ermöglicht somit eine einheitliche Beschreibung der eingesetzten Ausprägungen der Logistiksimulation.

2.6.6 Auswahl der Belieferungssimulation

Ziel der Arbeit ist es, den Simulationsexperten maschinell zu unterstützen und ihn von aufwändigen Modellierungs- und Paramentrierungsprozessen zu entlasten. Aus diesem Grund wird exemplarisch die Belieferungssimulation ausgewählt. Bei der Belieferungssimulation ist sowohl der Erstellungsaufwand als auch der Detaillierungsgrad aufwändiger bzw. höher als in den anderen Ausprägungen der Logistiksimulationen, da hier die Anzahl an zu versorgenden Teilen einen signifikanten Teil der Komplexität ausmachen (vgl. Abbildung 2.17).

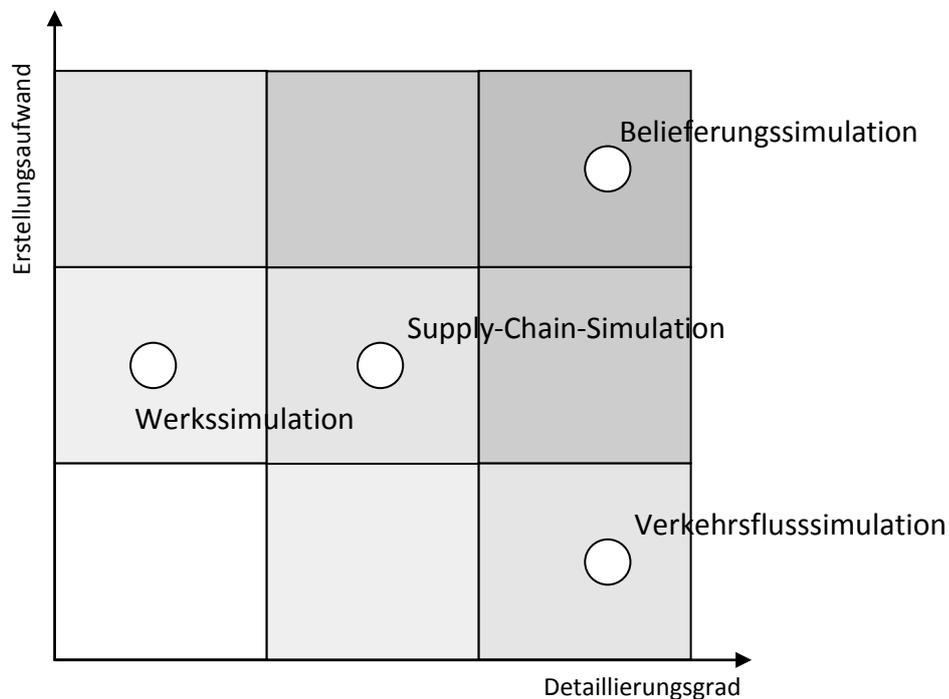


Abbildung 2.17: Ausprägungen der Logistiksimulationen, Portfolioanalyse nach McKinsey

2.6.7 Phasen einer Belieferungssimulation

Ein Simulationsprojekt gliedert sich in unterschiedliche Phasen. In der Literatur ist dies beispielsweise durch [VDI08a], [WWC08] und [RSW08] beschrieben. Nach dem erweiterten Vorgehensmodell von [WWC08] besteht ein Simulationsprojekt aus folgenden Phasen: Aufgabendefinition, Systemanalyse, Datenbeschaffung, Modellformalisierung, Datenaufbereitung, Implementierung und Experimentphase, vgl. Abbildung 2.18.

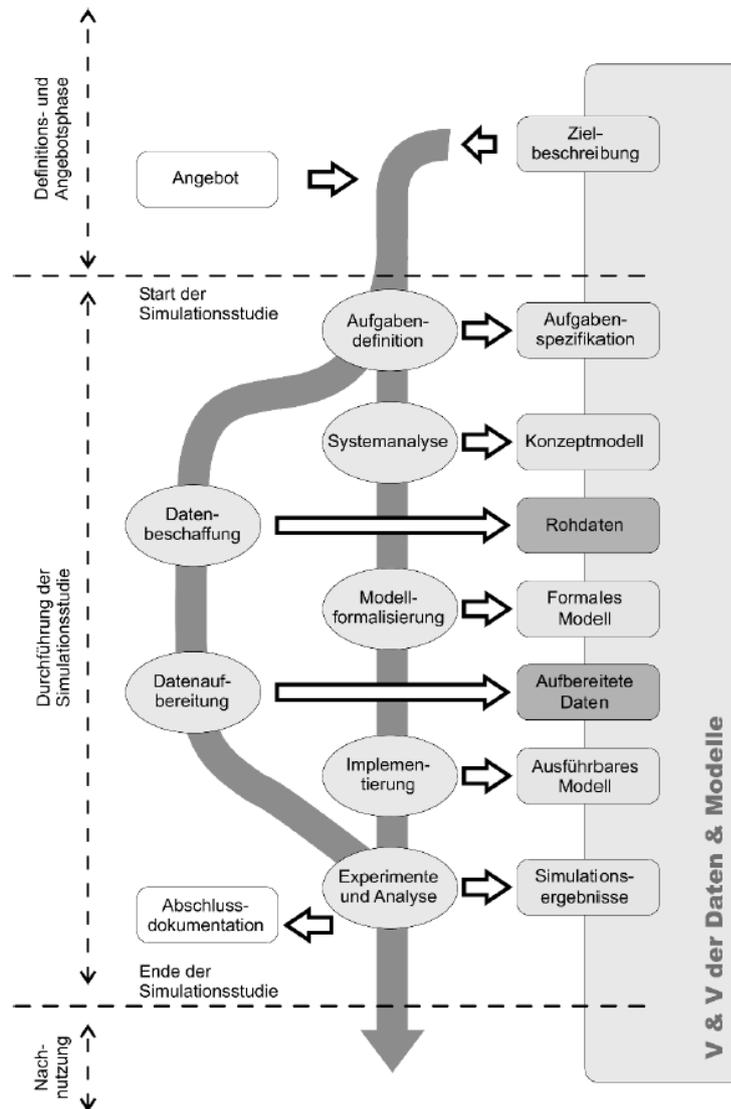


Abbildung 2.18: Erweitertes Vorgehensmodell zur Simulationserstellung [WWC08]

[RSW08] gruppiert diese Phasen in Definitions- und Angebotsphase, Modellbildungsphase, Datenbeschaffungs- und Aufbereitungsphase sowie letztlich die Experiment- und Analysephase. Für die vorliegende Arbeit wird die Handlungsempfehlung Logistiksimulation nach [VDA11] verwendet, die ein Simulationsprojekt in die Phasen Zieldefinition, Datenbeschaffung, Datenplausibilisierung, Modellierung, Validierung & Verifikation sowie abschließend die Experimente unterteilt.

Hervorzugehen ist hierbei die Trennung zwischen Datenbeschaffung und Datenplausibilisierung, da jeder dieser Phasen ein eigenständiges Vorgehen voraussetzt. Die Zusammenfassung der unterschiedlichen Phasen wird in Tabelle 2.6 zusammengefasst. Das Lösungskonzept in Kapitel 4 beschäftigt sich mit der qualitativen Bewertung der Eingangsdaten, was sich vollständig in die Datenplausibilisierungsphase eingliedern lässt.

	[VDI08a]	[BaiRH06]	[RabSW08] [WenWC08]	[VDA11]
Beginn einer Simulationsstudie  Abschluss einer Simulationsstudie	Aufgabenanalyse	Problemformulierung / Ziel	Zielbeschreibung	Zieldefinition
			Aufgabendefinition	
		Strukturanalyse	Systemanalyse	
		Datenerhebung / -aufbereitung	Datenbeschaffung	Datenbeschaffung
				Datenplausibilisierung
			Modellformalisierung	
	Modellformulierung	Modellierung	Datenaufbereitung	Modellierung
	Modellimplementierung		Implementierung	
	Modellüberprüfung	Modellüberprüfung / Validation		Validierung und Verifikation
	Modellanwendung	Simulationsläufe, Analyse	Experiment und Analyse	Experimente
		Bewertung, Ergebnispräsentation		

Tabelle 2.6: Phasen der Simulationsmodellerstellung im Vergleich

Übertragen für die Belieferungssimulation bedeutet dies, dass die Phasen vor der Modellerstellung weiter unterteilt werden in die Datenbeschaffungsphase und die Phase der Plausibilisierung der Eingangsdaten. Die zusätzliche Phase zeigt in einer Umfrage im VDA-Arbeitskreis Ablaufsimulation (vgl. Abbildung 1.3), dass der Aufwand der Datenplausibilisierung einen signifikanten Teil des Gesamtaufwandes einer Belieferungssimulation ausmacht.

2.7 Informationsqualität

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der für eine Belieferungssimulation notwendigen Informationsqualität. Ein belastbares Simulationsergebnis ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Dazu gehören vorrangig die Informationsqualität der Eingangsdaten, weiter aber auch die Zuverlässigkeit der Schnittstellen sowie insbesondere die praktische Erfahrung aller Beteiligten, sowohl auf der Planungs- wie auch auf der Simulationsseite. Es lassen sich aus unvollständigen und inkorrekten Eingangsdaten keine hochwertigen Simulationsergebnisse produzieren.

2.7.1 Begriffsdefinitionen im Umfeld der Informationsqualität

Bevor die Datenqualität bestimmt werden kann, sind die Begriffe Verifikation, Validierung und Plausibilisierung in diesem Zusammenhang zu definieren. In diesem Zusammenhang werden Simulationsmodelle validiert und verifiziert, Eingangsdaten werden auf ihre Plausibilität geprüft.

2.7.1.1 Definition der Validierung und Verifikation von Simulationsmodellen

Nach [SAR09] ist die Verifikation auf das Simulationsmodell gerichtet und wird definiert als „ensuring that the computer program of the computerized model and its implementation are correct“. Die Verifikation beschreibt nach [RSW08], ob das Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart formal korrekt transformiert wurde. Nach [SCG79] ist die Verifikation definiert als Glaubhaftmachung, dass ein digitales Modell in seinem Umfeld eine zufriedenstellende Bandbreite an Genauigkeit bereitstellen wie das Vorbild des Modells kann.

Für [VDI08a] ist Validierung eine „Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und Originalsystem“. Die Validierung beschreibt nach [RSW08] den Vergleich mit der Wirklichkeit. Hier wird das Modell überprüft, ob das für die Zielerreichung spezifische Verhalten dem der Realität entspricht. Weiter ist nach [SCH87] eine Validierung von Eingangsdaten notwendig, um ein valides Modell zu bekommen. Somit gehören auch die validen Eingangsdaten zur Modellvalidierung [RSW08].

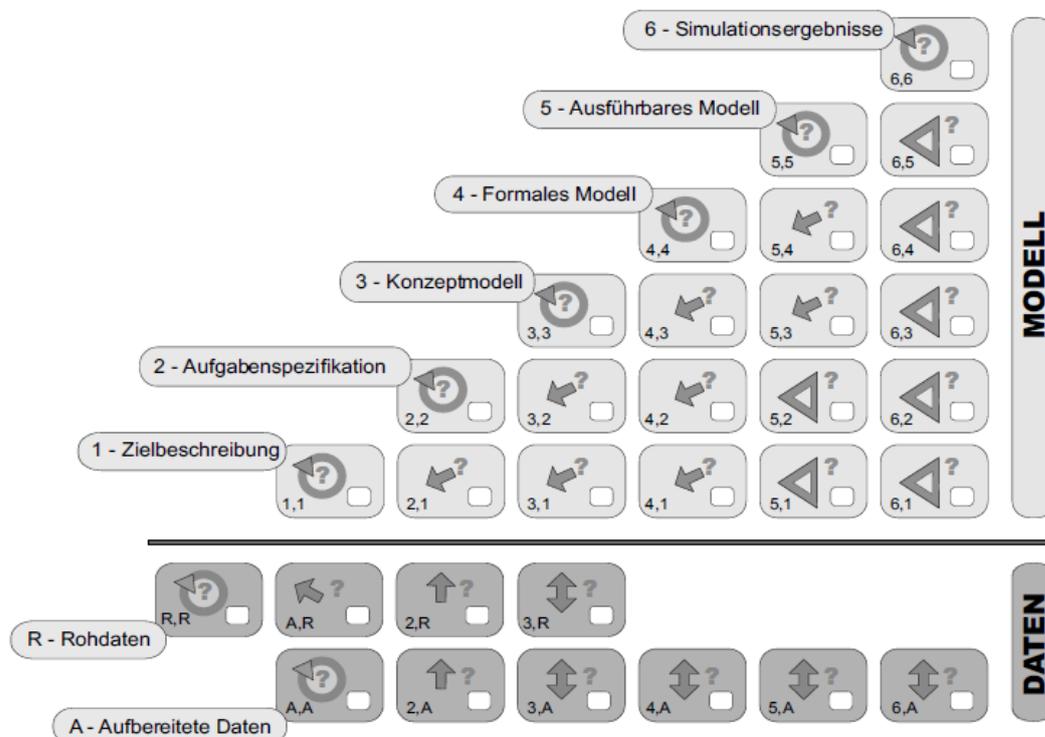


Abbildung 2.19: Vorgehensmodell Validierung und Verifikation [RSW08]

Die Validierung und Verifikation des Modells ist simulationsbegleitend durchzuführen: „Wenn ein sinnvoller, abgeschlossener Zwischenstand erreicht ist, ist dieser sofort zu validieren, um Fehler [...] und deren Auswirkungen begrenzen zu können“ [RSW08], Seite 122. Dies gilt bereits bei der Entstehung der Eingangsparameter, deren Weg durch die unterschiedlichen vorgelagerten Planungssysteme transparent gestaltet sein muss, vgl. Abbildung 2.24. Die simulationsbegleitende Modellvalidierung und -verifizierung ist somit fest im Lösungskonzept in den Schritten Datenbeschaffung und -Aufbereitung sowie bei der Implementierung verankert. Hier wird auf das Referenzmodell zur Simulation in Produktion und Logistik von [RSW08], Seite 119, (vgl. Abbildung 2.19) verwiesen.

Nachfolgend wird die Definition Validierung und Verifikation von [VDI08a] und [RSW08] verwendet.

2.7.1.2 Definition der Plausibilisierung von Eingangsdaten

Plausibilitätstests sind bereits aus klassischen Vorgehensmodellen als Bestandteil der Verifikation und Validierung bekannt [SAR09]. Unter Plausibilisierung wird die Annehmbarkeit und Nachvollziehbarkeit von Plandaten verstanden. Mit der Methode der Plausibilisierung wird geprüft, ob sich ein Wert innerhalb bestimmter Systemgrenzen befindet, also plausibel erscheint. In der hier diskutierten Vorgehensweise soll die Plausibilisierung jedoch als übergeordneter Begriff für die Bewertung von Eingangsdaten gelten. Somit gehören die Validierung und die Verifikation ebenfalls zur Plausibilisierung von Eingangsdaten (vgl. Abb. 2.20).

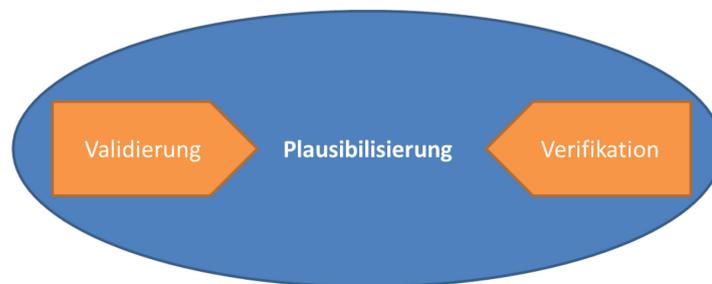


Abbildung 2.20: Zusammenhang der Plausibilisierung, Validierung und Verifikation

Allerdings können verifizierte und validierte Eingangsdaten trotzdem unplausibel sein. Daher wird nachfolgend der Begriff der Plausibilisierung für die Bewertung von Eingangsdaten verwendet, die Begriffe Validierung und Verifikation werden für Simulationsmodelle verwendet.

2.7.1.3 Definition der Qualität

Im nächsten Schritt wird der Begriff Qualität definiert. Eine der gängigsten Beschreibung ist die EN ISO 9000:2008 Norm, die Qualität als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“ [INT08] definiert.

Eine hinreichende Qualität und damit vollständig plausibilisierte Daten sind die Grundvoraussetzung für eine statische oder dynamische Planungsabsicherung. Fehler müssen im Planungsprozess möglichst frühzeitig gefunden werden, damit diese nicht in die Simulation und damit eventuell auch in die Produktion durchschlagen oder eine Überarbeitung der Planungsschritte notwendig machen [KUD00]. Noch besser ist allerdings die Vermeidung dieser Fehler. Zielführend für die Qualität in Planungssystemen ist der Ansatz von [WW96], welcher das Planungssystem mit der realen Welt vergleicht. Differenzen zwischen der (*in der Produktionsplanung*: geplanten) realen Welt und dem Planungssystem führen zu einem Qualitätsmangel.

Das Mengengerüst wird im Produktentstehungsprozess anhand definierter Meilensteine sukzessiv aufgebaut. Viele der Eingangsgrößen werden aus vorgelagerten Systemen übernommen (vgl. Abbildung 2.24). Diese vorgelagerten Systeme haben für sich jedoch eigene Zielstellungen. Heterogenitäten zwischen Datenmodellen lassen sich meist mit Hilfe einer aufwendigen, als Datenbereinigung bezeichneten Transformationslogik ausgleichen [HEL02]. Andere, für die Belieferungssimulation relevante Eingangsdaten sind in der frühen Phase (strategische Planung) nicht vorhanden, hierfür müssen für Simulationsbedarfe entsprechende Methoden entwickelt werden, um eine aussagekräftige Informationsqualität zu erreichen.

2.7.2 Qualitätsmerkmale für Belieferungssimulationen

Die Bewertung von Informationsqualität muss über Statistiken zur Vollständigkeit und Fehlerfreiheit der Objekte in Planungssystemen hinausgehen, Eigenschaften wie Übersichtlichkeit und Relevanz beschreiben weitere wichtige Merkmale, die die Qualität von Informationen bestimmen [HGH08]. Die Informationsqualität wird anhand von 15 Merkmalen, zusammengefasst in vier Kategorien, definiert [HGH08]:

- Zweckabhängigkeit (Aktualität, Wertschöpfung, Vollständigkeit, Umfang, Relevanz)
- Systemunterstützung (Zugänglichkeit, Bearbeitbarkeit)
- Inhärenz (Ansehen, Fehlerfreiheit [Korrektheit], Objektivität, Glaubwürdigkeit)
- Darstellungsbezug (Verständlichkeit, Übersichtlichkeit, einheitliche Darstellbarkeit, eindeutige Auslegbarkeit)

Datenqualitätsmerkmale lassen sich in die Design- und Ausführungsqualität unterteilen, wodurch sich insbesondere die Trennung von Datenschema und den Datenwerten auf Instanzebene ergibt [HEL02]. Die für die Plausibilisierung von Transportketten notwendigen Datenwerte lassen sich ebenfalls wie in Tabelle 2.7 abgebildet in vier Kategorien mit 15 Merkmalen zusammenfassen [WW96], [HEL02]:

Kategorie	Merkmal	Beschreibung
Glaubwürdigkeit	Korrektheit	Die Daten stimmen inhaltlich mit der Datendefinition überein und sind empirisch korrekt.
	Datenherkunft	Die Datenherkunft und die vorgenommenen Datentransformationen sind bekannt.
	Vollständigkeit	Alle Daten sind gemäss Datenmodell erfasst.
	Widerspruchsfreiheit	Die Daten weisen keine Widersprüche zu Integritätsbedingungen (Geschäftsregeln, Erfahrungswerte) und Wertebereichsdefinitionen auf (innerhalb des Datenbestands, zu anderen Datenbeständen, im Zeitverlauf)
	Syntaktische Korrektheit	Die Daten stimmen mit der spezifizierten Syntax (Format) überein.
	Zuverlässigkeit	Die Glaubwürdigkeit der Daten ist konstant.
Zeitlicher Bezug	Aktualität	Datenwerte bezogen auf den gegenwärtigen Zeitpunkt sind erfasst.
	Zeitliche Konsistenz	Alle Datenwerte bzgl. eines Zeitpunktes sind gleichermassen aktuell.
	Nicht-Volatilität	Die Datenwerte sind permanent und können zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgerufen werden.
Nützlichkeit	Relevanz	Die Datenwerte können auf einen relevanten Datenausschnitt beschränkt werden.
	Zeitlicher Bezug	Die Datenwerte beziehen sich auf den benötigten Zeitraum.
Verfügbarkeit	Zeitliche Verfügbarkeit	Die Daten stehen rechtzeitig zur Verfügung.
	Systemverfügbarkeit	Das Gesamtsystem ist verfügbar.
	Transaktionsverfügbarkeit	Einzelne benötigte Transaktionen sind ausführbar, die Zugriffszeit ist akzeptabel und gleichbleibend.
	Zugriffsrechte	Die benötigten Zugriffsrechte sind ausreichend.

Tabelle 2.7: Qualitätsmerkmale bezogen auf Datenwerte nach [HEL02]

Alle diese Kategorien und Merkmale sind in der Digitalen Fabrik von Bedeutung und haben bereits in der Konzeptphase eine große Relevanz. Bezogen auf die Eingangsdaten einer Belieferungssimulation sind hier zwei Merkmale besonders hervorzuheben: Vollständigkeit und Korrektheit. Die mangelnde Vollständigkeit einer Transportkette verhindert entweder den kompletten Modellaufbau, sie wird unvollständig oder gar nicht übernommen. Wenn dies bemerkt wird, entsteht ein Mehraufwand im Simulationsmodell und im Mengengerüst. Sollte diese Inkonsistenz nicht bemerkt werden, so wirkt sich dies direkt auf die Modellvalidierung und –verifikation sowie auf die Simulationsergebnisse aus. Eine mangelnde Korrektheit führt zwar zu einem Modellaufbau, die Inkonsistenzen wirken jedoch ebenfalls direkt auf die Modellvalidierung und –verifikation sowie auf die Simulationsergebnisse aus. Die Vollständigkeit im Mengengerüst spielt ebenfalls eine tragende Rolle, durch Füllstandsauswertungen (vgl. Abbildung 5.15) als Entscheidungsunterstützung kann bewertet werden, wie signifikant die Aussagekraft der Simulationsstudie ist.

Die Übertragbarkeit auf die Praxis von Simulationsergebnisse ist nur bei vollständigen und korrekten Eingangsdaten gegeben. Exemplarisch werden aus der Datenstruktur einer Transportkette Attribute ausgewählt, die mit den unterschiedlichen Filterklassen untersucht werden können, unterteilt in drei Sichten: Produkt-, Prozess- (Station, Transport) und

Ressourceninformationen (Flurförderzeug, Kapazität des Flurförderzeug, Ladungsträger, Ladungsträgerinhalt), vgl. Abbildung 2.21.

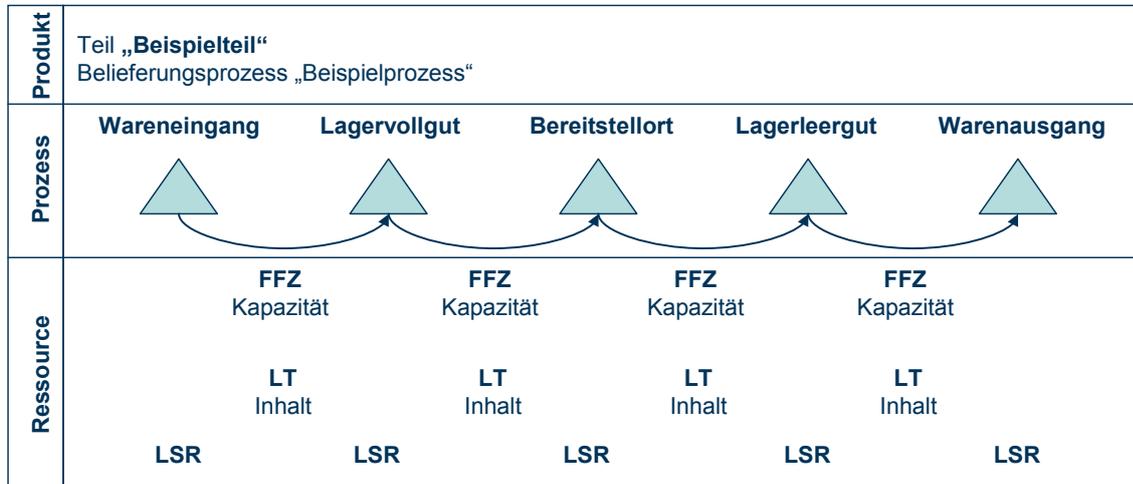


Abbildung 2.21: Mögliche Plausibilisierungsobjekte einer Logistikkette

2.8 Simulationsrelevante Eingangsdaten

Die Kenntnis über die Eingangsdaten ist von zentraler Bedeutung [ROO09]. Mit einer Aufstellung aller benötigten Daten kann dem Auftraggeber der Simulationsstudie die Anforderungen der Granularität, der benötigten Eingangsdaten und der Sensibilisierung der Informationsqualität seitens der Simulation übergeben werden. Darüber hinaus ist für die folgenden Methoden eine vollständige Kenntnis des Informationsbedarfs erforderlich. [ROO09] fordert in seinem erweiterten Vorgehensmodell eine Checkliste für die Datenbeschaffung, welche von den Beteiligten abgearbeitet wird. Durch die Unterstützung des Simulationsgerüsts und einer transparenten Rollenverteilung zwischen Logistikplaner und Simulationsexperten wird diese Forderung erfüllt.

2.8.1 Planungssysteme der Digitalen Fabrik als Datenquelle

Der Informationsbedarf einer Belieferungssimulation ist beträchtlich. Hier kann das vorgestellte Konzept der Digitalen Fabrik (vgl. Kapitel 2.3) einen wertvollen Beitrag leisten, diesen alphanummerischen Informationsbedarf zu strukturieren. Die Digitale Fabrik ist der zentrale Informationsspeicher aller Planungsdaten. [FRI07] unterteilt in seiner Arbeit die Digitale Fabrik in drei Datenklassen: simulationsirrelevante Daten, simulationsrelevante Daten sowie einsetzbare Daten. Da die gespeicherten Informationen der Digitalen Fabrik zentral vorgehalten werden, wird die Klasseneinteilung von [FRI07] an die für Belieferungssimulationen spezifischen Eigenschaften angepasst (vgl. Abbildung 2.22) und erläutert.

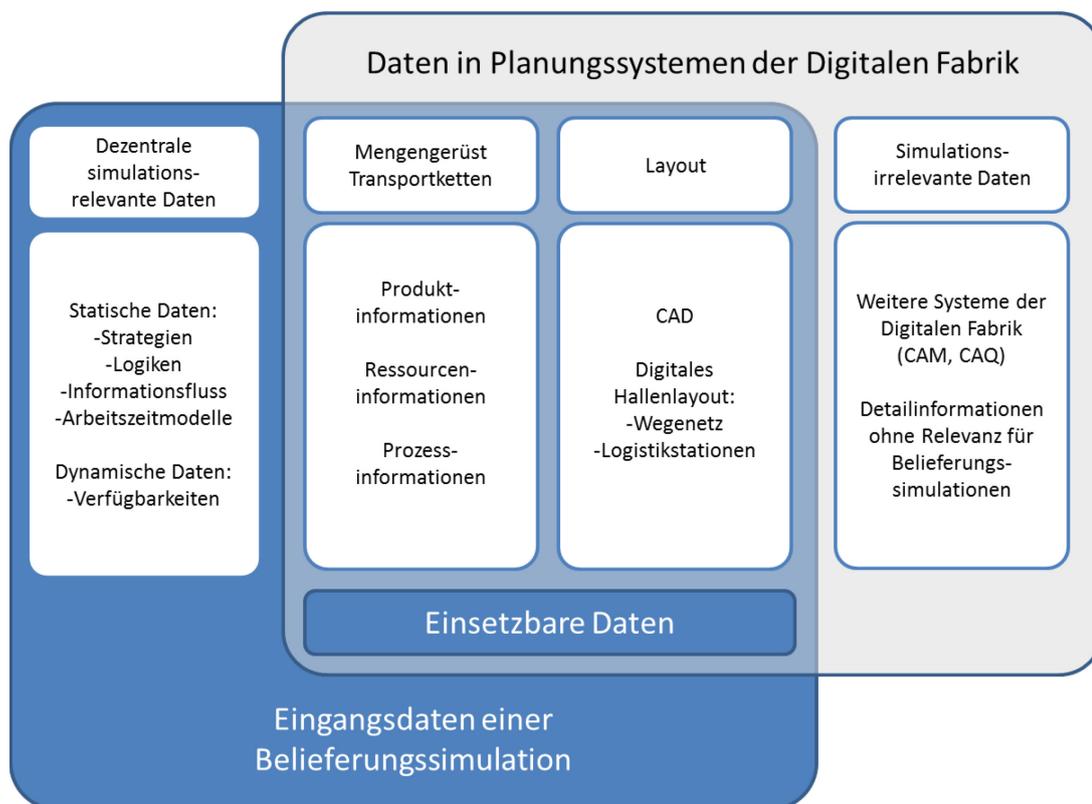


Abbildung 2.22: Schnittmenge der vorhandenen und benötigten Daten der Belieferungssimulation

2.8.1.1 Einsetzbare Daten

Die einsetzbaren Daten sind Informationen, welche in der Digitalen Fabrik verfügbar sind und in Simulationsmodellen benötigt werden, sie setzen sich für Belieferungssimulationen zusammen aus den PPR-Daten und dem Layout. [FRI07] unterteilte diese Kategorie weiter in unmittelbar und mittelbar einsetzbare Daten. Mittelbar einsetzbare Daten müssen vor ihrer Verwendung in ein passendes Format transformiert werden. Unmittelbar einsetzbare Daten können ohne Prüfung und Umwandlung direkt in den Simulator übergeben werden. Unter dem Gesichtspunkt der heterogenen Systemlandschaft der Digitalen Fabrik, unterschiedlichen Planungsprozessen mit unterschiedlichen Planungsfortschritten ist es nicht zu empfehlen, Daten unmittelbar in ein Simulationsmodell zu überführen. Neben einer Bewertung der Informationsqualität können weiter spezifische Konvertierungen, Kombinationen sowie Ergänzungen notwendig sein. Allerdings muss vorab sichergestellt werden, dass alle einsetzbaren Daten digital vorliegen und die Planungssysteme direkt an das Reportingmodul der Digitalen Fabrik angeschlossen sind oder über Schnittstellen verfügen, die das Simulationsgerüst versorgen können. Wenn die benötigten Daten in unterschiedlichen Systemen gespeichert sind, entsteht nach [JEN07] ein zusätzlicher Synchronisations- und Anpassungsaufwand.

a) Fabriklayout

Das CAD-Fabriklayout ist im Gegensatz zu den PPR-Daten nicht alphanumerisch gespeichert und nimmt somit eine Sonderstellung der in der Digitalen Fabrik gespeicherten Informationen ein. Das Fabriklayout bildet die Grundlage für Belieferungssimulationen. Die logistische Infrastruktur mit sämtlichen logistikrelevanten Stationen wie Warenein- und Ausgänge, Lager, Kommissionierflächen sowie Bereitstellorte sind in das Simulationsmodell zu überführen. Weiter ist das innerbetriebliche Wegenetz inklusive Rampen und Hebern (Lastenaufzügen) abzubilden. Die Übernahme des Layouts ist einer der ersten Schritte bei der Erstellung einer Belieferungssimulation. Gerade die maßstabgerechte Übertragung der Layoutinformationen in den Simulator ist von großer Relevanz, da sich im Simulationsmodell die benötigte Fahrzeit der FFZ auf den Fahrwegen ermittelt ($\text{Wegstrecke} \cdot \text{Geschwindigkeit}$). Für eine realistische Abbildung der FFZ mit ihrem Beschleunigungsverhalten werden diese längenorientiert abgebildet. Diese Längenorientierung der Simulationsbausteine benötigt viel Rechenleistung und ist daher deutlich langsamer als eine reine Platzorientierung, sie ist aber auf Grund der Ergebnisrelevanz unabdingbar. Eine automatisierte Übernahme des Fabriklayouts in einen Simulator ist bereits Stand der Technik, basierend auf der Arbeit von [ROO09]. Mit geringem personellem Aufwand lassen sich die Layoutinformationen aus dem Fabrikplanungsprogramm der Digitalen Fabrik über standardisierte Schnittstellen (z.B. SDX, GSL-L) ausgeben, die von dem Simulator wieder eingelesen werden. Dank der zusätzlich bereitgestellten Informationen in den Bausteinen des Fabrikplanungsprogramms kann der Simulator das Wegenetz und die Logistikstationen automatisiert interpretieren und aufbauen. Wichtig ist die gemeinsame Datenbasis, da sonst die Daten in der Fabrikplanungssoftware und im Simulator durch einen stetig ansteigenden Datenstand variieren, was zu Inkonsistenzen – und damit zu nicht verifizierbaren und nicht validierbaren Simulationsmodellen führt. Das Simulationsmodell kann bisher Layoutänderungen nicht automatisiert übernehmen. Aufwändige Anpassungen an das Simulationsmodell sind weiterhin notwendig. Hier ergibt sich weiterer Handlungsbedarf.

b) Produktdaten

Die Produktdaten enthalten Informationen über die von der Intralogistik bereitzustellenden Bauteile. Dazu gehören die Stammdaten wie Sachnummer, Positionsvariante und Teilefamilie. Weiter enthalten die Produktdaten Informationen über die von der Vertriebsprogrammplanung ermittelte Baurate (Stück) und Prozessbaurate (%), den montagebandbezogenen Bereitstellort (frühe Planungsphase, die Montageplanung hat die einzelnen Stationen noch nicht ausgetaktet), den montagestationsbezogenen Bereitstellort (späte Planungsphase, die Montagestationen wurden ausgetaktet und die Informationen wurden an die Logistik übermittelt), die Modulzugehörigkeit sowie Informationen über Sondermaßnahmen wie beispielsweise diebstahlrelevante oder spannungsgeladene Bauteile. Dies ist vor allem relevant für die Ermittlung der benötigten Ladungsträger am Tag und für das Dichteaufkommen über den Tag.

c) Ressourcendaten

Die Ressourcendaten enthalten Informationen über Ladungsträger, Logistikstationen und Transportmittel. Ressourcendaten lassen sich unterteilen in Ladungsträgerinhalt, Kapazität der Transportmittel sowie bei den Logistikstationen der geographische Ort mit seinen xyz-Koordinaten. Die Belieferungssimulation benötigt die Ressourcendaten für die Berechnung der Ergebnisse wie beispielsweise die Auslastung der eingesetzten FFZs.

Logistikstationen können in Belieferungssimulationen aus Warenein- und Warenausgängen, aus Voll- und Leergutlagern, aus Bereitstellflächen (die Verbauorte der Montage), aus Kommissionierflächen sowie Hebern und Rampen (Wegenetz) bestehen. Das Wegenetz verbindet sämtliche Logistikstationen miteinander und sorgt mit seinen Attributen für eine Erreichbarkeit der einzelnen Prozessstationen. Dazu gehören unter anderem Informationen über die Wegebreite, Einbahnstraßen und Überholmöglichkeiten sowie der Übergabepunkt zu den Logistikstationen.

Transportmittel sind Flurförderzeuge wie Stapler und Routenzüge, letztere bestehend aus Trollies mit mehreren Anhängern. Die beiden gängigsten Prozesse sind Routenverkehre und Punkt-zu-Punkt-Verkehre (von Staplern durchgeführt). Die wichtigsten Attribute sind die Kapazität der Transportmittel sowie die individuelle Geschwindigkeit. Da nicht alle Ladungsträger von allen FFZ transportiert werden können, sind zusätzlich Attribute wie Volumen- und Gewichtsrestriktionen notwendig.

Ladungsträger sind die Behälter, in denen die zu verbauenden Teile transportiert werden. Die Logistik transportiert somit immer die Behälter, nicht das einzelne Bauteil. Ein Ladungsträger durchläuft in der Intralogistik zwei unterschiedliche Prozesse, die unterschiedliche Attribute benötigen. Im Vollgutprozess (Wareneingang → Vollgutlager → Bereitstellort) ist der Stapelfaktor sowie das Gesamtgewicht relevant, im Leergutprozess (Bereitstellort → Leergutlager → Warenausgang) sind Attribute wie der Stapelfaktor in Verbindung mit einer Klappbarkeit notwendig.

d) Prozessdaten

Eine der zentralen Aufgaben der Logistikplanung ist die Ausgestaltung der Transportketten. Dazu erarbeitet der Logistikplaner für jede Teilefamilie individuelle Logistikpläne aus. Dieser Logistikplan enthält den Prozess des Bauteils in einer Ladeinheit (Ladungsträger) vom Wareneingang über die einzelnen Lager bis hin zum Bereitstellort sowie der Weg des Leergutes zurück über Leergutlager zum Warenausgang. Um mittels Standardisierung Skaleneffekte (nicht lineare Abhängigkeit zwischen Ergebnis und eingesetzter Faktoren) nutzen zu können, werden die einzelnen Ressourcen mit Transportbausteinen verknüpft. Weiter gehören zu den relevanten Prozessdaten Informationen der Montageplanung zur Festlegung der Bereitstellorte; die unterschiedlichen Versorgungskonzepte auf Basis der vier Standardbelieferungsformen (JIS, JIT, LLZ und mehrstufige Lagerhaltung); der Informationsfluss und Nachbestellprozess. Auch der Inhalt des Ladungsträgers ist eine Prozessinformation. Generell hat der Ladungsträgerinhalt direkte Auswirkungen auf die Reichweite am Bereitstellort und damit auch auf die Wiederversorgungsprozesse.

2.8.1.2 Dezentrale simulationsrelevante Daten

Dezentrale simulationsrelevante Daten sind für Belieferungssimulationen notwendige Daten, die nicht in dem führenden Planungssystem der Digitalen Fabrik vorgehalten werden. Die Systeme der Digitalen Fabrik bieten bisher nicht alle relevanten Informationen, die von einer Belieferungssimulation benötigt wird. Auch werden gewisse Informationen ausschließlich von der Belieferungssimulation verlangt, eine zentralisierte Speicherung dieser Informationen kann somit zu einem unangemessenen Mehraufwand bei der Pflege und der Aktualisierung der Daten

mit sich bringen. Beispielsweise sind bei elektronischen Transportleitsystemen die Prozessabläufe wie das Dispatching und Scheduling nachzubilden [HOM07b]. Dieses Detailkenntnis wird bisher nicht in den Planungssystemen abgebildet. Ein weiterer Grund hierfür ist, dass viele der für Materialflusssimulationen relevanten Daten nicht im Planungssystem erfasst werden müssen, da sie für die Logistikplanung außerhalb der Materialflusssimulation keine Relevanz haben oder nicht erfasst werden müssen. Die Gründe hierfür können vielschichtig sein: kein Mehrwert in der virtuellen Logistikplanung, mangelnde Kenntnisse von zeitdynamischen Zusammenhängen, andere Zuständigkeiten oder fehlende Funktionalität des Planungssystems. „Vor allem bei Daten wie Handhabungszeiten oder Verfügbarkeiten sind häufig keine oder nur unzureichende Angaben vorhanden. In diesem Fall müssen die erforderlichen Daten erst ermittelt werden“ [ROO09] S. 49. Im Gegensatz zu den einsetzbaren Daten der Digitalen Fabrik verantwortet die dezentralen simulationsrelevanten Daten die Rolle des Simulationsexperten. In der Regel ändern sich die dezentralen simulationsrelevanten Daten nur bei einer Änderung der Planungsprämissen, diese spielt allerdings in der Generierungsphase mit Modellvalidierung kein Gewicht, da bei Projektstart sich auf Planungsprämissen geeinigt wird.

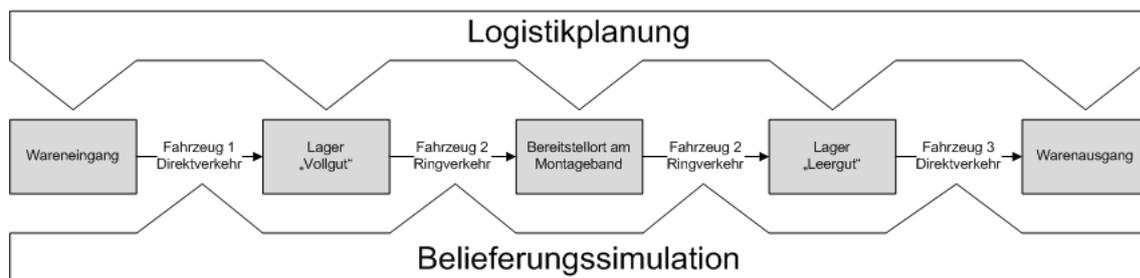


Abbildung 2.23: idealisierte Sichtweise der Logistikplanung und der Belieferungssimulation

Beliieferungssimulationen unterscheiden sich von der statischen Logistikplanung – und damit von der Digitalen Fabrik - durch eine andere Sichtweise (vgl. Abbildung 2.23). Während die Logistikplanung die einzelnen Logistikstationen der Transportkette betrachtet und die dazugehörigen Ressourcen ausplant, zeigt die Belieferungssimulation die dynamischen Zusammenhänge wie beispielsweise aller Versorgungsprozesse in Abhängigkeit des Wegenetzes oder die Gesamtverfügbarkeit der FFZ.

Zu den dezentralen simulationsrelevanten Daten gehören die Planungsprämissen mit den Steuerstrategien, die Ergänzung der PPR-Daten um zeitdynamische Aspekte wie Verfügbarkeiten und Schichtmodelle sowie die Simulationsparameter wie Erstbefüllungen, Anzahl Transportmittel oder die Ausgangsrouten.

2.8.1.3 Simulationsirrelevante Daten

Als für die Simulation irrelevante Daten gelten die Daten, die zwar für den Planungsprozess relevant in der Digitalen Fabrik zentral verfügbar sind, allerdings in der Belieferungssimulation keine Verwendung haben. Unter dem Konzept der Digitalen Fabrik ist eine hohe Anzahl unterschiedlicher Methoden und Systeme vereint, so sind neben der Digitalen Logistikplanung auch die Digitale Montageplanung, die Digitale Rohbauplanung und das Digitale Mockup im

Fokus. Diese Daten können zwar Einfluss auf die digitale Logistikplanung haben, beispielsweise die Festlegung der Bereitstellorte während der Montage-Logistik-Integration. [ROO09] warnt davor, zu viele unterschiedliche Informationen anzugehen. „Dies stellt dann den Simulationsexperten vor die Herausforderung, sich die entscheidenden Informationen manuell oder mittels systemunterstützten Mechanismen herauszufiltern.“ [ROO09], S. 49. Aus diesem Grund werden alle Informationen des Planungssystems außerhalb des Mengengerüsts und dem Hallenlayout der Digitalen Logistikplanung als simulationsirrelevant eingestuft.

2.8.2 Abhängigkeiten im Planungssystem der Digitalen Fabrik

Das Mengengerüst wird von Planern aufgebaut, diese stützen sich hierbei auf Informationen der Entwicklung, des Vertriebs, des Einkaufs, der Lieferanten, der Ladungsträgerplanung, der Fabrikplanung und der Montageplanung, aber auch bereits plausibilisierte Daten aus Vorgängerbaureihen werden verwendet. Die Informationen werden durch Planer manuell oder aus Systemen über Schnittstellen automatisiert in das Planungssystem übertragen. Jeder dieser vorgelagerten Umfänge wird wiederum von unterschiedlichen Quellen befüllt. Standardisierte Schnittstellen versorgen die einzelnen Systeme untereinander und ermöglichen somit einen beschleunigten Planungsprozess. Die Daten aus anderen Systemen werden bereits teilweise durch formale Kriterien geprüft. In Einzelfällen können jedoch fehlerhafte Eingaben oder falsche Verknüpfungen durch mehrere Systeme durchgeschleust werden. Potentielle Fehlerquellen sind Planereingaben (User-Eingaben) und Schnittstellen, die unterschiedliche Systeme miteinander verbinden (vgl. Abbildung 2.24).

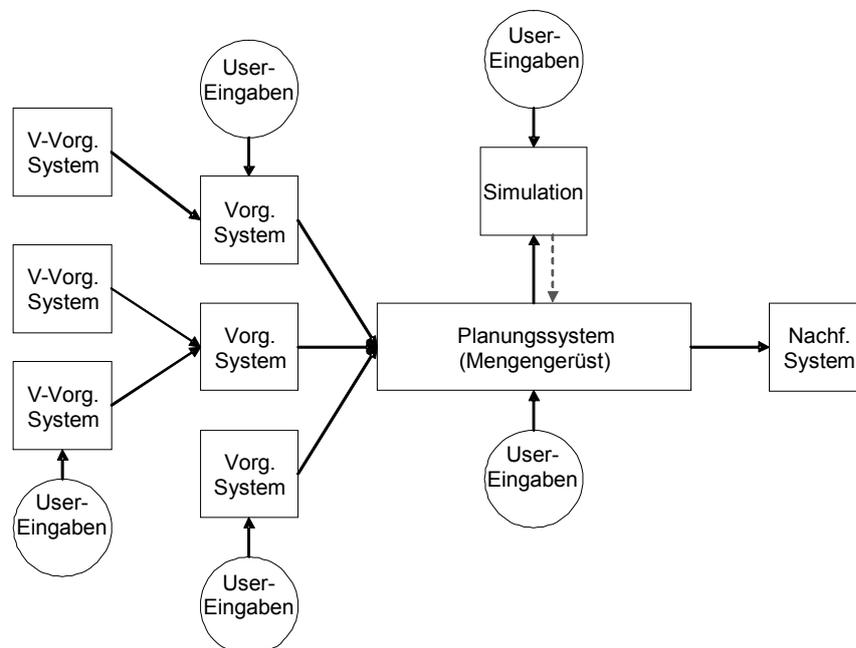


Abbildung 2.24: Entstehung der Eingangsdaten der Belieferungssimulation

Der Entstehungsprozess und die Rückverfolgbarkeit der einzelnen Daten sowie der Weg durch die digitalen Systeme sind für die Modellvalidierung und –verifizierung von großer Bedeutung.

2.8.3 Reifegradentwicklung der Digitalen Fabrik

Vorhandene Modelle von Belieferungssimulationen werden wie in der Einleitung erwähnt bisher in der Regel aufwändig an den Planungsfortschritt angepasst. Zu einem großen Teil liegt dies an einer fehlenden Strukturierung der einsetzbaren - und der dezentralen Eingangsdaten. Die einsetzbaren Daten der Digitalen Fabrik sind nach einer Untersuchung von [ROO09] im Produktplanungsprozess von unterschiedlichen Änderungshäufigkeiten betroffen, der sich aus einem sich ständig wachsenden Reifegrad ergibt (vgl. Abbildung 2.25). Die Prozessdaten im Produktentwicklungsprozess haben sowohl eine große Menge, eine große Änderungshäufigkeit sowie eine hohe Ergebnisrelevanz.

Im Vergleich zu den Prozessdaten spielen die Produkt-, Ressourcen- und Layoutdaten eine weniger gewichtige Rolle, sind aber für das Zusammenspiel in einer Belieferungssimulation ebenfalls relevant.

Dadurch ist es für eine wirtschaftliche Modellerstellung einer Belieferungssimulation unabdingbar, diese beiden Dimensionen der einsetzbaren Daten und der dezentralen simulationsrelevanten Daten miteinander so zu verbinden, dass die Modellgenerierung unter einem wachsenden Reifegrad jederzeit möglich ist. Die Entwicklung eines Simulationsgerüsts als möglicher Ansatz wird im nächsten Abschnitt aufgezeigt.

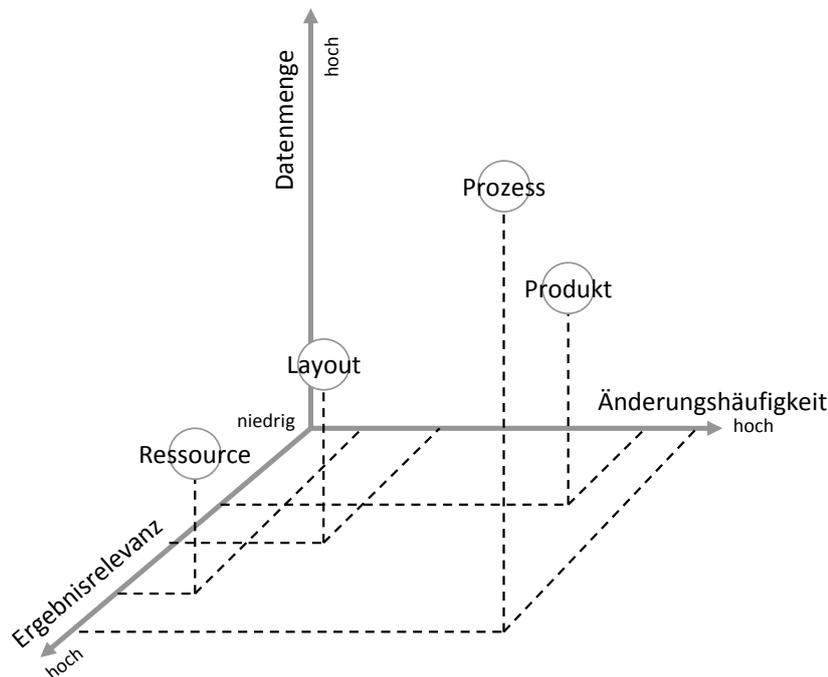


Abbildung 2.25: Sensitivitäten der benötigten Informationen [ROO09]

[ROO09] stellt in seiner Arbeit die Abhängigkeiten zwischen der Datenmenge, der Änderungshäufigkeit und der Ergebnisrelevanz schematisch auf (vgl. Abbildung 2.25). Diese Abbildung unterstützt die Verantwortlichen bei der Vorabplausibilisierung im folgenden Kapitel.

2.8.4 Vorabplausibilisierung im Planungssystem der Digitalen Fabrik

Bereits bei der Dateneingabe kann eine Vorabplausibilisierung integriert werden, in der beispielsweise die Eingabe auf Datentyp und Wertebereich vorab untersucht wird. Darstellbar ist das im Planungssystem durch vordefinierte Bausteine und Eingabefelder mit Plausibilitätsprüfungen (vgl. Abbildung 2.26). Hierbei können viele Inkonsistenzen bereits bei Eingabe unterbunden werden, allerdings sind diese Verfahren für eine umfassende Datenplausibilisierung alleine nicht ausreichend.

The screenshot shows a software window with the following sections and fields:

- Navigation:** Allgemein | Zielkosten pro Teil | Verhandelte LOG-FM Kosten | Ergebnisse pro Teil | Ladungsträger Berechnung | Notizen | LUF | Admin Daten | Anhang
- Allgemein:**
 - Label: C212_050
 - External ID: (empty)
- Zeitstempel:**
 - Erstellt: 08.09.2009 17:16:44
 - Erstellt von: admin
 - Geändert: 21.09.2010 19:16:08
 - Bearbeiter: fascript
- Standard LP:**
 - Std-LP Flag:
- LP Status:**
 - Vollständigkeitsstatus am LP: **unvollständig** (highlighted in red)
 - Vollständigkeitsstatus am LP (binär): 110111
 - Verknüpfung zur Teilefamilie:
 - Verknüpfungen zum Lieferant:
 - Verknüpfungen zur Ortsstruktur:
 - Verknüpfungen zum Behälter:
 - Transportvarianten haben Transportbausteine:
 - Transportbausteine haben Kostensatz:
 - Prüfe Vollständigkeit am LP: (button)
- Abgeleiteter Logistikplan:**
 - Ableitungstyp: Nichts
 - Master ID: (empty)
 - Ableitungsart: (empty)
- Buttons:** OK, Abbrechen, Anwenden, Vorschau, Drucken, Vorheriges, Nächstes

Abbildung 2.26: Plausibilisierung auf Vollständigkeit im Planungssystem der Digitalen Fabrik

2.9 Zusammenfassung und kritische Würdigung

Inzwischen ist aus den ersten Konzepten der Digitalen Fabrik dank leistungsfähiger IT-Systeme und einer durchgehenden Planungssystematik eine Grundlage geschaffen, mit welcher den Herausforderungen wie schnellere Planungszyklen und mehr Modellderivate begegnet werden können.

Aktuelle Planungswerkzeuge bieten die Möglichkeit, Eingangsdaten für Logistiksimulationen automatisiert so aufzubereiten, dass weitere Anpassungen oder Zwischenschritte vermieden werden können und eine Dokumentation des Prozesses ohne Zusatzaufwand erstellt werden kann.

Die Materialflusssimulation kommt in der Logistik bei allen deutschen OEMs zum Einsatz. Die Vorteile der Materialflusssimulation lassen sich auf die Fragestellungen in der Logistik durchgängig anwenden. Allerdings ist die Erhebung der Eingangsdaten noch nicht standardisiert gelöst, viele dieser Informationen werden auf Grundlage von nicht dokumentierten Erfahrungswerten generiert.

Erste Ansätze zur Bewertung der Vollständigkeit sind bereits in Planungswerkzeugen integriert, allerdings wird das volle Potential einer Prüfung auf Vollständigkeit und auf Korrektheit der Daten noch nicht angewendet. Im nächsten Kapitel wird der Stand der Wissenschaft mit dem Stand der Technik abgeglichen, um mögliche Deckungslücken zu identifizieren.

3 Stand der Wissenschaft

3.1 *Einordnung der vorhandenen Ansätze im Bezug auf Belieferungssimulationen*

Erste Ansätze zur computerunterstützten Generierung von Simulationsmodellen finden sich seit rund zwei Jahrzehnten. Mit der zunehmenden Verbreitung von Simulationswerkzeugen und immer leistungstärkerer IT-Systeme stieg auch der Bedarf, Fragestellungen dynamisch abzusichern. Zudem wurden in der Wissenschaft neue Ansätze untersucht, den Einsatz der Simulation wirtschaftlich weiterzuentwickeln. Die unterschiedlichen Vorgehensmodelle für einen Modellaufbau lassen sich nach [ECK02] in drei Modellierungsarten klassifizieren:

1. **Parametrischer Ansatz**

Das Modell wird durch die Verwendung definierter und strukturierter Simulationsbausteine erstellt, die in einem weiteren Schritt parametrisiert werden.

2. **Strukturbasierter Ansatz**

Das Modell wird aus der Struktur des realen bzw. geplanten Systems aufgebaut und im Anschluss parametrisiert. Bei einer Belieferungssimulation entspricht die Struktur dem Layout mit Logistikstationen und Wegenetz.

3. **Hybrid-wissensbasierter Ansatz**

Dieser Ansatz kombiniert die beiden vorherigen Ansätze mit Verfahren aus der künstlichen Intelligenz (neuronalen Netze, Expertensysteme, ...).

[SBM10] hinterfragt den Ansatz kritisch und stellt fest, dass die meisten aktuellen Arbeiten den hybrid-wissensbasierten Ansatz verfolgen. Neben dieser Einteilung ist eine Unterscheidung in planungsbegleitende und betriebsbegleitende Simulationen wichtig, da die Eingangsdaten aus unterschiedlichen Quellen stammen. Betriebsbegleitend können diese aus BDE-Systemen (Betriebsdatenerfassung) und aus MDE-Systemen (Maschinendatenerfassung) verwendet werden, beispielsweise Informationen zur Ausbringung, Verfügbarkeit, Auslastung, Laufzeit, Energieverbrauch und Status. Im Gegensatz zu betriebsbegleitenden Simulationen entsteht die planungsbegleitende Simulation ohne die reale Produktion im Hintergrund, die Eingangsdaten werden aus planerischer Leistung mit wachsendem Reifegrad generiert.

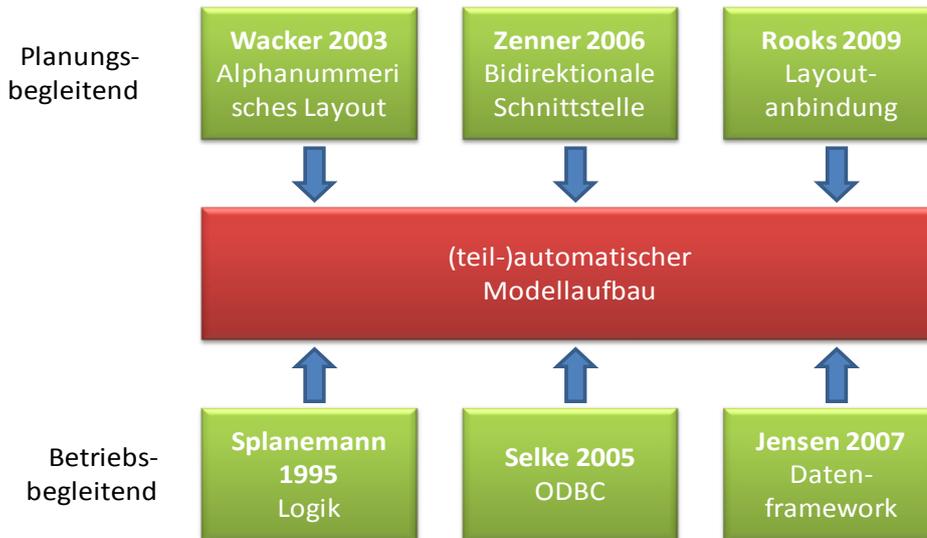


Abbildung 3.1: Klassifikation vorhandener Ansätze zur Modellgenerierung

Planungsbegleitend seien hier beispielhaft die Arbeiten von [WAC03], [ZEN06], [FRI07] und [ROO09], betriebsbegleitend die Arbeiten von [SPL95], [SEL05], [GR08] und [JEN07] genannt (vgl. Abbildung 3.1). Die große Zahl an wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich der Materialflusssimulation zeigt das breite Interesse der Beteiligten an einem wirtschaftlichen Modellaufbau. Der Einsatz der Materialflusssimulationen lässt sich in drei Anwendungsgebiete gliedern. Insbesondere die Fokussierung der Arbeit von [ROO09] auf den Einsatz der Materialflusssimulation im Bereich der Belieferungslogistik, die Kopplung der drei Dimensionen der Prozessplanung (Produkt, Prozess und Ressource) mit dem maßstabsgetreuen Layout ist hier hervorzuheben. Betriebsbegleitende Fragestellungen beschäftigen sich mit der Verbesserung bestehender Produktionssysteme und Anlagen, bspw. die Pufferdimensionierung bei einem Anlagenumbau. Planungsbegleitend werden künftige Systeme vorab mit den im System vorhandenen Planungsdaten untersucht, getroffene Aussagen sorgen nicht nur für eine optimierte Planung, sondern wirken sich auch auf die reale Fertigung aus.

Die Übersicht in Tabelle 3.1 zeigt für die Kriterien die möglichen Ausprägungen in Form eines morphologischen Kastens [SBM10]. Die Anzahl der Ausprägungen lässt auf die Bandbreite der unterschiedlichen Möglichkeiten schließen, mit welcher Methodik Simulationsmodelle generiert werden können.

Kriterium	Ausprägung				
Einsatzfall der generierten Simulationsmodelle	planungsbegleitend		taktisch (z.B. Layout, Puffergrößen)	betriebs- begleitend	hybrid
	strategisch (z.B. Standort)				
Fertigungstyp	Job-Shop		Flow-Shop		Open-Shop
Fokussiertes Gewerk	Montage	Lackiererei	Logistik	Förder- technik	Andere
Nutzergruppe	Fachabteilung		Simulationsexperte		Jeder
Grad der Automatisierung der Modellerstellung	keine	teilautomatisch			voll auto- matisch
		Struktur	Verhalten	beides	
Ansatz der Modellerstellung	Standardi- sierte Eingabe- formulare	Dialog- geführt (Wizzard o.ä.)	Referenz- modelle	Direkter generischer Modellaufbau	
				eine Daten- quelle	alle rele- vanten Systeme
Unterstützte Phasen der Simulationsstudie	Modell- erstellung	Verifikation und Validierung	Experiment / Initialisierung		mehrere
Technische Umsetzung der Schnittstelle	textbasiert (z.B. *.csv)	tabellen- basiert (z.B. Excel)	XML (z.B. CMSD)	Datenbank (z.B. SQL)	
Art der fachlichen Schnittstelle	layoutbasiert (z.B. SDX)	produktbasiert (z.B. STEP)	prozessbasiert	sonstige / hybrid	
Wiederverwendung des Modells	keine		mehrmalig		
	keine weiteren Fragestell- ungen	nicht wirt- schaftlich	manuelle Nachbe- arbeitung	Neupara- metri- sierung	kontinu- ierliche Anpass- ung

Tabelle 3.1: Morphologischer Kasten für Methoden zur Modellerstellung [SBM10]

Im Folgenden werden die relevanten aktuellen Ansätze nach den Forschungsdimensionen eingeteilt und nach den für diese Arbeit wichtigen Kategorien Informationsqualität, Modellgenerierung und Modellvalidierung untersucht.

3.1.1 Rechnergestützte Simulationsmodellgenerierung zur dynamischen Absicherung der Montagelogistikplanung bei der Fahrzeugneutypplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik nach [ROO09]

Dimension/Anwendungsbereich

[ROO09] beschäftigt sich mit seiner Arbeit mit der Modellgenerierung von Simulationsmodellen im Rahmen der Digitalen Fabrik. Untersuchte Domäne ist die Produktionsplanung der Montagelogistik eines Automobilherstellers.

Grobkonzept

[ROO09] beschreibt einen Ansatz zur rechnergestützten Modellgenerierung. Basis ist das Mengengerüst des Planungssystems und die Layoutinformationen. Da seiner Meinung nach keine vollautomatische Modellgenerierung möglich ist, verfolgt er eine hybride Lösung, welche Teile des Erstellungsaufwandes automatisch abbildet, auf der anderen Seite aber manuelle Parametrisierung durch den Simulationsexperten erfordert. Das Konzept lässt sich in vier Teile untergliedern:

1. Erweiterung der Planungssysteme um simulationsrelevante Eingangsdaten

Durch die Erweiterung des Planungssystems und damit der planerischen Leistung werden bereits simulationsrelevante Objekte und Attribute ergänzt. Dazu wird zusätzlich der Planungsprozess so angepasst, dass die simulationsrelevanten Daten vom Planer direkt mit eingegeben werden. Dank der Digitalen Fabrik hat der Planer Zugriff auf eine aktuelle und konsolidierte Datenbasis. Gerade in der Logistikplanung mit Prozess- und Layoutinformationen kann so ein Großteil des Datenmodells erstellt werden. Die Maßgabe von standardisierten Planungsobjekten und -Bibliotheken stellt hier die Grundlage für die automatische Modellgenerierung dar.

2. Datenübertragung mittels einer XML-Schnittstelle in den Simulator

Die automatische Übertragung der Planungsdaten in den Simulator erfolgt über eine XML-Datei, welche sich im Vergleich zu spezifischen Schnittstellen durch eine große Verbreitung und Akzeptanz auszeichnet. Dadurch entfällt das zeitaufwändige manuelle Zusammenstellen und Aufbereiten der Eingangsparameter.

3. Aufbau eines generischen Simulationsmodells in Plant Simulation

Die in der XML gespeicherten Informationen werden vom Simulator eingelesen und dieser generiert auf der Grundlage der Daten aus dem Planungssystem ein erstes Modell. Dadurch können erste grobe Aussagen zu den Einsatzfaktoren wie Fahrzeuge und Wegenetz gewonnen werden und verschiedene Versorgungsstrategien und Organisationskonzepte verglichen und bewertet werden. Allerdings fehlen für belastbare Aussagen noch Eingangsdaten.

4. Händische Ergänzung der nicht übertragenen, aber relevanten Eingangsdaten im Simulator

Letztlich werden die Informationen, welche nicht automatisiert in den Simulator gelangen, ergänzt. Durch das strukturierte Vorgehen wird eine enge Verknüpfung von Simulation und Digitaler Fabrik, eine Konsolidierung der Planungsdaten sowie eine bessere Dokumentation der Planungsergebnisse geschaffen. Allerdings fehlen nach Rooks bisher stochastische Einflussgrößen in der Planung, um diese valide dynamisch abzusichern. Weiter ist der Informationsfluss bisher nicht im Planungssystem berücksichtigt, welcher für ein

Simulationsmodell zwingend erforderlich ist. Dadurch können nur Ver- und Entsorgungsstrategien abgebildet werden, die einen einstufigen Lagerprozess besitzen. Auch wird ein valides Datenmodell benötigt, dies ist bisher nur teilweise über vorgelagerte Prozesse wie die statische Kostenrechnung oder die Prozessparametrisierung möglich. Rooks fordert die Datenplausibilisierung des Planungssystems im Rahmen der Digitalen Fabrik. Die Weiterentwicklung der Digitalen Fabrik hin zum gewerkeübergreifenden Ansatz für eine Modellgenerierung benötigt kompatible wie interaktionsfähige Simulationsbausteine. Am Ende seiner Arbeit wird auf den Bedarf einer künftigen 3D-Visualisierung des dynamischen Materialflusses verwiesen.

Aussagen zur Qualität der Eingangsdaten

[ROO09] stützt sich auf die Kriterien für die Modellqualität nach [RSW08]. Dazu zählen die Vollständigkeit, Konsistenz, Genauigkeit, Aktualität, Eignung, Plausibilität, Verständlichkeit, Machbarkeit und Verfügbarkeit. Die Güte des Modells und die Ergebnisse hieraus hängen direkt mit den Eingangsdaten zusammen. Rooks baut hier auf die Deming'sche Qualitätsphilosophie auf [DEM94]: Planen (plan), Ausführen (do), Überprüfen (check) und Korrigieren oder Neuplanen (act). Eine frühzeitige Erkennung von Defiziten bringt weniger Änderungsaufwand im fertigen Modell und erhöht somit den Reifegrad. Die Herkunft wie Erstellungszeitpunkt der Eingangsdaten ist zu protokollieren. Für die Ressourcen ist es zu prüfen, ob alle Muss-Felder befüllt sind und ob alle referenzierten Objekte existieren. Wünschenswert, allerdings nicht weiter betrachtet, ist eine Anbindung der Werkzeuge der Digitalen Fabrik an ein Datawarehouse zur statischen Absicherung.

Modellaufbau und Strategieimplementierung

[ROO09] beschreibt ein vierstufiges Konzept. In der ersten Stufe werden die Logistikpläne mittels Standardprozessen parametrisiert, Schwierigkeiten ergeben sich hauptsächlich durch mangelhafte oder redundante Daten. In der zweiten Stufe erzeugt das Planungssystem eine Datei im XML-Format, welche in der dritten Stufe das Simulationsmodell aufbaut. Dieses Modell spiegelt das aktuelle Planungsprojekt 1:1 wider. Fehlende Daten müssen entweder direkt im Planungssystem integriert oder manuell in einer Zwischenstufe ergänzt werden. Das Simulationsmodell ist die Basis für alle simulationsrelevanten Fragestellungen. In der vierten Stufe werden nun die simulationsrelevanten Eingangsparameter wie Informationsfluss, Verfügbarkeiten und Schichtmodelle ergänzt. Eine Wiederverwendung des Referenzmodells ist möglich. Für die Routenfindung im Simulationsmodell wird auf die Heuristik der INPRO [DN09] zurückgegriffen. Diese findet auf Grundlage der statischen Layoutplanung eine voroptimierte Ausgangsposition von Routenzügen, die dann bei Bedarf im Simulationsmodell angepasst werden können.

Ansätze der Modellvalidierung

Der Datenqualität kommt eine essentielle Bedeutung zu, unter Umständen kann durch die automatische Modellgenerierung nach Rooks ein erhöhter Aufwand entstehen. Ein strukturiertes Vorgehen mittels Checklisten erleichtert die Validierung und Verifikation, Rooks ergänzt hier das Vorgehensmodell von [RSW08] um Meilensteine, die per Checkliste abgesichert werden sollten. Besonders Simulationsprojekte unter Zeitdruck haben einen erhöhten Aufwand der Modellvalidierung, unter anderem wegen Dokumentationen der Eingangsparameter. Nach [ROO09] sind 60% der Planungsumfänge der Logistikplanung mittels Materialflusssimulation

überprüfbar und damit absicherbar. Der Abgleich der Prozessbausteine mit den Standards erleichtert die Fehlerendeckung. Die Überprüfung von Informationsflüssen ist nicht möglich, da diese in den Planungswerkzeugen nicht oder ungenügend abgebildet sind. Die Ergänzung der Informationsflüsse erfordert einen Simulationsexperten mit Fach- und Systemkenntnissen und erfolgt im Referenzmodell. Die Validierung des Referenzmodells ist auf Grund von der hohen Individualisierung sehr schwer, Rooks verweist hier auf die Empfehlungen von [RSW08].

Werkzeuge

Die Systemlandschaft von Rooks baut auf die Planungsdatenbank des *Delmia Process Engineer (DPE)* auf, welche nach drei Sichtweisen Produkt, Prozess und Ressource unterteilt ist. Um die Verknüpfung des PPR-Hubs mit dem Fabriklayout herzustellen, wird die Software *Malaga* der Firma *ZIP* eingesetzt. *Malaga* erzeugt eine Datei im XML-Format, welche vom Simulator *Plant Simulation* von *Siemens PLM* mittels *GSL-L* (Generische Simulationslösung Logistik) Baustein eingelesen und daraus das Modell aufgebaut wird.

Relevanz für die vorliegende Arbeit

Die Arbeit von [ROO09] beschreibt die dynamische Absicherung im Bereich der Montagelogistik und liefert Lösungsansätze zur computerunterstützten Modellerstellung. Auf der Basis des Layoutplanungswerkzeuges *Malaga* wurde 2010 eine Schnittstelle bei den im VDA-Arbeitskreis Ablaufsimulation beteiligten Unternehmen validiert, die einen Großteil der von Rooks entwickelten Bausteine übernimmt. Auch die Heuristik der Routenoptimierung [DN09] verbessert die Ausgangssituation vor dem ersten Simulationslauf. Für den operativen Einsatz in der Logistikplanung geht die Arbeit allerdings nicht weit genug. Offene Fragen wie die Qualität der Eingangsdaten im Vergleich zu dem Aufwand einer nachträglichen Anpassung im Simulationsmodell sowie eine manuelle Nachparametrierung bei einem steigenden Reifegrad werden nicht hinreichend beantwortet. Auch die Einstufigkeit der Versorgungsprozesse bilden nur einen geringen Teil des Spektrums der relevanten Prozesse ab und erfordert somit viel Zeit und Expertenwissen, die entsprechende Mehrstufigkeit akkurat und valide nachzumodellieren. Es wurden keine Aussagen zu Beherrschung der Komplexität getroffen.

3.1.2 Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionsdatensystemen am Beispiel einer Job-Shop-Fertigung nach [JEN07]

Dimension/Anwendungsbereich

[JEN07] beschäftigt sich in seiner Arbeit mit einem Verfahren zur Kopplung industrieller Produktionsdatensysteme zur teilautomatischen Generierung von Simulationsmodellen. Gegenstand seiner Untersuchung ist der Abgleich von Planungsdaten mit einem Simulationsmodell. Die untersuchte Domäne ist die Job-Shop-Fertigung, die Simulation wird planungsbegleitend erstellt. Allerdings greift Jensen auch auf BDE-Daten der bestehenden Produktion zu, die in betriebsbegleitenden Systemen erzeugt und vorgehalten werden.

Grobkonzept

Der Hauptbestandteil ist das Zusammenführen verschiedener Datenquellen zu einem Datenframework auf der Basis von Web-Diensten. Diese enthalten eine Logik, die diese Daten flexibel zusammenstellt und standardisiert auf der Basis einer XML-Datei aufbereitet. In nächsten Schritt wird die XML-Datei auf einem Client-Rechner grafisch dargestellt und kann

den Fragestellungen der Simulation angepasst und verschiedene Alternativen abgeleitet werden. Diese werden mittels XML-Parsern an die unterschiedlichen Simulatoren übergeben, die das Modell erzeugen, ausführen und analysieren. Dadurch können einfache Fragestellungen wie Kapazitätsanalysen, Losgrößenbestimmung und Pufferdimensionierung ausgewertet werden.

Aussagen zur Qualität der Eingangsdaten

[JEN07] führt auf, dass der Erfolg der Simulation auch von der Datenqualität in den Planungssystemen abhängt. Fakt sei, dass es sich dabei um eine große Menge an Daten handelt, welche von Hand nicht mehr ausgewertet werden und noch weniger auf die formale Korrektheit und Validität geprüft werden können. Allerdings lassen sich durch einen teilautomatischen Modellaufbau sehr schnell Fehler und Inkonsistenzen in den Planungssystemen erkennen. Eine Konsistenz, die für eine Simulation benötigt wird, kann kaum erreicht werden. Eine Fehlerrate von 5% sei typisch. Selbst kleine Unstimmigkeiten in der Datenbasis führen oftmals zu einem nicht ausführbaren Modell. Im Laufe der Planungszeit bilden sich komplexe Geflechte an Abhängigkeiten, welche die Konsistenzhaltung der Daten immer schwieriger macht. Daher ist es sinnvoll, die Simulationsdaten nicht im Modell, sondern in einer separaten Datenbank vorzuhalten. Auch muss die Simulationsdatenstruktur in der Lage sein, flexible und erweiterbare Verknüpfungen abzubilden. Die weit verbreitete Praxis, Simulationsdaten mit Datenexporten aus Quellsystemen in spezielle Simulationsdatenbanken vorzuhalten ist zeitaufwendig und prädestiniert für Dateninkonsistenzen.

Modellaufbau und Strategieimplementierung

Tatsache sei es, dass die meisten Eingangsdaten in betriebsbegleitenden Systemen vorhanden sind oder durch Umwandlung oder Berechnung aus existierenden Daten ermittelt werden können. Daraus wird das Framework zur Informationsbereitstellung generiert. Allerdings werden nicht alle Umfänge, die für die Simulation wichtig sind, in Systemen gepflegt. Die Nutzung von statistischen Methoden zur Generierung statistischer für die Simulation geeigneter Kennzahlen kann unterstützen. Fehlende Parameter und Attribute sind nachzumodellieren. Die Steuerstrategien sind in der Modellvorlage des entsprechenden Simulators zu hinterlegen.

Ansätze der Modellvalidierung

Die Modellvalidierung muss ein Simulationsexperte übernehmen, ein Push-the-Butten-Prinzip sei nicht zielführend. Wichtig ist das standardisierte Vorgehen. Für Jensen ist die Simulation ein Werkzeug für die Datenvalidierung im Planungssystem. Mit den entwickelten Methoden sei eine automatische und damit effiziente Generierung von Simulationsmodellen möglich. Es können somit ausreichend valide und aufwandsarm erzeugte Simulationsmodelle zur Verfügung gestellt werden.

Werkzeuge

[JEN07] greift mit Anbindungsmodulen seines Datenframework auf unterschiedliche Quellsysteme zurück, unter anderen Auswertungen von BDE-Daten in *Excel*. Die Daten werden in einer nicht spezifizierten Datenbank zusammengeführt. Die Anbindung an den Simulator *PlantSimulation* erfolgt im XML-Format.

Relevanz für die vorliegende Arbeit

[JEN07] liefert eine gute Ausgangssituation für die Modellgenerierung, in dem verschiedene Quellsysteme in einem Datenframework zusammengefasst werden. Das Konzept bietet eine

hohe Automatisierung, allerdings gelingt keine vollautomatische Modellgenerierung. Die dynamischen Eingangsdaten sind nur zu einem geringen Teil in den Quellsystemen vorhanden, unter anderem die Zuordnung von Maschinen und Werkern sowie Steuerungsstrategien. Für den Modellaufbau der Belieferungssimulation ist das von Jensen beschriebene XML-Format eine gute Grundlage. Auch die Erkenntnis, dass eine standardisierte Bibliothek mit definierten Bausteinen die Modellgenerierung erleichtert, hat sich bewährt.

3.1.3 Entwicklung von Methoden zur automatischen Modellgenerierung nach [SEL05]

Dimension/Anwendungsbereich

[SEL05] entwickelte Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung. In einem dynamischen und komplexen Unternehmensumfeld wird eine Fertigung eines Produktionssystems betriebsbegleitend aufgebaut.

Grobkonzept

[SEL05] baut auf den Ansatz von [SPL95] auf und beschreibt die simulationsrelevanten Eingangsdaten. Die Eingangsdaten kommen dabei aus PPS- und BDE-Systemen. Diese Daten werden gefiltert, gesammelt und exportiert. Im nächsten Schritt werden diese Daten dialoggeführt händisch um die simulationsrelevanten Daten ergänzt und in eine Datenbank übergeben. Hier werden die Experimentdaten ergänzt und im Anschluss an den Simulator übergeben. Die Ergänzung der fehlenden Daten erfolgt direkt im Simulator.

Aussagen zur Qualität der Eingangsdaten

Der Großteil der Eingangsdaten kommt aus PPS- und BDE-Systemen. Es werden keine Aussagen zur Datenqualität in den Quellsystemen getätigt.

Modellaufbau und Strategieimplementierung

[SEL05] gliedert seinen Modellaufbaukonzept in drei Module, die unabhängig voneinander funktionieren, allerdings nur im Zusammenspiel aller Module kann das Simulationsmodell ganzheitlich automatisch generiert werden. Das erste Modul beschreibt Modelle von Abläufen und Strategien der Produktionssteuerung. Im zweiten Modul werden die Methoden zur Interpretation von Abläufen und Strategien der Produktionssteuerung identifiziert und ein Metamodell aufgebaut. Dieses Metamodell bildet den Rahmen, der definiert, wie die Abläufe und Strategien der Produktionssteuerung verwaltet und nachfolgend für die Modellierung in einem Simulationsmodell eingesetzt werden können. Als Methode zur Interpretation wird die Mustererkennung eingeführt. Dies schafft die Grundlage im dritten Modul für eine Integration in eine planerische Vorgehensbeschreibung, welche den automatischen Modellaufbau beschreibt. Steuer- und Prozessinformationen lassen sich nicht aus dem Systemen entnehmen, daher werden diese händisch im Simulator nachgepflegt. Nach Selke eignet sich der Prototyp bisher nicht für den operativen Einsatz.

Ansätze der Modellvalidierung

Nach [SEL05] ist das Simulationsmodell nach einer automatischen Modellgenerierung ausreichend valide, die Qualität der Modelle konnte durch die automatische Modellgenerierung gesichert werden. Es werden keine genaueren Aussagen gemacht.

Werkzeuge

Das Konzept von Selke bedient sich der im betrieblichen Umfeld vorhandenen PPS- und BDE-Systeme und exportiert die simulationsrelevanten Daten in *Excel*-Arbeitsblätter. Diese werden mit einem VBA-Makro dialoggeführt manuell ergänzt und aufbereitet. Die Simulationseingangsdaten werden in *Access* gesammelt und mit Experimentparametern angereichert, um diese im Anschluss mittels einer ODBC-Schnittstelle an *PlantSimulation* zu übergeben.

Relevanz für die vorliegende Arbeit

[SEL05] beschreibt ein Simulationsframework, in welchem die unterschiedlichen Quellsysteme zusammengeführt werden. Insbesondere die angepasste Mustererkennung nach [JH00] und [BKR96] ist eine gute Ausgangssituation für eine Modellgenerierung für Belieferungssimulationen, die dialoggeführte Ergänzung der simulationsrelevanten Eingangsparameter bietet Nutzerfreundlichkeit.

3.1.4 Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik nach [FRI07]

Dimension/Anwendungsbereich

[FRI07] beschreibt in seiner Arbeit „Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme“ vier Methoden, um Fertigungssysteme abzusichern. Darunter befindet sich auch die Methode der Simulation. Sein Konzept ist planungsbegleitend, kann aber nach seiner Aussage auch für betriebsbegleitende Fragestellungen eingesetzt werden.

Grobkonzept

Um den erheblichen Aufwand der Datenbeschaffung einer Simulationsstudie zu reduzieren setzt das Konzept von [FRI07] eine Phase früher an. Er hinterfragt die Simulationswürdigkeit mit Hilfe einer Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolioanalyse. Daraus ergeben sich vier Handlungsfelder: Fragestellungen mit geringer Detaillierungsgrad und geringer Untersuchungshäufigkeit können ohne Simulation mittels alternativer Methoden und Werkzeugen abgesichert werden. Fragestellungen mit hohem Detaillierungsgrad (Feinplanung) und niedriger Untersuchungshäufigkeit können mit einem teilautomatischen Modellaufbau abgesichert werden, in dem die Planungsdaten mittels Schnittstelle in den Simulator übergeben und die simulationsrelevanten Eingangsdaten manuell ergänzt werden. Bei einer Fragestellung mit einem niedrigen Detaillierungsgrad und einer hohen Untersuchungshäufigkeit bieten sich simulationsbasierte Kennfelder ein, die bei einer entsprechenden Wiederverwendung für andere Fragestellungen in einen Katalog überführt werden. Ein hoher Detaillierungsgrad (Feinplanung) mit einer hohen Untersuchungshäufigkeit bedingt einen manuellen Modellaufbau bzw. eine Anpassung bereits vorhandener Modelle. Die Arbeit konzentriert sich auf die Methoden der von ihm beschriebenen simulationsbasierten Kennfelder und der teilautomatischen Modellerstellung.

Aussagen zur Qualität der Eingangsdaten

Es werden keine Aussagen zur Qualität der Eingangsdaten getätigt.

Modellaufbau und Strategieimplementierung

[FRI07] unterteilt die in der Digitalen Fabrik vorhandenen Daten für die Simulation relevante Eingangsdaten in mittelbar verwendbare Daten, unmittelbar verwendbare Daten und in simulationsirrelevante Daten und ergänzt diese mittels eines Excelsheets um die simulationsrelevanten Daten. Über ein Modul zur automatischen Modellgenerierung (AMG) kann dieses Excelsheet eingelesen werden und das Modell generiert werden. Wichtig ist die Verwendung einer standardisierten Vorlage in Excel.

Ansätze der Modellvalidierung

[FRI07] definiert Validierung mit der Korrektheit der vorgelagerten Schritte der modellbasierten Systemanalyse, Verifikation wird mit der Prüfung der Richtigkeit der verwendeten Modellparameter definiert. Hierbei weicht er von der gängigen Definition nach [RSW08] ab. Die Validierung der Schnittstelle ist nach [FRI07] sehr einfach, die Verifikation hingegen sei aufwändig, da auch geprüft werden muss, ob die Struktur richtig übernommen wurde. Dies ist durch einen hohen Mitarbeiteinsatz zu bewerkstelligen. Eine Modellvalidierung wird nicht erwähnt.

Werkzeuge

Die beschriebene Systemlandschaft besteht aus dem *DPE* als zentrale Planungsdatenbank, *PlantSimulation* als Simulator, die Zwischenschicht besteht aus *Excel*-Tabellen mit standardisierten Vorlagen. Das automatische Modellgenerierungsmodul aus *PlantSimulation* erstellt das Simulationsmodell.

Relevanz für die vorliegende Arbeit

[FRI07] gelangt zu der Erkenntnis, dass in der Feinplanung die Nutzung eines Simulationsmodells zur Planungsabsicherung notwendig ist. Dies lässt sich auf die hohe Detaillierung der Belieferungssimulation übertragen. Weiter führt er auf, dass die Manipulation der exportierten Daten der Digitalen Fabrik ein breites Grundverständnis von Simulationsmethodiken voraussetzt. Dies spiegelt sich auch in der Erstellung einer Belieferungssimulation in der strikten Rollentrennung zwischen Logistikplaner und Simulationsexperten wider. Kritisch sind seine Aussagen in der Feinplanung. Hierbei wird nicht das Potential einer automatischen Modellgenerierung genutzt und zusätzlicher Aufwand durch die spezielle Aufbereitung der Eingangsdaten generiert.

3.1.5 Automatische Modellgenerierung von Simulationsmodellen auf Basis einer Socket-Lösung mit Planungsdatenbank und dem Simulationssystem Quest von Delmia nach [WAC03]

Dimension/Anwendungsbereich

[WAC03] beschreibt in seiner Arbeit „Automatische Generierung von Simulationsmodellen auf Basis einer Socket-Lösung mit Planungsdatenbank und dem Simulationssystem *Quest* von *Delmia*“ eine Modellgenerierung für Fördertechniksimulationen in der Domäne Montage. Er setzt auf Daten aus der Digitalen Fabrik eines deutschen Automobilherstellers planungsbegleitend auf.

Grobkonzept

[WAC03] interpretiert automatisch das Fördertechnik-Layout und baut daraus automatisch ein Simulationsmodell auf. Bevor dieses Layout interpretiert werden kann, ist es von Layoutplanern konsequent nach Zeichenkonventionen zu erstellen und mit zusätzlichen Informationen, wie bspw. der Flussrichtung, zu versorgen. Das Layout und die Planungsdaten werden in einer Datenbank gesammelt und manuell um fehlende Daten wie technische Verfügbarkeiten ergänzt. Mit allen vorgehaltenen Daten kann der Simulator nun das Modell generieren. Das Konzept wurde auf der ASIM 2008 in Berlin von [WW08] vorgestellt und ist in der Zwischenzeit bei allen in VDA organisierten OEMs ausgerollt und in Piloten oder bereits produktiv unter dem Namen GSL-FT (Generische Simulationslösung Fördertechnik) im Einsatz, erweitert um eine Visualisierungskomponente.

Aussagen zur Qualität der Eingangsdaten

Die Eingangsdaten werden von den Planern bereitgestellt, fehlende Informationen sind durch den Simulationsexperten nachzupflegen. Es werden keine weiteren Aussagen zur Qualität der Daten getätigt.

Modellaufbau und Strategieimplementierung

[WAC03] und [WW08] setzten in der Layoutplanung auf ein Bibliothekssystem mit hinterlegten Standardelementen. Somit kann der Planer nach dem Bausteinkastenprinzip komplette Layouts erstellen. Diese Layouts werden zusätzlich um simulationsrelevante Informationen erweitert, unter anderem mit Stördaten (MTBF, MTTR), Kapazitäten, Förderarten, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Zykluszeiten und einfache Förderlogiken. Einige dieser Informationen werden bereits bei der Layouterstellung angelegt. Mittels XML-SST wird aus dem Layout eine zentrale GSL-Datenbank aufgebaut, aus der die Simulationdatenbank befüllt wird, die wiederum um fehlende Informationen zu ergänzen ist. Das Simulationsmodell wird aus VDA-konformen Bausteinen [HM06] aufgebaut. Weiter werden die verwendeten Bausteine in die Statistikerfassung des Simulators eingetragen, um standardisierte Auswertungen fahren zu können. Die dreidimensionale Visualisierung wird direkt über den Simulator aufgebaut.

Ansätze der Modellvalidierung

Die Validierung des Modells wird zwar in Schaubildern erwähnt, allerdings nicht weiter beschrieben.

Werkzeuge

[WAC03] setzt mit *Tricad* der Firma *Venturis IT* in *Microstation* der Firma *Bentley* für das CAD-Layout auf. Die Layout- und Planungsdaten werden in *Microsoft Access* gesammelt, um daraus das Modell in *Quest* zu generieren. [WW08] setzt ebenfalls auf *Microstation* mit der *Tricad*-Erweiterung auf. Diese Daten werden direkt an den Simulator *Quest* übergeben und ggf. manuell parametrisiert. Die Visualisierung erfolgt in dem VR-System *VEO:factory* der *Daimler AG*.

Relevanz für die vorliegende Arbeit

[WAC03] und [WW08] ertüchtigen die GSL-FT mit bereits im Layout erstellten simulationsrelevanten Parametern. Dies ist ein nicht zu unterschätzendes Risiko, da hier die Datenhoheit der simulationsrelevanten Eingangsdaten von dem Simulationsexperten auf den

verantwortlichen Layoutplaner übergeht. Gut ausgearbeitet ist das Konzept einer zentralen GSL-Datenbank, die als Master für die einzelnen Simulationsdatenbanken fungiert. Dank der Verwendung von VDA-konformen Bausteinen ist die Praxistauglichkeit dieses Konzeptes vorhanden.

3.2 Zusammenfassung

Allen diskutierten Arbeiten mit Ausnahme von [ROO09] ist gemeinsam, dass sie die für die Simulation relevanten Eingangsdaten vor dem Modellaufbau in einer Zwischenschicht, beispielsweise in Tabellen oder Datenbanken, sammeln. Der Modellaufbau geschieht dann entweder angestoßen aus der Zwischenschicht (Push-Generierung) oder aus dem Simulator heraus (Pull-Generierung).

Die untersuchten Ansätze lassen sich in zwei unterschiedliche Konzepte einteilen. Einerseits in den von [SPL95], [JEN07], [FRI07] und [SEL05] diskutierten (teil-)automatischen Modellaufbauten werden die Grunddaten aus den Planungssystemen (bzw. BDE-System) übernommen und manuell um die simulationsrelevanten Parameter ergänzt; entweder direkt im Modell oder über eine Zwischenschicht (vgl. Abbildung 3.2). Auf der anderen Seite ist das Konzept eines automatischen Modellaufbaus, das die simulationsrelevanten Eingangsdaten bereits im Planungssystem (bzw. BDE-System) vorhält (vgl. Abbildung 3.3). In den Arbeiten von [WAC03], [WW08] und [ROO09] verschiebt sich die manuelle Ergänzung der Simulationsparameter in das Planungssystem, somit ist ein automatischer Modellaufbau möglich, erfordert aber vom verantwortlichen Planer Simulationswissen und/oder eine enge Verzahnung mit den Simulationsexperten. Da die Simulationswürdigkeit nicht bei jedem Projekt gegeben ist, entsteht Mehrarbeit und wertvolle Kapazitäten werden gebunden.

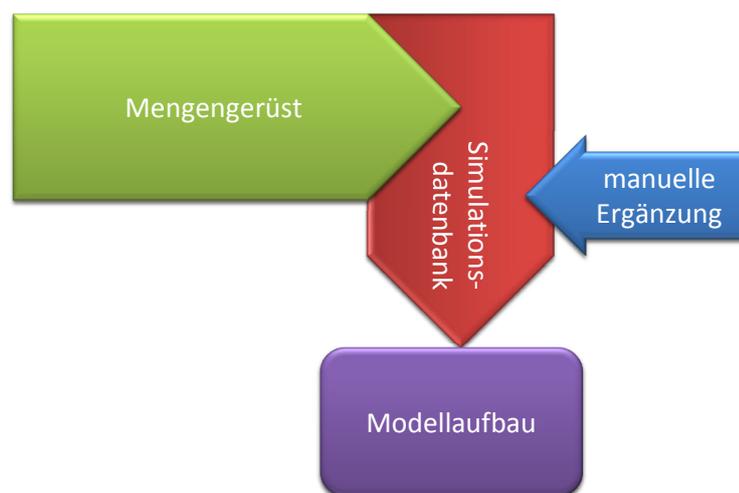


Abbildung 3.2: Vorhandene Ansätze der Modellgenerierung nach [SPL95], [JEN07], [SEL05], [WAC03]

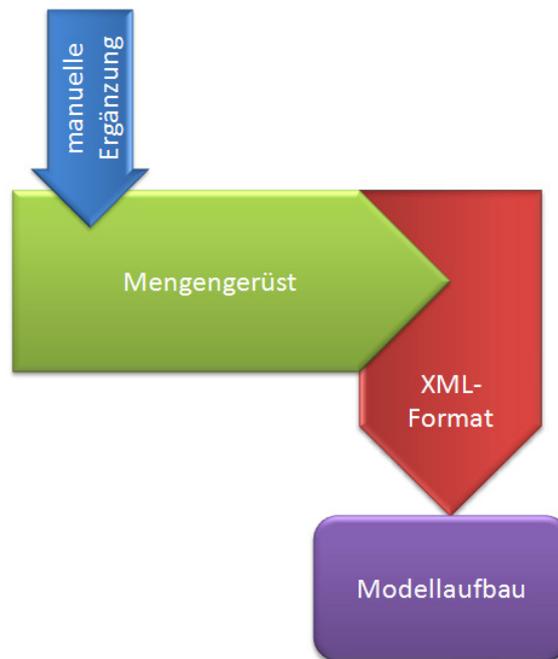


Abbildung 3.3: Vorhandene Ansätze der Modellgenerierung nach [ROO09]

3.3 Abgeleitete Wissenslücke

Bei beiden aufgezeigten Konzepten ist gemeinsam, dass diese einen Modellaufbau über Austauschformate beschreiben. Als Technologie zur Definition der Austauschformate hat sich nach [ROO09] der XML-Standard bewährt. Dank der zunehmenden Verbreitung von Planungs- und BDE-Systemen sind Informationen zunehmend digital verfügbar. Hier kann aus dem Planungssystem ein Großteil der benötigten Eingangsparameter übernommen werden. Dies erspart dem Simulationsexperten Zeit und entlastet zudem auch den Logistikplaner. Allerdings setzen die bisherigen Ansätze nicht früh genug im Planungsprozess an. Bereits bei Projektstart ist zu definieren, ob eine Belieferungssimulation signifikante Vorteile für die digitale Absicherung bieten kann. Wenn das Projekt als simulationswürdig betrachtet wird, ist festzulegen, welche Eingangsdaten ab welchem Zeitpunkt in der benötigten Qualität vorzuliegen haben.

Da sich die Simulation heute als ein anerkanntes Instrument für die Absicherung von Planungsdaten etabliert hat (u.a. nach [WWC08], [RSW08], [BCW03]), ist es den verantwortlichen Simulationsexperten und Logistikplanern möglich, Planungen und Anpassungen exakt zu analysieren und zu bewerten. Die große Menge an unterschiedlichen Eingangsparametern erfordert jedoch ein standardisiertes Konzept, das aus zwei Bestandteilen besteht. Einerseits müssen die relevanten Eingangsdaten definiert werden und ohne großen Aufwand in den Simulator übertragbar sein. Andererseits müssen die Eingangsdaten bereits plausibilisiert vorliegen, um beim Modellaufbau keine weiteren Ressourcen vorhalten zu

müssen. Die Eingangsdaten dürfen keine Inkonsistenzen oder qualitative Defizite haben, da diese direkt auf das Ergebnis der Simulationsstudie durchschlagen, in ungünstigen Fällen jedoch nicht auffallen. Keine der oben diskutierten Arbeiten hat den Fokus auf diesen Bestandteil eines Simulationsprojektes gerichtet noch wurde es bisher ausreichend in der Literatur untersucht.

Auswahlkriterien des eigenen Ansatzes

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz möchte die Lücke zwischen dem automatisierten Modellaufbau und den plausibilisierten Eingangsdaten schließen, um eine Studie für Belieferungssimulationen mit minimalem Aufwand mit hinreichender Qualität jederzeit durchführen zu können. Schematisch ist der Ansatz in Abbildung 3.4 dargestellt.

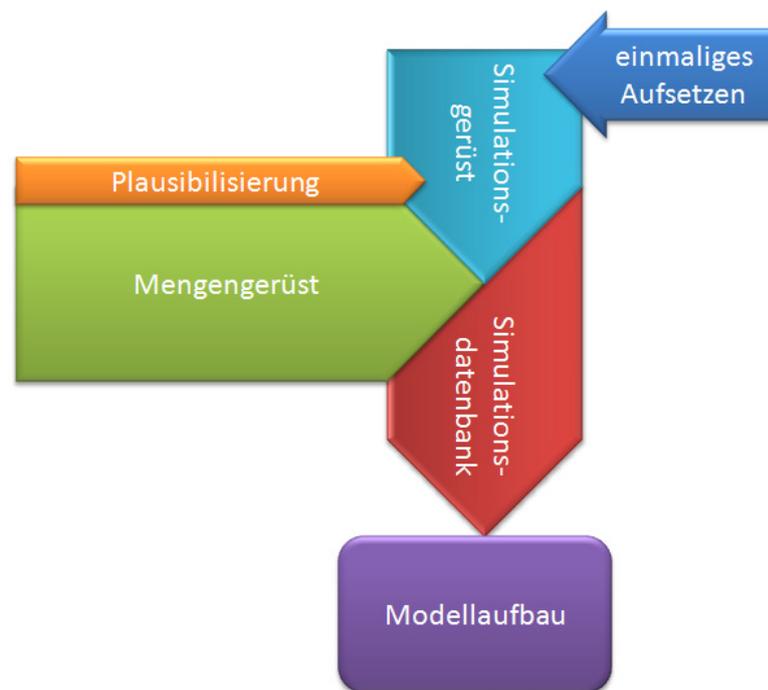


Abbildung 3.4: Modellgenerierung mittels Simulationsgerüst

3.4 Hypothese mit abgeleiteten Forschungsfragen

Die untersuchten Arbeiten von [JEN07], [ROO09], [SEL05], [SPL95], [WAC03] und [ZEN06] beschreiben die Voraussetzungen für einen (teil-)automatisierten Modellaufbau. Diese Arbeiten setzten allerdings nicht früh genug im Modellerstellungsprozess an, die Datenbeschaffung und deren Verifikation werden als vorhandene Eingangsgrößen definiert. Die Datenqualität ist aber für eine Modellgenerierung die relevante Größe für validierte und verifizierte Ergebnisse.

Hypothese

Die frühe Fokussierung auf die unterschiedlichen Eingangsdaten, deren Beschaffung und Verifikation hat das Potential, eine Belieferungssimulation wirtschaftlich zu erstellen und valide Ergebnisse über den gesamten Lebenszyklus zu produzieren. Wirtschaftlich bedeutet in diesem Zusammenhang der rationale Umgang mit der knappen Ressource Zeit, d.h. Entlastung der Mitarbeiter durch eine weitestgehende Automatisierung von Prozessschritten.

Konkret sollen folgende Forschungsfragen untersucht und ihre Umsetzung bewertet werden:

1. Mit welchen Maßnahmen kann eine Belieferungssimulation wirtschaftlich erstellt werden?
2. Wie wirkt die Datenqualität auf den Modellaufbau?
3. Wie kann die Qualität der Eingangsparameter im Vorfeld beeinflusst werden, um Mehraufwand bei der Modellerstellung zu vermeiden?
4. Wie müssen die internen Prozesse verändert werden, um aus Logistiksimulationen den optimalen Nutzen zu ziehen?
5. Wie kann der Wiederverwendungsgrad erhöht werden?
6. Wie lassen sich die notwendigen, betriebsintern vorhandenen Datenquellen automatisiert in Belieferungssimulationen einbinden?
7. Wer ist für die Pflege der Eingangsdaten und der Simulationsläufe verantwortlich?
8. Wie können heterogene Datenbanksysteme (PPR-Daten und Programmplanungsdaten) miteinander in die Simulation integriert werden, ohne Scheingenauigkeiten zu produzieren?

Um die Wissenslücke zu schließen und die Forschungsfragen qualifiziert beantworten zu können, wird im nächsten Kapitel das Lösungskonzept aufgebaut und im Kapitel 5 in der prototypischen Umsetzung auf den Einsatz in der Praxis untersucht.

4 Lösungskonzept

Um den in der Einleitung beschriebenen Herausforderungen zu begegnen muss ein neues Konzept entwickelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Vorgehensmodell erarbeitet und beschrieben. Darüber hinaus werden die notwendigen Voraussetzungen geschaffen, das Lösungskonzept im nächsten Kapitel prototypisch anzuwenden und zu bewerten. Abbildung 4.1 zeigt, dass die Belieferungssimulation aus zwei unterschiedlichen Informationssystemen der Digitalen Fabrik generiert wird. Zum einen wird das digitalisierte Fabriklayout aus dem CAD-System in das Simulationsmodell integriert, auf der anderen Seite die PPR-Daten aus der digitalen Logistikplanung über das Simulationsgerüst auf ihre Plausibilität geprüft und zugeladen. In den folgenden Abschnitten wird die vorgeschlagene Vorgehensweise detailliert erläutert und diskutiert.

Iteratives Vorgehensmodell Erstellung der Belieferungssimulation

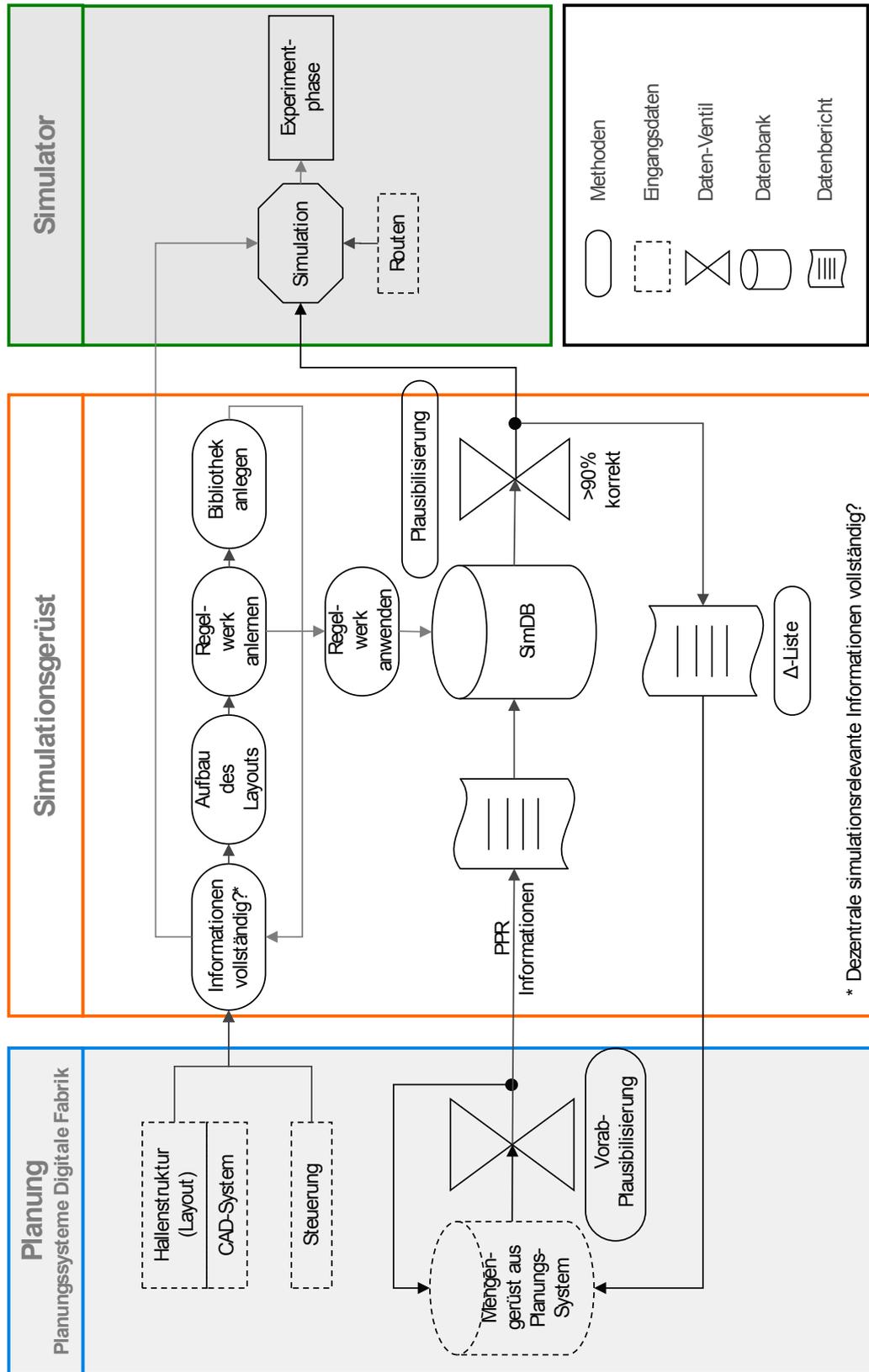


Abbildung 4.1: Vorgehensmodell Modellgenerierung einer Belieferungssimulation

4.1 Design des Simulationsgerüsts

Das Simulationsgerüst wird definiert als Sammlung aller notwendigen Informationen für den Aufbau eines Simulationsmodells. Dazu gehören auf der einen Seite alle aktuellen einsetzbaren Planungsdaten eines Projektes, das Layout und die dezentralen, simulationsrelevanten Daten; andererseits sind Schnittstellen sowohl zur Planungssystem der Digitalen Fabrik wie auch zum eingesetzten Simulator notwendig.

Zweck des Simulationsgerüsts ist die Vorhaltung und Übergabe aller für den kompletten Modellaufbau relevanten Simulationseingangsdaten an den Simulator. Das Simulationsgerüst speichert das für die Belieferungssimulation notwendige Expertenwissen (dezentrale simulationsrelevante Eingangsdaten) während der Initialisierung der ersten Simulationsstudie. Alle nachfolgenden Belieferungssimulationen der gleichen Baureihe unter den gleichen Planungsprämissen können auf dieses Wissen zurückgreifen. Das Simulationsgerüst muss nur bei grundlegenden Änderungen der Planungsprämissen neu angepasst bzw. aufgebaut werden und speichert das Expertenwissen für einen Produktentstehungszyklus. Das Konzept unter der Verwendung des Simulationsgerüsts erstellt einen Regelkreis, in dem die einsetzbaren Informationen des Planungssystems der Digitalen Fabrik tagesaktuell importiert werden können. Damit diese Informationen bei einem Modellaufbau oder erneuten Modellaufbau vollständig vorliegen, sind diese vor jedem Modellaufbau im dem Simulationsgerüst zu prüfen.

Abbildung 4.1 veranschaulicht den grundlegenden Aufbau des Simulationsgerüsts mit der Speicherung des Expertenwissens in einer Bausteinbibliothek. Mit der Unterstützung des Simulationsgerüsts kann der in Kapitel 1.2 aufgezeigter Aufwand der Datenerhebung signifikant reduziert werden, dies ist in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

4.1.1 Übersicht der Simulationsdaten

Die Übersicht über die relevanten Eingangsdaten ist eine der Grundlagen für die Erstellung einer Belieferungssimulation, sie ist das Resultat der Datenanalyse, die in Kapitel 2.8 durchgeführt wurde. Somit können alle für die Belieferungssimulation relevanten Informationen identifiziert werden. Diese Übersicht ist für jedes Belieferungssimulationsprojekt obligatorisch, da hier bereits erste Abschätzungen über Vollständigkeit der Eingangsdaten und über die Informationsqualität möglich sind.

Da jedes Baureihenprojekt andere Anforderungen und Fragestellungen an die Belieferungssimulation haben kann, variiert auch der Bedarf an Eingangsdaten. Daher ist für jedes Baureihenprojekt zumindest einmalig im Produktionsplanungsprozess eine Übersicht über die benötigten Eingangsdaten zu erstellen, um eine belastbare Planungsabsicherung zu garantieren. Die Belastbarkeit entsteht durch eine transparente Aufbereitung der Plandaten für die Simulation und gleichzeitig der Plausibilisierung der Eingangsdaten zusammen mit den verantwortlichen Planern.

Die Übersicht ist ein Werkzeug für die Simulationsexperten, um gegenüber den Auftraggebern und den Betreibern des Produktionsplanungssystems den benötigten Informationsbedarf zu formulieren, aber gleichzeitig auch notwendig für die transparente Verifikation und Validierung des Simulationsmodells. Diese Übersicht über die Simulationsdaten legt die Datengrundlage für das Lösungskonzept.

4.1.1.1 Gewichtung der Eingangsdaten

Die in der Datenanalyse identifizierten simulationsrelevanten Planungsdaten werden auf ihre Abhängigkeiten untereinander untersucht. Hierbei wird geprüft, welche Daten in welcher Quantität benötigt werden, die höchste Änderungshäufigkeit und die größte Ergebnisrelevanz haben (vgl. Abbildung 2.25).

In der Analyse von [ROO09] sind vor allem die Prozessdaten sowohl von der Änderungshäufigkeit, der Datenmenge sowie von der Ergebnisrelevanz besonders betroffen. Diese Analyse ist für die vorliegende Arbeit von Bedeutung, da die Änderungshäufigkeit ein Indiz für den steigenden Reifegrad im Produktentstehungsprozess ist. Die Änderungshäufigkeit ist demnach abhängig von anderen innerbetrieblichen Planungsinstanzen wie beispielsweise von der Montageplanung. Darüber hinaus besitzen die Prozessdaten eine besondere Relevanz für das Planungsergebnis, da die Prozessdaten sowohl mit den Produkt- als auch mit den Ressourcendaten verknüpft sind. Die Anforderungen an die Prozessdaten für Belieferungssimulationen sind hoch: erstens müssen diese korrekt und vollständig geplant werden, zweitens müssen diese auf dem aktuellen Planungsstand sein und letztlich auch korrekt und vollständig über die Schnittstelle in den Simulator übertragen werden. Dies ist mittels der begleitenden Validierung und Verifikation permanent zu beobachten.

4.1.1.2 Identifikation der benötigten Ausprägungen mittels Morphologischem Kasten

Die Identifikation der Freiheitsgrade eines bestimmten Themenfeldes bestimmt nach [KOE07] und [HOM07b] die maximal möglichen Ausprägungen. Als Methode wird hierbei auf den morphologischen Kasten zurückgegriffen (vgl. Abbildung 4.2). Die Anwendung verfolgt zwei Ziele: einerseits werden die in der Datenanalyse identifizierten Daten mit ihren Freiheitsgraden um die entsprechenden Ausprägungen ergänzt; andererseits werden hiermit die Anforderungen an das Logistikmodul definiert, welches sämtliche Kombinationen der Ausprägung der Freiheitsgrade im Simulationsmodell unterstützen muss.

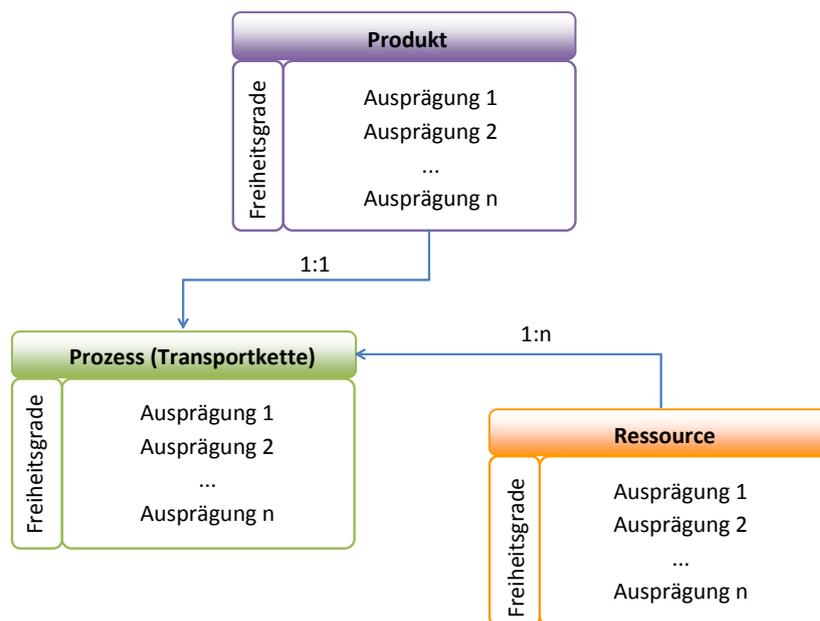


Abbildung 4.2: Produkt, Prozess und Ressourcensicht mit Freiheitsgraden

4.1.1.3 Informationsqualität

Um die simulationsrelevanten Daten aus dem Produktionsplanungssystem vor einem Modellaufbau auf Vollständigkeit und eventuelle Inkonsistenzen zu prüfen, werden im Rahmen dieser Arbeit voneinander unabhängige Methoden entwickelt, um die Informationsqualität qualifiziert zu bewerten. Damit kann sichergestellt werden, dass die Datengrundlage des Simulationsmodells plausibel ist. Methoden, die die Vollständigkeit prüfen sind eine Grundvoraussetzung für die Simulationsstudie, da nur bei kompletter Betrachtung das Zusammenspiel der einzelnen Faktoren bewertet werden kann. Zudem kann das Simulationsgerüst keine Parametrierung vornehmen, wenn einzelne Elemente der Transportkette nicht vorhanden sind. Alternativ wird im folgenden Kapitel ein Regelwerk aufgebaut, welches die fehlenden Daten erschließt (vgl. Kapitel 4.1.1.4). Methoden, die die Korrektheit untersuchen, haben zwar keinen direkten Einfluss auf den Aufbau des Simulationsgerüsts, dafür aber auf die Ergebnisse der Simulationsstudie und sind ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit. Nach erfolgreicher Prüfung der Plausibilität werden die Daten für die Simulation freigegeben, bei eventuellen Auffälligkeiten wird der entsprechende Datensatz markiert und der verantwortliche Planer informiert.

4.1.1.4 Ergänzung der Planungsdaten in der frühen Planungsphase

Da zu Beginn des Planungsprozesses noch nicht alle simulationsrelevanten Informationen vorliegen, müssen die fehlenden simulationsrelevanten Daten ergänzt werden. Dies erfolgt mittels vorab definierter Regeln, die das Mengengerüst mit den erforderlichen Informationen anreichern. Sollte noch kein Regelwerk zur Ermittlung fehlender Informationen angelehrt worden sein, so wird dieses einmalig pro Baureihenprojekt aufgesetzt, vgl. hierzu Kapitel 4.1. Wenn das Regelwerk bereits aufgebaut wurde, so können die Planungsdaten mit den fehlenden dynamischen Daten ergänzt werden. Hierbei ist zu beachten, dass die errechneten Informationen gegebenenfalls Scheingenau sind, da das Regelwerk keinesfalls planerisches Wissen ersetzen

kann. Um trotzdem belastbare Aussagen generieren zu können, sind die Ergebnisse der Simulation in definierten Konfidenzintervallen auszugeben, vgl. hierzu auch Kapitel 2.7. Nachdem die bisher errechneten Daten ausgeplant wurden, ist in einem Simulationsszenario zu prüfen, wie groß die Abweichungen sind, um so Erfahrungswerte für weitere Baureihenprojekte zu haben bzw. das Regelwerk neu zu justieren.

4.1.2 Abbildung der Hallenstruktur in das Simulationswerkzeug

Das Layout der Montagehalle bietet die Grundlage für die Visualisierung des Materialflusses. Alle für den physischen Materialfluss relevanten Objekte werden erfasst, um die geplante Wirklichkeit im Simulationsmodell akkurat abbilden zu können. Dazu gehören die Wareneingänge (Quelle), die Umschlagslager (Senke, Quelle), die Bereitstellorte (Senke, Quelle) sowie die Warenausgänge (Senke). Weiter sind die Fahrwege mit Kreuzungen relevant, auf denen die FFZ verkehren und Entscheidungen auf Grund ihrer Vorgaben (z.B.: Leergut steuert Vollgut) treffen können. Der Aufbau orientiert sich an der iterativen Detailplanung in der Logistik (vgl. Kapitel 2.2), in der erst die montagerelevanten Flächen identifiziert werden. Im zweiten Schritt werden die einzelnen Logistikstationen (Übergabefläche, Bereitstellorte) sowie die verwendbaren Fahrwege und Knotenpunkte ausgearbeitet. Diese Informationen werden in den Simulator mit den identischen Bezeichnungen übertragen, damit es bei der automatischen Parametrisierung zu keinen Inkonsistenzen kommt und um die Durchgängigkeit sicherzustellen. Die Übernahme des Montagelayouts erfolgt maßstabsgetreu.

Eine weitere Möglichkeit der automatischen Übernahme des Fabriklayouts bietet die Generische Simulationslösung Logistik (GSL-L), welche [ROO09] aufzeigt. [ROO09] implementiert Zusatzinformationen in die Layoutobjekte, welche der Simulator interpretieren kann und das für die Materialflüsse relevante Layout übertragen. Dies setzt voraus, dass der der Layoutzeichner diese notwendigen Informationen ermitteln kann und ein Hallenlayouts system vorhanden ist, in welchem die benötigten Informationen in den Objekten wie Logistikstationen und Fahrwegen gespeichert werden können. Zum Zeitpunkt dieser Untersuchung funktionierte das Konzept nach [ROO09] für eine ausgewählte Testanwendung, ein flächendeckender Einsatz in der Logistikplanung ist noch nicht möglich.

4.1.3 Initialisierung des Simulationsgerüsts

PPR-Daten (Transportketten)

Die Transportketten werden in Kapitel 2.8 den einsetzbaren Daten der Digitalen Fabrik zugeordnet. Zusätzlich müssen für die Belieferungssimulation diese Transportketten noch um Informationen ergänzt werden, die für die Dynamik im Simulationsmodell relevant sind. Durch die unterschiedlichen Sichtweisen von Logistikplanung und Belieferungssimulation (vgl. Abbildung 2.23) werden in der Logistikplanung keine Störungsprofile (Verfügbarkeit, MTBF, MTTR) erfasst und der Belieferungssimulation zur Verfügung gestellt. Daher müssen diese notwendigen Informationen als Expertenwissen in das Simulationsgerüst implementiert werden, damit diese dem Simulationsmodell zugänglich gemacht werden können.

Ein weiteres Beispiel ist die Festlegung der Wareneingangszeiten für jedes Bauteil in den Produktdaten. Die genaue Austaktung kann erst erfolgen, wenn der Lieferant ausgewählt wurde und sein Anlieferverhalten mit den Wareneingangszeiten definiert ist. Dies geschieht in der Regel sehr spät im Planungsprozess. Daher müssen auf der Grundlage von Erfahrungswerten für jedes Produkt die Anlieferzeiten im Simulationsgerüst ergänzt werden. Diese können dank des Simulationsgerüsts mehrfach verwendet werden, bis die realen Informationen über die Wareneingangszeiten und Belegung verfügbar sind (vgl. Kapitel 4.1.1.4). Eine gute Näherung ist die Übernahme der Informationen der Vorgängerbaureihen, da hier bereits belastbare Daten vorliegen. Trotzdem muss diese Ergänzung dokumentiert werden, die Ergebnisse sind wegen möglicher Scheingenauigkeiten in Konfidenzintervallen auszugeben. Interessant, aber nicht im Betrachtungsumfang der Arbeit, wäre die Anbindung der Logistik-Disposition, um die Anlieferungsplanung im Simulationsgerüst zu ergänzen.

Simulationsparameter (dynamische Parameter)

Unter Simulationsparametern werden die Variablen verstanden, die während der Experimentphase variiert werden können und Einfluss auf das Ergebnis haben. Als Beispiel aufzuführen sind die Anzahl der geplanten Transportmittel oder der Routenverlauf der Routenzüge. In der Experimentphase können diese Simulationsparameter variiert werden, um weitere Experimente und Szenarien durchführen zu können und die Sensitivitäten zu bestimmen. Um den Startraum festzusetzen lassen sich beispielsweise Erfahrungswerte aus Vorgänger- oder Referenzbaureihen ableiten. Die Routenverläufe werden im Simulationsgerüst abgebildet. Eine Optimierung der Routenverläufe mit Methoden des Operation Research (Travelling-Salesman-Problem, Transportproblem), beispielsweise nach der Methode von [DN09], ermittelt werden.

Planungsprämissen

Zu den Planungsprämissen gehören die übergeordneten Rahmenbedingungen, die am Anfang eines Logistikplanungsprozesses getroffen werden. Dabei handelt es sich um die Vorgabe definierter Prozessstandards, verabschiedeter Standardprozesse sowie logistischer Grundsatzentscheidungen wie ziehende oder drückende Logistikversorgung, Leer-vor-Voll oder Voll-vor-Leer-Versorgungen sowie neue Sicherheitskonzepte in der Logistik wie eine staplerlose Versorgung. Dieses Wissen wird im Simulationsgerüst in vordefinierten Tabellen gespeichert und dem Simulator durch Bibliotheksbausteine nutzbar gemacht. Diese Prozesse sind im Simulationsmodell akkurat abzubilden, um im Simulationsmodell eine hohe Transparenz und damit Glaubwürdigkeit zu erreichen.

Modellprämissen

Zu den Modellprämissen gehören die Vorlaufzeit (das Einschwingen des Modells), die Erstbefüllung und das Verhalten des Modells bei Unterversorgung am Band. Die Vorlaufzeit wird verwendet, das Modell initial zu befüllen und einen eingeschwungenen Zustand zu erreichen. Idealerweise ist die Vorlaufzeit so zu wählen, dass alle Prozesse mindestens zweimal vollständig ablaufen konnten. Eine Erstbefüllung ist für gewisse Low-Runner-Varianten sinnvoll, die in nur langen Intervallen versorgt werden und damit nicht innerhalb der Vorlaufzeit auf einen eingeschwungenen Zustand gebracht werden. Alternativ ist die Vorlaufzeit so zu bestimmen, dass auch die Low-Runner-Varianten mindestens zweimalig

versorgt werden können, bevor der definierte Beobachtungszeitraum beginnt. Damit diese Prozesse richtig abgebildet werden können, ist eine Erstbefüllung notwendig.

Auch das Verhalten bei einer Unterversorgung am Bereitstellort gehört zu den Modellprämissen. Dadurch kann entschieden werden, wie sich das Modell bei einem Bestandsabriss verhält. Wenn die Prämisse vorgibt, dass bei einem Bestandsabriss das komplette Montageband anzuhalten ist, so hat dies direkte Auswirkungen auf die Logistik. Die Montage braucht für die Zeit des Bandstillstandes keine weiteren Bauteile, es entstehen direkte Wechselwirkungen mit allen beteiligten Logistikversorgungen in diesem Bereich. Wenn die Prämisse negative Bestände an Bändern erlaubt, entspricht dies nicht einem realen Verhalten. Damit kann beurteilt werden, ob es sich um kurze, temporäre Bestandsabrisse handelt oder ob eine lange Störung innerhalb der Versorgungskette vorliegt. Da dies keine Auswirkungen auf die anderen Stationen am gleichen Band hat, können Kettenreaktionen auf Grund der Unterversorgung vermieden werden, um gezielt den Versorgungsprozess zu analysieren.

4.1.3.1 Implementierung von Expertenwissen

Da das benötigte dezentrale Wissen nicht digital verwendbar vorliegt, ist es notwendig, dass der Simulationsexperte sich die benötigten Informationen beschafft. Eine der Möglichkeiten ist die Befragung von Gesprächspartnern der Logistik- und Montageplanung. Für eine Speicherung und Wiederverwendung der Informationen ist für das Simulationsgerüst die Anwendung eines Regelwerkes auszuarbeiten, um dieses Expertenwissen für das Simulationsgerüst nutzbar zu machen. In den Arbeiten von [GR08] und [RG06] wird Semantik als Lösung vorgeschlagen. Die Autoren bezeichnen ihren Ansatz als Semantik-Web-Framework, welches das Wissen in einer Manufacturing-Knowledge-Base speichert und mit einem Regelwerk angelernt werden kann, um Daten für eine Simulation zu ergänzen. Die Idee dieses Konzepts für Produktionssimulationen wird im Folgenden auf die Belieferungssimulation mit ihren spezifischen Eigenschaften adaptiert:

Lernphase:

In der Lernphase wird das gesammelte dezentrale Wissen mit Regeln zentral im Simulationsgerüst erfasst und strukturiert abgelegt. Somit kann das Wissen wiederkehrend verwendet werden (vgl. Abbildung 4.3). Die Regeln werden vorab mit den verantwortlichen Planern definiert, erarbeitet und plausibilisiert. Durch die Nutzung von errechneten Daten ist hier die Plausibilisierung von zentraler Bedeutung. Eine enge Abstimmung von Logistikplaner und Simulationsexperten ist erforderlich.

Anwendungsphase:

Die Anwendung des Regelwerkes erfolgt innerhalb des zentralen Netzwerkes. Durch die Anwendung des Regelwerkes werden die Simulationseingangsdaten vervollständigt, sofern dies nicht vom zuständigen Logistikplaner mit den realen Plandaten überschrieben wird. Da die Belieferungssimulation planungsbegleitend durchgeführt wird, sind die einmalig erhobenen Daten bei jeder Iteration der Simulationsstudie erneut verfügbar zu machen. Die aufwändige Erhebung der nicht in dem Planungssystem der Digitalen Fabrik vorhandenen Informationen fällt für weitere Modellgenerierungen weg. Das gespeicherte Expertenwissen wird zentral

abgerufen und kann bei Änderungen der Planungs- und Modellprämissen transparent an die neue Situation angepasst werden.

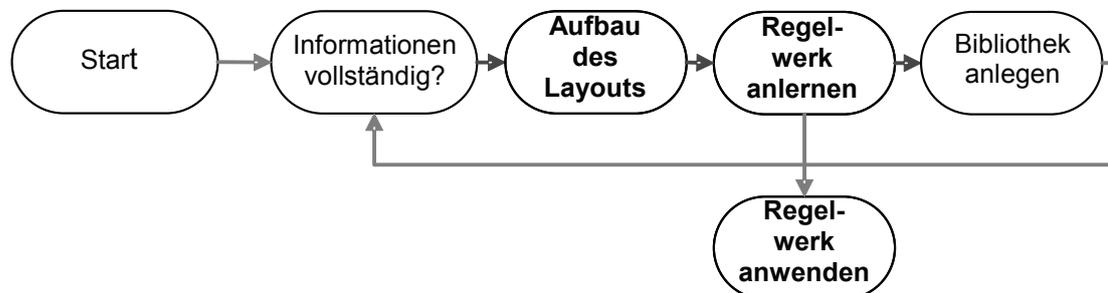


Abbildung 4.3: Vorgehensmodell Abbildung von Expertenwissen

In den folgenden Absätzen werden Kategorien der dezentralen Informationen identifiziert und aufgezeigt, wie diese das Simulationsgerüst ergänzen. Weiter werden diese Kategorien mit konkreten Beispielen in Abbildung 4.4 verdeutlicht.

Eingangsdaten	Simulationsgerüst	
Kategorie	Vervollständigung	Beispiel
Einsetzbare Daten (Transportketten)	Dynamische Attribute	- Verfügbarkeiten - Wareneinangszeiten
Experimentparameter	Startwerte	- Anzahl Transportmittel - Routenverlauf
Planungsprämissen	Planungsgrundsätze	- Strategien (VvL, LvV) - Steuerungen

Abbildung 4.4: Vervollständigung der simulationsrelevanten Daten

4.1.3.2 Aufbau der Klassenstruktur im Simulator

Damit der Simulator die Informationen aus dem Simulationsgerüst verarbeiten kann, ist eine Klassenstruktur im Simulator aufzubauen. Diese Klassenstruktur fungiert als Bindeglied zwischen dem Simulationsgerüst und dem Simulator. Sie ist als unvollständig zu bewerten, wenn mit den vorhandenen Methoden und Attributen nicht alle Eventualitäten der morphologischen Kästen im Simulationsmodell abgebildet werden können.

Der Aufbau einer Klassenstruktur im Simulator wird über das Logistikmodul gesteuert. Die Aufgabe des Logistikmoduls im Simulator ist die standardisierte Anbindung des Simulationsgerüsts und die automatische Parametrierung des Simulationsmodells.

Zur Unterstützung des Simulationsexperten bei der Modellierung wird auf das Konzept der Simulationsbausteine bzw. des Bausteinkastens zurückgegriffen. Unter einem Baustein wird in Anlehnung an die objektorientierte Programmierung eine Klasse verstanden, die über eigene Methoden, Attribute und Beziehungen zu anderen Objekten verfügt. Ein Bausteinkasten fasst sämtliche thematisch vergleichbaren Bausteine zusammen.

Im Folgenden wird der Bausteinkasten *Logistikmodul* entwickelt, in welchem sämtliche Anforderungen an eine Belieferungssimulation abgedeckt werden. Diese Bausteine werden mit einer Logik programmiert, die bei der Initialisierung des Modells eigenständig die Informationen aus dem Simulationsgerüst laden und sich mit den aktuellen Planungsdaten parametrisieren. Die eigenständige Parametrisierung ist eine Abwandlung der automatischen Modellgenerierungslogik des Simulators: durch die Definition eigener Bausteine im Logistikmodul werden nur die Daten übertragen, die für den Modellaufbau und die Simulationsläufe relevant sind. Dadurch kommt es nicht zu Überschneidungen bzw. Unterdeckungen von Informationen; der Modellaufbau ist transparent und vollständig.

Im Simulator ändert sich die Sichtweise. Statt der Produkt- und Prozesssicht wird nun die Ressourcensicht relevant. Die Klassen orientieren sich an den Ressourcen, welche in der Analyse der Eingangsdaten der Belieferungssimulation identifiziert wurden. Das Abrufverhalten des Produktes ist beispielsweise im Bereitstellort hinterlegt, hier wird der Bestand an Bauteilen verwaltet und beim Erreichen des Meldebestandes die Nachbestellungen veranlasst. Auch in den Methoden der Ressourcenbausteine werden Prozessinformationen implementiert. Beispielsweise erhalten die Ressourcen Flurförderzeuge Informationen über mögliche Transportwege und Transportentscheidungen, Logistikstationen werden Regeln über den Informationsfluss wie das Nachbestellungsverhalten implementiert.

Die für eine Belieferungssimulation relevanten Klassen sind:

Logistikstationen

Die Klasse der Logistikstationen beinhaltet hauptsächlich die Lagerverwaltung. Dazu gehören die Parameter aktueller Inhalt, maximales Volumen der Station und der Meldebestand. Weiter werden Methoden zum Materialhandling (Einlagerung, Auslagerung) sowie Methoden für den Informationsfluss entwickelt. Folgende Logistikstationsklassen werden verwendet:

- Wareneingang (Quelle)
- Bereitstellort
- Kommissionierfläche
- Lager (Supermarkt, AKL, JIT-Lager, JIS-Lager)
- Warenausgang (Senke)

Flurförderzeuge

Die Klasse der Flurförderzeuge beinhaltet die technischen und logistischen Parameter der Fahrzeuge. Dazu gehören die Durchschnittsgeschwindigkeit im beladenen und unbeladenen Zustand, das durchschnittliche und das maximale Ladevolumen und die Anzahl von möglichen Anhängern. Zudem sind dynamische Parameter wie der aktuelle Ladungsträgerinhalt und das nächste Ziel hinterlegt. Folgende Flurförderzeugklassen werden verwendet:

- Routenzug (Milkrun)
- Stapler (Direktverkehr)

Infrastruktur

Die Klassen der Infrastruktur werden bereits mit der Übernahme des Layouts in den Simulator überführt. Um den Verkehr zu steuern werden in Kreuzungen (vgl. Abbildung 4.5), Übergabepunkten zu Logistikstationen und Hebern Klassen bereitgestellt. Folgende Infrastrukturklassen werden eingesetzt:

- Wege (Einbahn, Gegenbahn, Überholmöglichkeit)
- Kreuzungen
- Heber
- Übergabepunkt zu Logistikstation

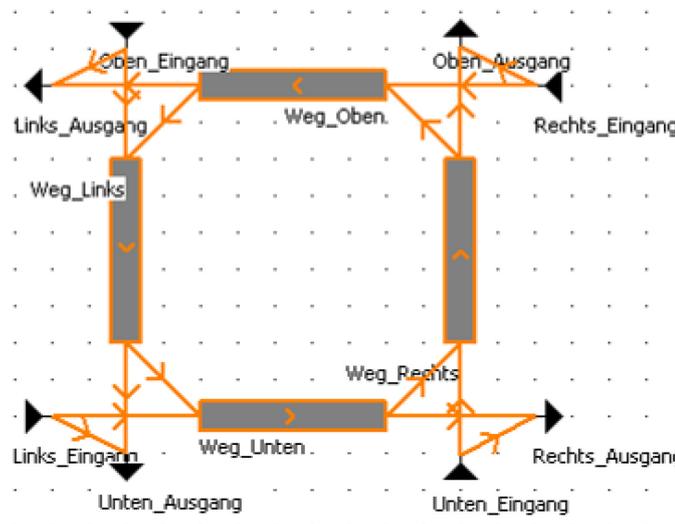


Abbildung 4.5: Modellierung einer Kreuzung in *PlantSimulation*

Ladungsträger

Die Klasse der Ladungsträger enthält Informationen über Inhalt, Größe und das Volumen. Dadurch können Berechnungen zu Reichweiten in Verbindung mit der Verbrauchsrate durchgeführt werden, aber auch die Ermittlung der maximalen Anzahl LTs pro FFZ sowie die Lagerkapazität in Stück.

4.1.4 Filterklassen als Methode zur Plausibilisierung

Der Anspruch dieser Arbeit ist es, an die Belieferungssimulation nur plausibilisierte Transportketten zu übergeben. Daher werden in dieser Arbeit für die betrachteten Qualitätsmerkmale (Vollständigkeit und Korrektheit) unabhängige Filterklassen entwickelt, um die Transportketten qualifiziert zu bewerten. Eine Filterklasse ist definiert als eine Methode, mit der ein Datensatz automatisiert auf seine Vollständigkeit oder auf seine Korrektheit überprüft werden kann. Durch die Kombination mehrerer Filterklassen erhöht sich die Aussagekraft der Plausibilisierung.

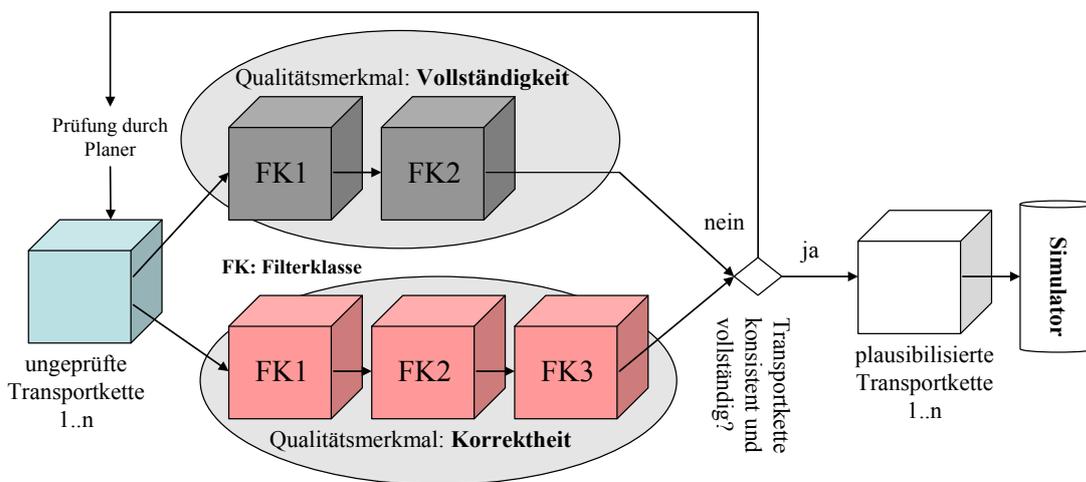


Abbildung 4.6: Ablaufdiagramm Plausibilisierung von Transportketten

Ein standardisiertes Vorgehen (vgl. Abbildung 4.6) unterstützt die Beteiligten bei der systematischen Verwendung. Je unterschiedlicher die einzelnen Methoden der Filterklassen ausgelegt sind, desto größer ist die Möglichkeit, Inkonsistenzen und mangelnde Vollständigkeit zu finden und diese zur Überarbeitung freizugeben. Eine Abfrage steuert für jede Transportkette am Ende jeder Iteration, ob die Qualitätsmerkmale Vollständigkeit und Korrektheit erfolgreich überprüft werden konnten. Wenn diese Prüfung negativ ausfällt, wird dies an den Planer in einer Deltaliste (Unterschiede zwischen geplanten und plausibilisierten Datensätzen) zurückgemeldet, um die entsprechenden Korrekturen vorzunehmen. Bei einer positiven Prüfung kann der Datensatz für die Belieferungssimulation verwendet werden. Tabelle 4.1 zeigt exemplarisch eine Übersicht der einsetzbaren Filterklassen im Bezug zu der jeweiligen Fragestellung.

Untersuchungs- Objekt	Sicht	Sensitivität nach [ROO09], vgl. Abbildung 2.25	Qualitäts- merkmal	Beispiel- Fragestellung	Filterklasse
Transportkette	Produkt- sicht	Menge: ++ Risiko: ++ Änderungen: ++	Vollständigkeit	Ist ein Produkt vorhanden?	Referenz- datenbank, Komplementäre Systeme
			Korrektheit	Ist der Belieferungs- prozess richtig?	Referenz- datenbank, Komplementäre Systeme, EBS-Analyse
	Prozess- sicht	Menge: ++ Risiko: +++ Änderungen: +++	Vollständigkeit	Ist die Transportkette vollständig?	Referenz- datenbank, Komplementäre Systeme
			Korrektheit	Ist die Transportkette richtig verknüpft?	Referenz- datenbank, Komplementäre Systeme
	Ressourcen- sicht	Menge: ++ Risiko: ++ Änderungen: ++	Vollständigkeit	Ist der Ladungsträger verknüpft?	Referenz- datenbank, Komplementäre Systeme
			Korrektheit	Ist der Ladungsträger- inhalt richtig?	Referenz- datenbank, Komplementäre Systeme, EBS-Analyse

Tabelle 4.1: Übersicht der Filterklassen

4.1.5 Qualitätsmerkmal Vollständigkeit

Die für die Simulation benötigten vollständig parametrisierten Transportketten können in Bezug auf fünf verschiedene Ausprägungen unvollständig sein: fehlende Prozessverknüpfung, fehlende Ressourcendaten wie Flurförderzeuge oder Ladungsträger, fehlende Ladungsträgerinhalte, fehlende Logistikstationen sowie eine Abweichung von Logistikstationen im Prozess und im Layout. Diese unvollständigen Informationen in Prozess- und Ressourcendaten können über die Filterklasse „Referenzdatenbank“ oder über die Filterklasse „komplementäre Werkzeuge“ geprüft werden, welche in den folgenden Kapiteln beschrieben werden. Komplementarität steht hier für die Zusammengehörigkeit unabhängiger, aber sich ergänzender Werkzeuge, die auf dem Mengengerüst aufsetzen. Sollte eine dieser Inkonsistenzen aus einem vorgelagerten System übernommen worden sein, so sind über einen Workflow die entsprechenden Beteiligten zu informieren. Mit einem vollständig parametrisierten Mengengerüst ist die Voraussetzung

geschaffen, alle relevanten Eingangsdaten an den Simulator zu übergeben. Inhaltliche und qualitative Aussagen können allerdings nicht bewertet werden, hierfür wird ein Ansatz im nächsten Kapitel vorgestellt.

Das Parametrieren von Transportketten auf der Grundlage von Standardprozessen unterstützt nachhaltig das Erkennen von Fehlern im Vorfeld [ROO09]. Dies beinhaltet:

- Die Prüfung der Planungsobjekte hinsichtlich Sequenz und Vollständigkeit
- Die komplette Zuordnung von Ressource und Produkt
- Überprüfung, ob die Logistikstationen für die ausgewählten Transportmittel erreichbar sind

4.1.6 Qualitätsmerkmal Korrektheit

Im Planungssystem der Digitalen Fabrik können bisher ausschließlich Vollständigkeitsprüfungen durchgeführt werden. Aussagen, welche die Korrektheit der einzelnen Datensätze bestätigen, werden bisher nicht überprüft. Hier sind folgende Fragestellungen interessant:

- Sind die Logistikstationen richtig verknüpft?
- Sind die Stammdaten richtig?
- Sind die Ladungsträgerinhalte richtig?
- Sind die Logistikstationen richtig?

Für Belieferungssimulationen lassen sich miteinander kombinierbare Methoden zur Prüfung der Korrektheit identifizieren: die Kopplung einer Referenzdatenbank, die Nutzung vorgelagerter, komplementärer Werkzeuge und zusätzlich die Entscheidungsbaum-Schwellwertanalyse (EBS-Analyse). Das Qualitätsmerkmal „Korrektheit“ setzt auf dem Expertenwissen des Logistikplaners auf und entscheidet selbstständig, ob der untersuchte Datensatz inhaltlich korrekt sein kann. Um die Korrektheit von Daten prüfen zu können, sind Referenzen notwendig, diese werden in den Planungssystemen der Digitalen Fabrik identifiziert und nutzbar gemacht.

4.2 Entwicklung von methodisch unabhängigen Filterklassen

Um den Anforderungen der Qualitätsmerkmale „Vollständigkeit“ und „Korrektheit“ gerecht zu werden und die gespeicherten Informationen umfassend zu prüfen, müssen methodisch unabhängige Filterklassen entwickelt werden. Eine Filterklasse ist als Methode definiert, mit welcher selbstständig automatisiert Qualitätsprüfungen durchgeführt werden können. Das Zusammenspiel mehrerer methodisch unabhängiger Filterklassen ermöglicht eine komplementäre Bewertung und verbessert das Auffinden inkorrekt und unvollständiger Datensätze.

4.2.1 Filterklasse „Referenzdatenbank“

Die Nutzung von bereits vorhandenen Referenzdatenbanken bietet eine ideale Ausgangssituation für eine Plausibilisierung der Transportketten (Produkt-, Prozess- und Ressourceninformationen): Beispielsweise können Informationen aus dem Mengengerüst der Vorgängerbaureihe (vertikal referenzierte Baureihe), oder aus anderen aktuellen Baureihen mit Gleichteilen – und gleichen Prozessen (horizontal referenzierte Baureihe) referenziert werden, vgl. Abbildung 4.7. Ein Großteil der Bauteile eines Fahrzeuges wird im Rahmen einer Plattform- und Modulstrategie, teilweise mit Detailänderungen, für weitere Baureihen verwendet. Auch ist die zunehmende Modularisierung in der Automobilindustrie hilfreich, identische Module von horizontal referenzierten Baureihen miteinander abzugleichen.

In der Filterklasse „Referenzdatenbank“ wird die Transportkette mit horizontal- und vertikal referenzierten Baureihen verglichen. Dies beruht auf der Annahme, dass die gleichen Bauteile auch die identischen Prozesse mit den identischen Ressourcen in den unterschiedlichen Baureihen haben. Eventuelle Abweichungen außerhalb einer definierten Toleranz werden zurückgemeldet. Somit kann die Qualität der Planung nach einem Initialaufwand ohne weiteren operativen Mehraufwand sichergestellt werden. Zeitaufwändige Fehlersuche oder sogar falsche Auswertungen können zwar reduziert, allerdings auch nicht ausgeschlossen werden. Durch eine relationale Datenbankabfrage ist die Implementierung generisch und muss nicht auf spezifische Baureihen angepasst werden. Die Referenzdatenbank ist anwendbar auf die meisten Attribute einer Transportkette (vgl. Abbildung 2.21).

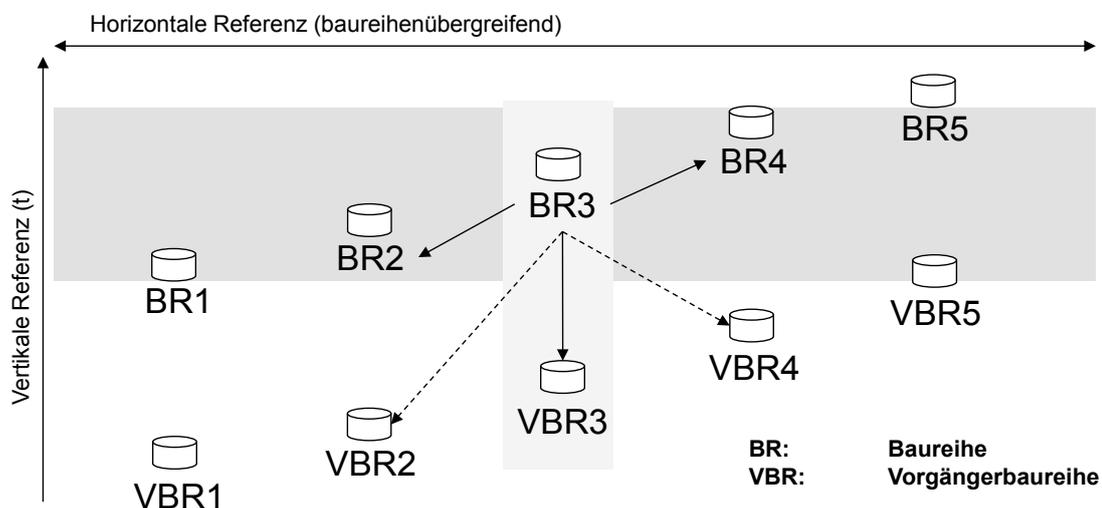


Abbildung 4.7: Referenzbaureihen

4.2.2 Filterklasse „komplementäre Werkzeuge“

Eine Belieferungssimulation setzt erst spät im Planungsprozess ein, meist nachdem die Bereitstellorte von der Montageplanung festgelegt und ausgetaktet sind. Zuvor arbeiten weitere Werkzeuge auf dem Mengengerüst des Planungssystems, beispielsweise Programme zur Verknüpfung von Prozesslogistikstationen mit den tatsächlichen im Layout zugeordneten

Logistikstationen oder Programme zur Festlegung und Optimierung von Versorgungsrouten (vgl. Abbildung 4.8). Auch Auswertungen zu bestimmten Meilensteinen sowie Kostenabschätzungen greifen bereits früh im Planungsprozess auf die Planungsdaten im Mengengerüst zu. Diese Programme und Auswertungen setzen ein plausibles Mengengerüst voraus, da unter anderem Investitionsentscheidungen und Lieferantenvergaben direkt hiervon abhängen.

Sollten Änderungen von Informationen auf Grund der Reifegradentwicklung bzw. Korrekturen direkt im komplementären Werkzeug erfolgen, so kann dieses Wissen für die Belieferungssimulation nutzbar gemacht werden. Mit dem Hinzufügen eines Attributes in dem komplementären Werkzeug werden Änderungen und Korrekturen markiert. Diese Markierung zeigt anderen Systemen, welche auf die gleichen Plandaten zugreifen an, dass diese Daten bereits von den zuständigen Planern gesichtet - und korrigiert worden sind. Voraussetzung ist, dass das Mengengerüst das Plausibilisierungsattribut in das Mengengerüst überträgt. Da die Belieferungssimulation spät im Produktplanungsprozess das Mengengerüst verwendet, ist eine Vorabplausibilisierung (Prozess-, Ressourceninformationen) bereits für einen Großteil der Eingangsdaten erfolgt, sofern die vorgelagerten Werkzeuge systematisch eingebunden sind (vgl. Tabelle 4.2). Der Mehrwert an diesem Verfahren ist, dass zu einem früheren Zeitpunkt eine höhere Planungsqualität vorliegt, aber auch eine Zeitersparnis bei der Plausibilisierung und eine erhöhte Planungstransparenz. Voraussetzung ist das Kennen des Plausibilisierungsprozesses und die Kennzeichnung der plausibilisierten Datensätze mit dem Hinweis, welches System diese Daten bereits untersucht und ggf. korrigiert hat.

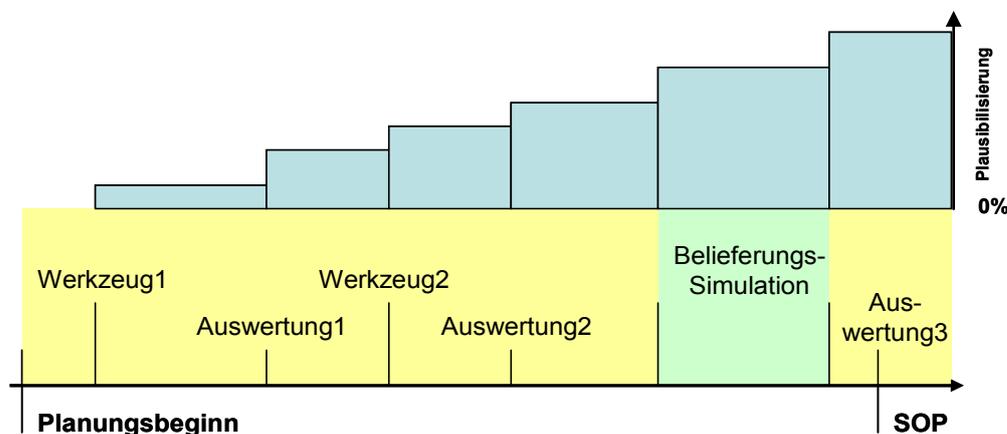


Abbildung 4.8: Plausibilisierung des Mengengerüsts durch komplementäre Werkzeuge

Je mehr Plausibilisierungsschleifen in dem Planungssystem der Digitalen Fabrik oder in mit dem Planungssystem angebundene Werkzeuge und Auswertungen durchgeführt werden, desto besser ist die Qualität der darin enthaltenen Daten. Die Belieferungssimulation profitiert dank ihrer späten Rolle im Planungsprozess besonders von vorgelagerten Plausibilisierungsschleifen. Trotzdem können einzelne Fehler im Mengengerüst bis zur Belieferungssimulation durchgeschleust werden, hier müssen die anderen beschriebenen Methoden zur qualitativen

Prüfung greifen. Auch die Simulation kann daher, bezogen auf den Gesamtprozess der Logistikplanung, als Verifikations- und Validierungsinstrument betrachtet werden und unterstützt damit den Planer bei einer vollständigen und konsistenten Planung.

Fehlerbeschreibung	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17
Der Flächenbedarf fixierter Prozessstationen überschreitet das Angebot der Logistikstation Rsc	2	9			3		4										
Die fixierte Prozessstation referenziert keine Logistikstation Rsc	48				4		2	6	2	2	2	40	2	2	67	83	83
Die Logistikstationen und Transportvarianten des Logistikplans sind nicht richtig verknüpft					6		9	4				10	10	10			
Zu der Prozessstation existiert im Layout keine gültige Angebotsfläche	98	25	49	9			1										
Die Logistikstation Rsc des BO ist im Layout nicht vorhanden	8		6	6	4												
Für den Geschosswechsel existiert im Layout auf der Vorgängerstationsebene keine gültige Angebotsfläche	8		102	102													
Für den Geschosswechsel existiert im Layout auf der Nachfolgerstationsebene keine gültige Angebotsfläche	8																
Der Logistikplan ist fixiert !	1																
Die Transportvariante besitzt keinen oder keinen freien Transportbaustein					10												
Zu der Prozessstation existiert im Layout keine gültige Angebotsfläche					46	48											
Die Transportbausteine der Transportvariante sind nicht richtig verknüpft									10	10	10						

Summe plausibilisierter Daten	953
-------------------------------	-----

Tabelle 4.2: gefundene Fehler im komplementären System *Malaga* der untersuchten Baureihe

Die systematische Einbindung dieser Filterklasse in das Planungssystem ist bisher nicht erfolgt, auch wenn die beschriebenen Werkzeuge und Auswertungen bereits in der Praxis eingesetzt werden. Durch die Einbindung in den gesamten Planungskontext wird aufgezeigt, welche Informationen von welchen Auswertungen und Werkzeugen verwendet werden. Gerade das Konzept der Digitalen Fabrik bietet hier mit der standardisierten Plattform eine gute Ausgangssituation. Hinsichtlich der Belieferungssimulation ist darauf zu achten, dass die Transparenz der Herkunft und Plausibilität der Eingangsdaten, gerade durch eine eventuelle Korrektur einzelner Datensätze und Parameter, gewährleistet ist. Im zeitlichen Ablauf des Planungsprozesses wird der Einsatz der komplementären Werkzeuge definiert und eingeordnet (vgl. Abbildung 4.8). Um dies automatisch prüfen zu können, sind im Planungssystem der Digitalen Fabrik an jedem Datensatz Prüfattribute zu ergänzen, mit deren Hilfe die Filterklasse auslesen kann, ob diese Datensätze bereits plausibilisiert wurden.

4.2.3 Filterklasse „Entscheidungsbaum-Schwellwertanalyse“

Entscheidungen im Planungsprozess aggregieren sich bottom-up aus unterschiedlichen vorgelagerten Entscheidungen. Jede dieser Entscheidung hat wiederum einen direkten Einfluss auf den Materialfluss in der Fabrik. Daher hat die Entscheidungsfindung einen großen Einfluss auf die Planungsqualität. Die Entscheidungen sind untereinander abhängig von diversen Rahmenbedingungen und werden in unterschiedlichen vorgelagerten Planungsschritten

ermittelt. Die Entscheidungsbaum-Schwellwertanalyse (EBS-Analyse) untersucht selbstständig top-down den Weg der Entscheidungsfindung und kann somit auf aggregierter Ebene nachvollziehen, ob die vom Planer getroffene Entscheidung anhand eines definierten Standards korrekt ist.

Die EBS-Analyse besteht aus einem binären Entscheidungsbaum auf Grundlage des Classification and Regression-Trees (CART)-Algorithmus [BRE98] mit aggregierten Schlüsselfragen. Der CART-Algorithmus findet Entscheidungen in binären Entscheidungsbäumen.

Die Beantwortung dieser Fragen setzt teilweise Kenntnisse voraus, die in Unternetzwerken ermittelt werden (vgl. Abbildung 4.9). Voraussetzung sind modellierte binäre Entscheidungsbäume für jede Fragestellung mit definierten Schwellwerten. Die EBS-Analyse entscheidet anhand dieser definierten Schwellwerte und kann somit auch die übergeordneten Fragestellungen beantworten. Der Weg der Entscheidungsfindung ist transparent und nachvollziehbar, was unmittelbar der Glaubwürdigkeit der Simulationsstudie zu Gute kommt.

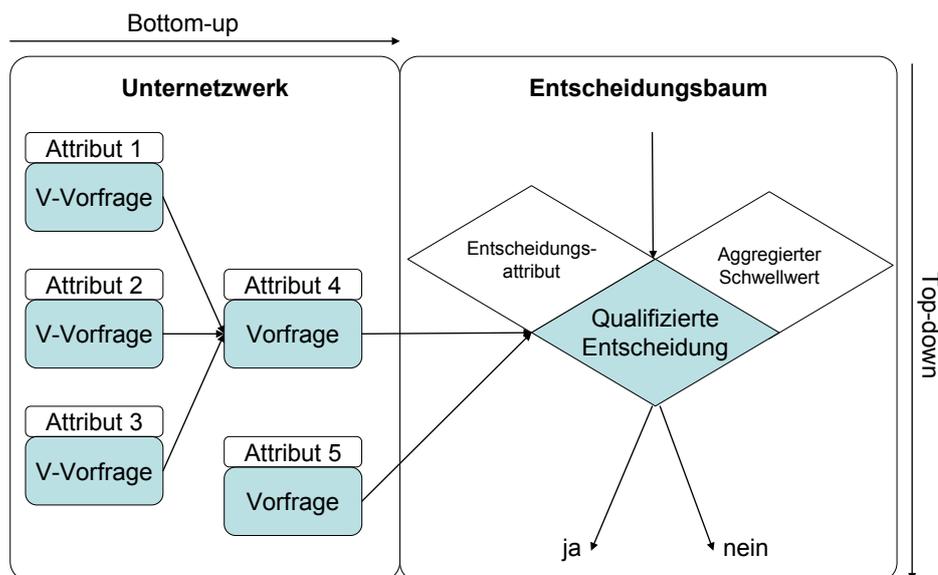


Abbildung 4.9: Entscheidungsfindung mit aggregiertem Schwellwert

Um übergeordnete Zielsetzungen mit in die Bewertung einfließen zu lassen, kann als weiteres Attribut die Priorität aufgenommen werden. Dadurch kann am Ende der Analyse das Ergebnis zusätzlich gewichtet werden. Dies ist insbesondere bei gegenläufigen Zielen, beispielsweise Kosten gegen Versorgungssicherheit, eine weitere Entscheidungsgrundlage für den Planer und den Simulationsexperten in der Experimentphase.

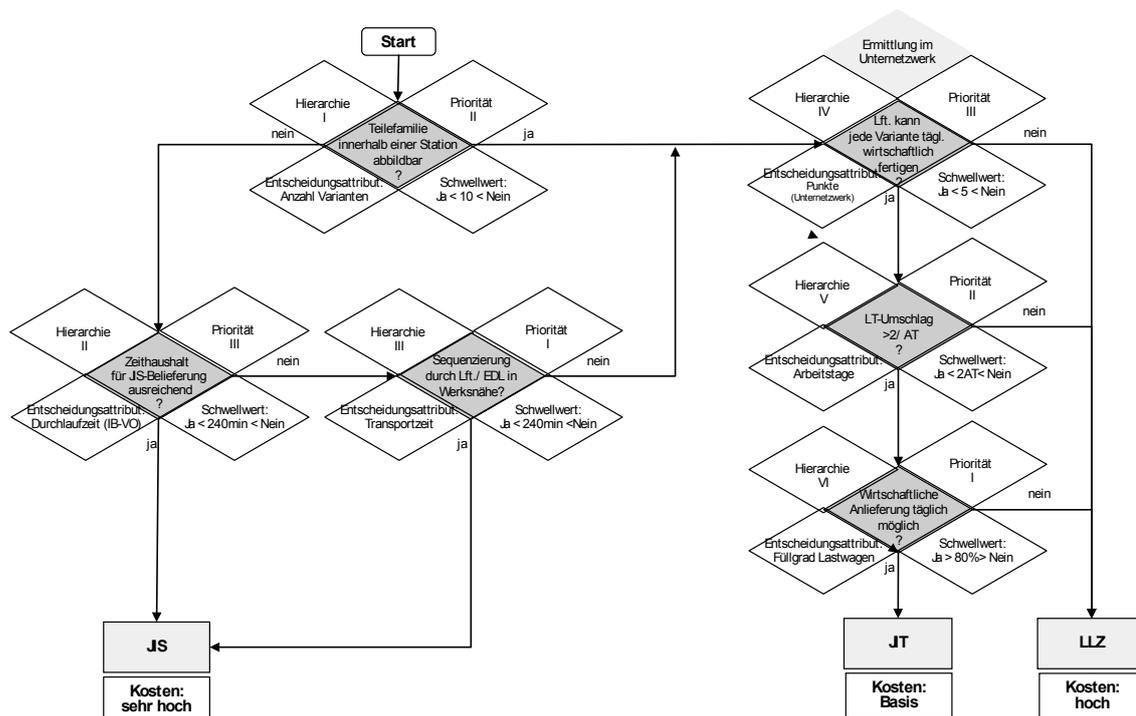


Abbildung 4.10: Entscheidungsbaum-Schwellwertanalyse am Beispiel der Standardbelieferungsform

Die Bewertung der Datensätze mit der EBS-Analyse erfolgt selbstständig, wenn alle Vorfragen in den Unternetzwerken im vorhandenen digitalen Mengengerüst hinreichend beantwortet werden können. Das Ergebnis dieser Prüfung ist eine Auswertung mit sämtlichen Transportketten, welche eine Diskrepanz zwischen geplanter und ermittelter Inhalte enthalten.

Dies bedeutet jedoch nicht, dass diese Transportketten falsch sein müssen. Auf Grund des Regelwerkes werden auch alle Transportketten identifiziert, bei denen auf Grund betrieblicher Vorgaben die bisherige Vorgehensweise zur Ermittlung der Informationen angepasst oder verändert wurde. Mit einem zusätzlichen Attribut kann der Planer dokumentieren, dass die Abweichung vom Standardprozess bewusst geplant wurde. Diese Transportkette wird bei der nächsten Auswertung der Filterklasse ignoriert und nicht erneut ausgewiesen. Ein beispielhafter Entscheidungsbaum ist in Abbildung 4.10 abgebildet.

4.3 Validierung und Verifikation

Die Modellvalidierung ist von unterschiedlichen Eingangsgrößen abhängig. Die Plausibilisierung der Eingangsdaten aus dem Planungssystem der Digitalen Fabrik ist ebenso notwendig wie die Verifizierung und Validierung sowohl des Simulationsgerüsts als auch des fertigen Modells im Simulator. Eine Checkliste unterstützt alle Beteiligten bei der Validierung des Modells und seiner Eigenschaften (vgl. Abbildung 4.11)

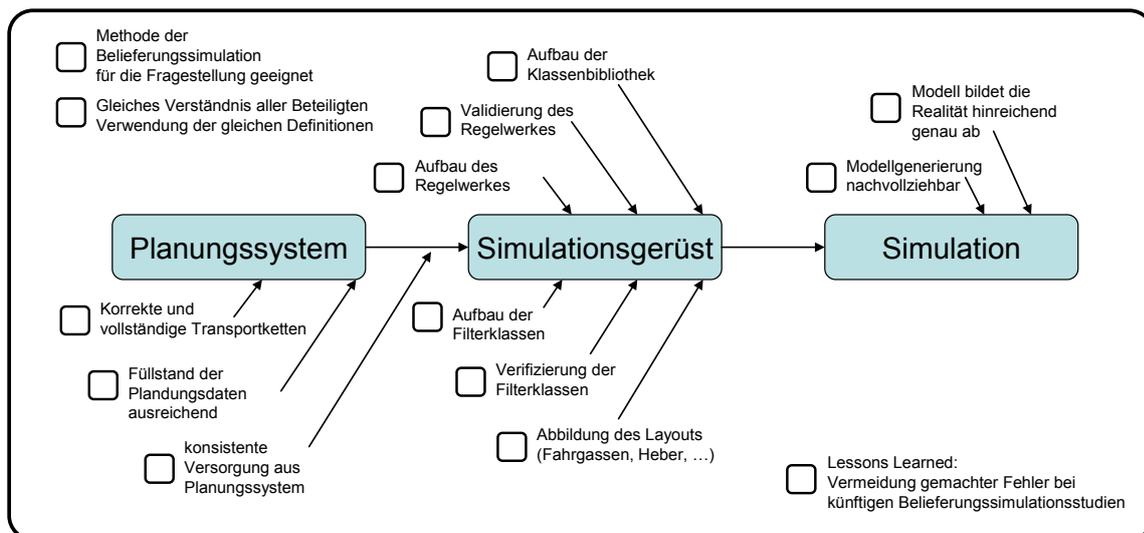


Abbildung 4.11: Checkliste der Validierung und Verifikation der Belieferungssimulation

4.3.1 Elemente der Validierung und Verifikation einer Belieferungssimulationsstudie

Eine Belieferungssimulationsstudie bedarf eines permanenten Monitorings von dem Kick-Off Meeting bis zur Übergabe der Expertise an den Kunden. Dabei ist eine Vielzahl unterschiedlicher Validierungs- und Verifikationselemente zu berücksichtigen.

Übergeordnet ist die Frage zu klären, ob die Belieferungssimulation für die gegebenen Fragestellungen die richtige Methode ist. Der Einsatz der Belieferungssimulation bringt wie in der Einleitung aufgeführt viele Vorteile mit sich, auf der anderen Seite darf der Aufwand nicht unterschätzt werden. Für einzelne Engpassanalysen kann ein Ausschnitt des Prozesses oder der Produktionshalle wesentlich zielführender sein als ein Modellaufbau einer kompletten Montagehalle. Weiter ist das Verständnis der Begrifflichkeiten und die Sensibilisierung der Datenverwendung von allen Beteiligten auf einen Nenner zu bringen, vgl. Abbildung 4.12. Dies ist vor dem Hintergrund eines komplexen Projektes eine unabdingbare Voraussetzung für den Erfolg einer Belieferungssimulation.

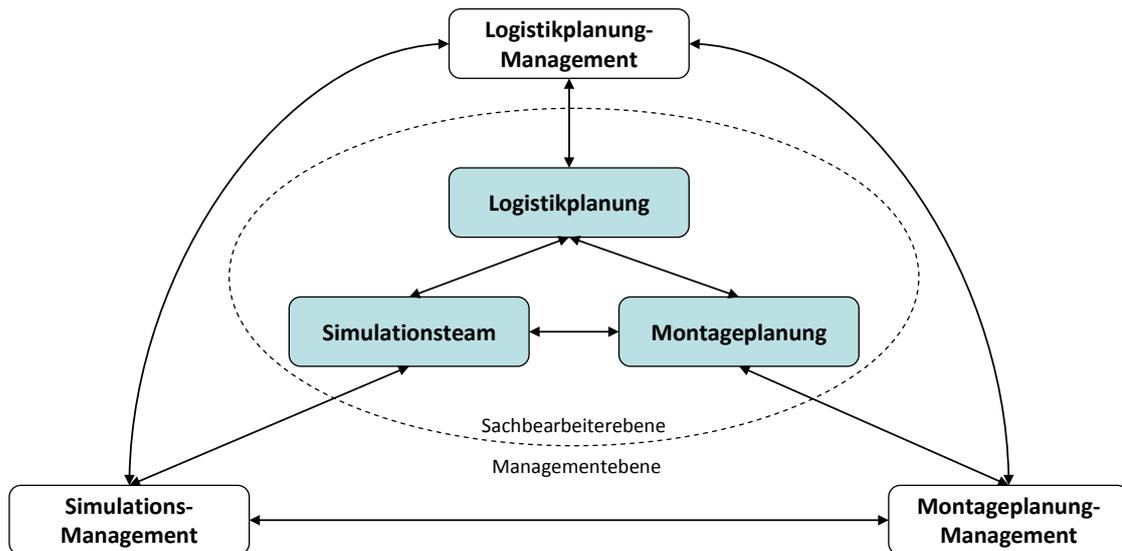


Abbildung 4.12: Informationsfluss der beteiligten Parteien im Rahmen einer Belieferungssimulationsstudie

4.3.1.1 Validierung und Verifikation im Planungssystem

Im Planungssystem ist primär die Vollständigkeit und Korrektheit der Transportketten zu prüfen. Die Vollständigkeit des Mengengerüsts ist ebenfalls eine relevante Einflussgröße, da eine Belieferungssimulation mit wenigen Transportketten des Mengengerüsts nicht die gleiche Aussagequalität wie eine Belieferungssimulation mit fast vollständigen Transportketten des Mengengerüsts haben kann. Daher ist es permanent zu prüfen, wie viele der vollständig parametrisierten Transportketten bereits in das Simulationsgerüst überführt werden können (vgl. Kapitel 5.3). Ein Filter innerhalb des Simulationsgerüsts unterstützt den Planer hierbei (vgl. Abbildung 4.13) und gibt eine Einschätzung, in wie weit die vorhandenen Daten belastbare Ergebnisse produzieren.

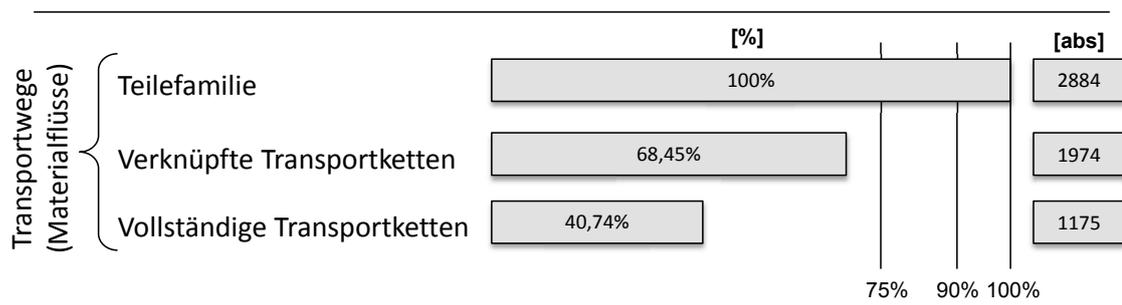


Abbildung 4.13: Füllstandauswertung für die Beurteilung der Aussagekraft der Simulationsstudie

Die Konsistenz der Daten innerhalb des Planungssystems muss überwacht werden, da sich hier Fehler aus vorgelagerten Systemen durchleiten können. Ebenfalls ist die Schnittstelle aus dem Planungssystem in Richtung Simulationsgerüst zu prüfen. Wichtig ist, dass alle definierten Daten zuverlässig herausgeschrieben werden.

4.3.1.2 Validierung und Verifikation im Simulationsgerüst

Im Simulationsgerüst ist zu prüfen, ob das Regelwerk aus den vorhandenen Logistikplandaten aufgebaut werden kann. Annahmen sind, auch in einer frühen Planungsphase, möglichst zu vermeiden. Sollten Annahmen nicht auszuschließen sein, so müssen diese deutlich gekennzeichnet werden, beispielsweise über ein zusätzliches Attribut. Dies ist gerade unter dem Gesichtspunkt der Transparenz eine Voraussetzung. Auch die Verifikation des Regelwerkes nach den Vorgaben der Planung ist obligatorisch. Nur wenn das Regelwerk vom Planer validiert und verifiziert wurde, ist die Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse, auch wenn diese in Konfidenzintervallen ausgegeben werden, erreichbar. Die Verifikation der Klassenbibliothek ist notwendig, da der Simulator die realen (geplanten) Prozesse wiedergeben muss, beispielsweise muss das Kreuzungsverhalten im Modell dem Kreuzungsverhalten in der Montagehalle entsprechen. Zu der Validierung und Verifikation einer Kreuzung ist es notwendig, dass sowohl der Logistikplaner als auch der Simulationsexperte vor Ort in der Montagehalle durch Beobachtung sich ein Bild von der Situation machen und das Verhalten gemeinsam in dem Simulationsmodell nachvollziehen.

Die Abbildung des Hallenlayouts im Simulator muss maßstabsgetreu dem realen (geplanten) Layout entsprechen, da hier die Zeiten für die Versorgung durch das Produkt von Wegstrecke * Geschwindigkeit ermittelt werden. Auch sind akkurat die Eigenschaften der Fahrwege zu verifizieren, beispielsweise ob Fahrzeuge innerhalb der Fahrgasse überholt werden können, ob Stapler innerhalb der Fahrgasse wenden können oder dass Routenzüge keine Sackgassen befahren können. Gerade bei der automatisierten Übernahme des Layouts, beispielsweise über die GSL-L Schnittstelle von [ROO09], ist akribisch darauf zu achten, dass sowohl die Strukturinformationen wie auch das Verhalten der einzelnen Bausteine wie Fahrwege oder Kreuzungen übernommen und an den Schnittpunkten korrekt verbunden sind.

Die Verifizierung der Filterklassen ist aufwendig, da hierbei das Expertenwissen und der Erfahrungsschatz der Planer direkt mit einbezogen werden muss. Jeder der Algorithmen ist Schritt für Schritt mit den Planern durchzugehen und zu prüfen. Der Zweck der Filterklassen ist das Aufzeigen von möglichen Planungsinkonsistenzen, hierbei wird nicht aktiv in das Planungssystem eingegriffen. Allerdings kommt das Aufdecken von unkorrekten Datensätzen direkt dem Simulationsergebnis zu Gute. Daher ist es nicht nur im Sinne des Simulationsexperten, sondern ebenfalls im Sinne der verantwortlichen Planung, dass die Filterklassen Fehler aufzeigen, aber nicht bei korrekten Datensätzen falschen Alarm ausgeben.

4.3.1.3 Validierung und Verifikation des Simulationsmodells

Nach dem Aufbau des Modells ist im Simulator zu prüfen, ob die entsprechenden Bausteine im Simulationswerkzeug entsprechend parametrisiert und alle Transportketten vollständig übernommen wurden. Dies ist an Hand von Vergleichen der Tabellen des Simulationsgerüsts und innerhalb des Simulators nachzuvollziehen. Auch muss geprüft werden, ob das Verhalten des Modells der geplanten Realität entspricht. Hierbei muss untersucht werden, ob die einzelnen Verhaltensstrategien denen entsprechen, die während der Kick-Off-Phase der Simulationsstudie definiert wurden. Sollte nicht das erwartete Verhalten eintreten, so ist zu prüfen, ob die Ursache im Planungssystem, im Simulationsgerüst, im Simulator oder an einer der Schnittstellen liegt. Im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses sind diese Ursachen zu dokumentieren und abzustellen. Hier gilt, je transparenter der Prozess der Datendurchgängigkeit

nachvollzogen werden kann, desto schneller sind die Ursachen aufgespürt und eliminiert. Durch die Transparenz der einzelnen Bausteine erhöht sich so auch die Nachvollziehbarkeit des Verhaltens und somit steigt auch die Glaubwürdigkeit in die Methode der diskret-ereignisorientierten Simulation.

4.3.2 Generierung der Teilennachfrage aus dem Produktionsprogramm und der Verbraurate

In der Belieferungssimulation wird das Abrufverhalten der Bauteile durch eine definierte Nachfrage am Bereitstellort abgebildet. Die Abbildung der Bedarfsmeldung erfolgt durch die Reduktion der Lagermenge am Bereitstellort zu jedem Nachfragezeitpunkt um die entsprechende Anzahl an Bauteilen. Wenn der Bestand an Bauteilen unter den definierten Meldebestand fällt, wird ein definierter Nachbestellprozess ausgelöst (Kanban-Karten, Knopfabruf, usw.). Wenn keine Versorgung am Bereitstellort auf Grund fehlender Teile mehr möglich ist (Bestandsabriss), so ist das im Simulationsgerüst festgelegte Verhalten des Simulators entscheidend: das Montageband wird so lange angehalten, bis die entsprechenden Bauteile nachversorgt werden, was wiederum Einfluss auf die anderen Versorgungen hat. Alternativ kann der Simulator mit negativen Beständen weiterarbeiten, um die Wechselwirkungen mit anderen Prozessen zu vermeiden (vgl. Kapitel 4.1). In diesem Fall werden die Negativbestände dokumentiert, um im Nachgang den entsprechenden Prozess genauer zu untersuchen.

Die Gestaltung der Nachfrage spielt in Belieferungssimulationen eine entscheidende Rolle, auch im Hinblick auf die Modellvalidierung und –Verifikation. Es sind zwei Ausprägungen möglich, die die Nachfrage an einem Bereitstellort abbilden:

4.3.2.1 Statische und dynamische Nachfrage aus der Verbraurate

Eine Ausprägung ist die Annahme der festen Verbraurate, eines statistischen Mittelwertes. Ein Beispiel hierfür wäre eine Verbraurate von 50% für eine bestimmte Sonderausstattung. Diese Verbraurate wird vom Vertrieb auf Grund von Marktbeobachtungen prognostiziert und ist in den Produktdaten des Planungssystems in der Digitalen Fabrik hinterlegt. Mit einer statischen Nachfrage wird eine Vereinfachung herbeigeführt, die nicht der Realität mit all ihren Restriktionen der Baubarkeit am Montageband entspricht.

Bei beschränkter Volatilität in der Montagefertigung, die sich insbesondere durch eine geringe Variantenanzahl auszeichnet und damit einen konstanten Bauteilebedarf aufweist, ist durch die Verwendung der Verbraurate eine hinreichende Genauigkeit gegeben. Bei einer variantenreichen Montagefertigung, beispielsweise in der Automobilindustrie, lassen sich die Einflüsse der einzelnen Restriktionen nur bedingt mit einer statischen Nachfrage abbilden. Es entstehen Ungenauigkeiten, beispielsweise wenn selten nachgefragte Bauteile (low-runner) in einer Pulkung (untertägige Häufung bestimmter Bauteile) nachgefragt werden. Dieses Verhalten wird mit der statischen Nachfrage ignoriert und kann somit nicht adäquat abgebildet werden. Als Näherung können diverse Verteilungen angenommen werden, bestenfalls empirisch ausgewertet aus Vorgängerbaureihen. Trotzdem ist es auch mit einer Verteilung schwierig, die unterschiedlichen Restriktionen in der Kombinatorik der einzelnen Bauteile dadurch genauer abzubilden (Bsp: es dürfen keine zwei USA-Fahrzeuge hintereinander kommen, es darf auf ein

USA-Fahrzeug kein China-Fahrzeug kommen, auf zwei Fahrzeuge mit Schiebedach hintereinander sind gesperrt). Für eine Belieferungssimulation bedeutet dies, dass die einzelnen Belieferungsprozesse nicht auf untertägige Nachfrageschwankungen vorbereitet sind, da der Simulator diese Dynamik mit der Verbraurate nur bedingt genau abbilden kann. Entsprechend benötigte Kapazitäten für diese Abrufspitzen werden folglich nicht vorgehalten und eine exakte Absicherung der Logistikplanung ist nicht gegeben.

4.3.2.2 Gepulkte Nachfrage aus dem Produktionsprogramm

Zur Abbildung der realen Prozesse in einer Belieferungssimulation ist die Abbildung eines tatsächlichen Produktionsprogramms notwendig. Die Nachfrage am Bereitstellort hängt direkt mit den einzelnen Kundenaufträgen der zusammen. Eine direkte Verknüpfung des Simulationsmodells mit der Programmplanung könnte eine zeitpunktgerechte Nachfrage ermöglichen, allerdings nur bei betriebsbegleitenden Belieferungssimulationen. Bei einer hohen Volatilität können mit einer simulierten Nachfrage aus dem Produktionsprogramm die intralogistischen Prozesse auch bei gepulakter Nachfrage bestimmter Bauteile in einem kurzen Zeitintervall eine kontinuierliche Versorgung sichergestellt werden.

4.3.2.3 Auswahl der geeigneten Teilenachfrage für Belieferungssimulationen

In der Neutypplanung ist jedoch die Verbraurate die geeignete Möglichkeit, das Produktionsprogramm abzubilden, da vor SOP keine Programmplanungsinformationen mit tatsächlichen Kundenaufträgen vorliegen. Um dennoch Bedarfsspitzen mit Echtdate abzubilden zu können, werden die Echtdate aus der Programmplanung der Vorgängerbaureihe an das Simulationsmodell angebunden. Der Betreiber in der Produktionshalle muss ebenfalls auf kurzfristige Programmplanungsänderungen reagieren können und braucht somit ebenfalls einen kleinen Puffer in seinen logistischen Versorgungsprozessen.

Die Anbindung der Programmplanung, die die Nachfrage des realen Produktionsprogramms im Simulationsmodell abbildet, erfordert eine aufwändigere Initialimplementierung als die statische Nachfrage. Dadurch steigt der Aufwand für die Belieferungssimulation. Weiter kann davon ausgegangen werden, dass die Daten der Programmplanung in einer Form vorliegen, die für das Simulationsmodell erst aufbereitet und angepasst werden müssen. Dazu gehört auch die Prüfung, ob sich Bauteile oder Prozesse geändert haben, was bei der Integration der Programmplanung in das Modell zu Ungenauigkeiten bzw. falschen Aussagen führen kann. Ein Grund hierfür kann sein, dass sich Bauteile und Module bei einem Baureihenwechsel hinzukommen, wegfallen oder im größeren Stil verändert werden. Dies führt zu Mehraufwand, da die Programmplanungsdate nicht über vorhandene Sachnummern oder Teilefamilien automatisiert verknüpft werden können, sondern von Hand ergänzt werden.

4.4 Übergabe der vollständigen Eingangsdaten an den Simulator

Zum Anschluss werden die nun plausibilisierten vollständigen Simulationsdaten an den Simulator überführt. Somit ist die Voraussetzung geschaffen, das Simulationsmodell belastbar zu parametrisieren. Damit können Abstimmungsschleifen zwischen den Simulationsexperten und den verantwortlichen Planern auf ein Minimum reduziert werden, was sich in einer verbesserten Wirtschaftlichkeit ausdrückt.

Die Initialisierung des Simulationsgerüsts ist der zentrale Ausgangspunkt für das Lösungskonzept. Durch die Definition der Klassen und durch den Aufbau der Klassenbibliothek im Simulator wird die Durchgängigkeit der simulationsrelevanten Umfänge sichergestellt. In Kapitel 5 wird das Konzept auf seine Umsetzbarkeit untersucht.

5 Prototypische Anwendung

Im Rahmen der prototypischen Anwendung wird auf den folgenden Seiten das in Kapitel 4 vorgestellte Lösungskonzept auf seine Umsetzbarkeit geprüft. Dazu gehören neben der systemseitigen Anbindung der vorhandenen Systeme und dem Aufbau des Simulationsgerüsts auch die Bewertung der Eingangsdaten durch die Filterklassen.

5.1 Anforderungen an die vorhandenen Systeme

Das in Kapitel 4 vorgestellte Lösungskonzept soll nun durch die praktische Umsetzung bewertet werden. Als aussagekräftiges Beispiel wird für die prototypische Anwendung die Logistik des Gewerkes Montage einer ausgewählten Baureihe eines deutschen Automobilherstellers mit der Belieferungssimulation abgesichert.

Die ausgewählte Oberklassenbaureihe stellt aufgrund der hohen Anzahl von Montagevarianten des Build-to-Order-Prozesses hohe Anforderungen an die Intralogistik der Produktion. Die prototypische Anwendung des Lösungskonzepts leistet somit einen Beitrag für die Planungsabsicherung der Baureihe. Das generische Lösungskonzept erlaubt eine Übertragung der Belieferungssimulationen auf andere Baureihen, aber auch auf andere Automobilhersteller. Aus diesem Grund wurde die Montage exemplarisch ausgewählt: im Vergleich zu anderen Gewerken wie der Lackierung oder dem Karosseriebau ist hier die Varianz der Logistik am größten. Somit muss sich die Belieferungssimulation der Logistik des Gewerkes Montage an der vorhandenen Komplexität orientieren.

5.1.1 Anbindung des Planungssystems

Die prototypische Anwendung baut auf der bestehenden Systemlandschaft eines deutschen Automobilherstellers auf. Der *Delmia Process Engineer (DPE)* der Firma *Dassault Systems* wird als gesetztes Planungssystem verwendet, allerdings ist das Lösungskonzept von der Methodik an kein bestimmtes Planungssystem gebunden. Für die prototypische Anwendung des Lösungskonzeptes mit *DPE* sind die folgenden Voraussetzungen zu erfüllen:

- Der Logistikplaner muss alle relevanten Attribute seiner Transportketten abbilden können.
- Es muss ein standardisiertes Reporting vorhanden sein, um die Plandaten digital weiterverwenden zu können.
- Das System muss um diverse Attribute (z.B. Filterklasse 2) erweiterbar sein, damit die Umsetzbarkeit des Prototypen aufgezeigt werden kann.

5.1.2 Auswahl des Simulators

Der Auswahl des geeigneten Simulators kommt eine bedeutende Rolle zu, da während des Projekts kaum die Möglichkeit besteht, diese Entscheidung zu revidieren [WJ08]. Diese Auswahl ist mit Anforderungen verbunden, die unter anderem in der Empfehlung des [VDI08a] abgeleitet werden. Dazu gehören:

- Abbildung logistischer Prozesse (Material- und Informationsfluss)
- Objektorientierte Modellierung
- Entwicklungsumgebung für die Modellierung individueller Methoden
- Schnittstellen zu gängigen Datenbanken

Neben fachlicher und funktionaler Anforderungen sind häufig auch firmenspezifische Aspekte zu berücksichtigen [ROO09]. Dazu gehören unter anderem die Kompatibilität der verwendeten Produktionsplanungssysteme sowie die erwarteten Synergieeffekte einer einheitlichen Systemstrategie zwischen Werken, Gewerken, Zulieferern und Softwarelieferanten, aber auch Faktoren wie die Umsetzung eines Anforderungsmanagements und Supportleistungen.

[WJ08] leiten die Anforderungen an einen modernen Simulator an einem 11-Punkte umfassenden Kriterienkatalog ab. Dazu gehören die Systemumgebung, Schnittstellen, Simulationsmethodik, Bedienung und Benutzerfreundlichkeit, Verifikation und Validierung, Modellierung stochastischer Einflüsse, Ergebnisaufbereitung und Animation, Zusatzleistungen sowie Kosten. [RAB03] untersuchte die eingesetzten Simulationswerkzeuge auf ihre Abbildungsgenauigkeit und stellte fest, dass alle Materialflüsse hinreichend genau abgebildet werden können. Unterschiede liegen nach [RAB03] in der Modellierung, Übersichtlichkeit und der Wiederverwendbarkeit einzelner Module. [ROO09] erstellte auf Grundlage dieser Vorgaben einen umfassenden Katalog. Dieser Katalog wurde mit den Anforderungen des Automobilherstellers gewichtet. Als am meisten eingesetztes Simulationswerkzeug in der Fabrikplanung wird im deutschsprachigen Raum nach [SSS06] *PlantSimulation* der *Siemens PLM AG* eingesetzt, gefolgt von den Simulatoren *Quest (Delmia)*, *Whitress (Lanner Group)*, *Dosimis (SDZ GmbH)* und *AutoMod (Applied Materials)*.

Die Auswahl des Simulators der vorliegenden Arbeit orientiert sich an der Empfehlung der VDA-Arbeitsgruppe Ablaufsimulation, welche den Einsatz der Software *PlantSimulation* wegen gemeinsamer Standardisierungsbemühungen der deutschen Automobilhersteller vorschlägt. Auch [ROO09] kommt in seiner Arbeit zu dem Schluss, dass der Einsatz von *PlantSimulation* Vorteile bei der Verbreitung und Schnittstellenzugänglichkeit hat. Letztlich ist auch die Abbildung des Logistikmoduls im vollen Umfang mit *PlantSimulation* möglich.

5.2 Vorbereitungen für den Modellaufbau

Die prototypische Umsetzung des Lösungskonzepts dient dem prinzipiellen Nachweis der Funktionsfähigkeit. Das Prozessschaubild (vgl. Kapitel 4) zeigt die einzelnen Schritte des Gesamtprozesses, die für einen Aufbau der Belieferungssimulation notwendig sind. Die Darstellung verdeutlicht den Prozess (Aufgaben zur Zielerreichung der Elemente). Damit wird das in Kapitel 4 aufgezeigte Lösungskonzept mit aktuellen Werkzeugen umgesetzt. Generell ist bei der Umsetzung zwischen Initialarbeitsschritten und den iterativen planungsbegleitenden Arbeitsschritten zu unterscheiden.

5.2.1 Implementierung des Layouts

Der erste Schritt ist der Aufbau des Hallenlayouts im Simulationswerkzeug *PlantSimulation*. Dazu sind alle Elemente des Hallenlayouts mit den Bausteinen des Logistikmoduls nachzubilden. Bereits in einem frühen Stadium des PEP wird das Layout festgelegt (Layout-Freeze), da weitere Planungsschritte wie beispielsweise die Ausgestaltung der Transportketten auf einen fixierten Layoutstand zurückgreifen. Dies widerspricht zwar den Anforderungen einer logistikgerechte Planung der Montagehalle, ist aber für den Aufbau einer Belieferungssimulation als Fundament unabdingbar. Die Fabrikplanung des Automobilherstellers erfolgt mit der Software *Microstation/TriCAD*.

Eine Schnittstelle zwischen *Microstation* und *PlantSimulation* auf der Grundlage der Arbeit von [ROO09] ist momentan im Aufbau, war aber zum Zeitpunkt des Druckes noch in der Entwicklung und nicht produktiv im Einsatz. Diese Schnittstelle übernimmt das Wegenetz inkl. Kreuzungen in das Simulationsmodell, sofern die entsprechenden Zusatzinformationen in *Microstation* hinterlegt wurden. In einer Weiterentwicklung der Schnittstelle sollen dann auch die Logistikstationen automatisiert übernommen werden können.

In der vorliegenden Arbeit wurde das Hallenlayout manuell übernommen. Der Simulationsexperte hat bei der händischen Modellierung der Wege und Kreuzungen die notwendige Transparenz, um eventuelle Inkonsistenzen zu erkennen. Bei einem automatisierten Import des Wegenetzes ist der V&V-Aufwand direkt von der Zuverlässigkeit der eingesetzten Schnittstelle und der Datenqualität des Fabriklayouts abhängig. Angesichts fehlender Erfahrungen mit der GSL-L-Schnittstelle kann hierzu keine Aussage gemacht werden. Generell ist die Layoutübernahme kein zeitkritischer Faktor, da selbst große Fabriklayouts durch entsprechende Modellierungserfahrung zeitnah übernommen werden können. Die manuelle Übertragung für den vorliegenden Prototypen konnte in zwei Personentagen vollständig realisiert werden.

5.2.2 Analyse der Eingangsdaten

Die Logistikplanung des Automobilherstellers arbeitet mit dem Programm *Delmia Process Engineer (DPE)*. Ein direkter Export der Planungsdaten ist auf Grund einer Datenkapslung der Datenbank nicht möglich. Daher wird auf standardisierte Reports des *SAP Business Intelligence Channels (SAP BI)* zurückgegriffen, welche sämtliche ausgeplanten Transportketten inklusive der Ressourcenenformationen der Baureihe zu Verfügung stellt. Die in Kapitel 2.8 identifizierten Eingangsdaten werden zu Berichten zusammengefasst und stehen tagesaktuell auf der Intranet-Homepage des Automobilherstellers zur Verfügung. Der Abzug erfolgt als kommagetrennte Textdatei (.csv).

Um die relevanten Informationen aus dem Planungssystem zu erhalten, sind die Anforderungen der Belieferungssimulation an den Report in einem Lastenheft zu definieren. Auf der Grundlage der morphologischen Kästen lassen sich Relationen festlegen (vgl. Abbildung 5.1). Die notwendigen Attribute ergeben sich aus den im folgenden Absatz dargestellten Entitäten. Als Entität wird hier die Abbildung eines Objektes aus der realen Welt nach [CHE76] verstanden. In der Simulationsdatenbank werden alle für die Belieferungssimulation relevanten Daten konzentriert. Diese Daten können dann wiederkehrend mit aktuellen Plandaten durchgeführt

werden. Die Ergänzung fehlender, aber simulationsrelevanter Parameter erfolgt durch die Anwendung des Regelwerkes.

5.2.3 Festlegung benötigter Attribute

In diesem Abschnitt werden die im Lösungskonzept (vgl. Kapitel 4) beschriebenen morphologischen Kästen der für die Belieferungssimulation benötigten Ausprägungen aufgebaut. Für die Umsetzung werden für die Attribute der Entitäten Produkt, Versorgungsprozess, Layoutelement, Logistikstation, Flurförderzeug und Ladungsträger festgelegt. Die Attribute orientieren sich an den in Kapitel 4.1 identifizierten Kategorien. Mit dem Pfeilsymbol „ \Rightarrow “ in den folgenden Abbildungen werden die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Entitäten bzw. Relationen dargestellt. Wenn der entsprechende Freiheitsgrad aus dem Planungssystem zur Verfügung gestellt wird, ist dies mit einem „x“ in der Spalte Verfügbarkeit markiert. Sollte die Ausprägung nicht vorhanden sein, so ist diese ontologisch mit einem Regelwerk zu ermitteln.

Entität Produkt

Attribut	Verfügbarkeit	Ausprägung/Datentyp
Bezeichnung	x	(string)
ID	x	(integer)
Teilefamilie	x	(string)
Verbauquote	x	(real)
Ladungsträger	x	\Rightarrow Ladungsträger
Teile pro LT	x	(integer)
Wareneingang	x	\Rightarrow Logistikstation
Lager Vollgut	x	\Rightarrow Logistikstation
Bereitstellort	x	\Rightarrow Logistikstation
Lager Leergut	x	\Rightarrow Logistikstation
Warenausgang	x	\Rightarrow Logistikstation
Behälterprinzip	x	1, 2, 3, 4, 10
Meldebestand		1/4, 1/2, 3/4
Reichweite	x	1/2h, 1h, 2h
WE Intervall		(integer)
Versorgungsprozess	x	\Rightarrow Versorgungsprozess

Tabelle 5.1: Entität Produkt

Die Produktinformationen sind in der Logistikplanung komplett zu planen. Neben den Stammdaten (ID, Bezeichnung, ...) werden hier auch Informationen über die Versorgungsprozesse festgelegt, welche auf Logistikstationen verweisen (Prozesssicht). Darüber hinaus werden der passende Ladungsträger und der Versorgungsprozess der Standardbelieferung hinterlegt. Der vollständige morphologische Kasten ist in Tabelle 5.1 abgebildet.

Entität Versorgungsprozess

Attribut	Verfügbarkeit	Ausprägung/Datentyp
Bezeichnung	x	(string)
Abrufmethodik	x	Knopfäbruf, Kanban
Belieferungsform	x	JIS, JIT, LLZ, mehrstufige Lagerhaltung
Versorgungsprozess		Direktverkehr, Routenverkehr
Flurförderzeuge		==> Flurförderzeuge
Fahrzeugsteuerung		FiFo, Priorisiert
Routenverlauf		==> Layoutelemente
MTM-Informationen	x	siehe Transportbausteine (Tbi)

Tabelle 5.2: Entität Versorgungsprozess

Die Festlegung der Standardbelieferungsform wird in der Logistikplanung durch einen Entscheidungsbaum ermittelt. Diese Ermittlung lässt sich an Hand der Logistikplandaten mit der Filterklasse 3 plausibilisieren. Der vollständige morphologische Kasten ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Jede Tätigkeit im logistischen Versorgungsprozess wird dabei mit einem MTM-Zeitwert belegt. Um die teilweise komplexen Prozessschritte der Versorgung abzubilden, werden die entsprechenden MTM-Zeitbausteine entsprechend dem Abstraktionsgrad aggregiert. Diese werden von der Arbeitswirtschaft ermittelt und entsprechen den abgestimmten Standards. Im Planungssystem sind diese Zeitbausteine im Logistikplanungssystem in den Transportbausteinen der Transportketten hinterlegt.

Entität Layoutelemente

Als Layoutelemente werden sämtliche aktive und passive Bestandteile des Hallenlayouts bezeichnet. Ursprung dieser Elemente ist sowohl die Fabrikplanung (Wege, Kreuzungen), die Montageplanung (Bänder, Verbauorte) als auch die Logistikplanung (Festlegung des Lagertyps, Ausplanung des Lagers, Wahl der Wareneingang und Warenausgang sowie die Versorgung der Bereitstellorte. Der vollständige morphologischer Kasten ist in Tabelle 5.3 abgebildet.

Attribut	Verfügbarkeit	Ausprägung/Datentyp
Bezeichnung	x	(string)
ID	x	(integer)
Typ	x	Weg, Bahnhof, Station
Halle	x	(string)
Geschoss	x	EG, OG
Band	x	B01, B02, ... Bn
Bandabschnitt	x	Nord, Süd
Station	x	(integer)
Bandseite	x	Links, Rechts
x/y/z Koordinaten	x	(integer)

Tabelle 5.3: Entität Layoutelemente

Entität Logistikstation

Die Prozesslogistikstation (LSP) hat eine 1:1 Beziehung zu einem Layoutelement (LSR) und stellt in der Transportkette die Orte dar. Für eine Belieferungssimulation sind die genaue Funktionalität (Ausprägung der Logistikstation) und die Kapazität notwendig. Der vollständige morphologische Kasten ist in Tabelle 5.4 dargestellt.

Attribut	Verfügbarkeit	Ausprägung/Datentyp
Bezeichnung	x	(string)
Lagerplätze physischer Ort	x	JIS Puffer, JIS Puffer, LLZ Supermarkt ==> Layoutelement

Tabelle 5.4: Entität Logistikstation

Entität Flurförderzeuge

Die genauen Informationen zu den eingesetzten Flurförderzeugen sind eine Grundvoraussetzung für eine valide und verifizierte Belieferungssimulation. Insbesondere die FFZ haben einen direkten Einfluss auf die zeitdynamischen Interdependenzen der Belieferungssimulation – und stellen somit eines der Kernelemente der Belieferungssimulation dar. An dieser Stelle wird auch der Mehrwert gegenüber den statischen Betrachtungsweisen geschaffen. In der Logistikplanung werden bisher FFZ nicht direkt zu den Transportketten geplant. Die fehlenden Informationen wie Durchschnittsgeschwindigkeit, Kapazitäten, durchschnittliche Ladefaktoren, und Batteriekapazitäten sind manuell zu ergänzen, dies geschieht in einer verifizierten und mit dem Planer abgestimmten Tabelle, welche ebenfalls in der Simulationsdatenbank verknüpft wird. Der vollständige morphologische Kasten ist in Tabelle 5.5 dargestellt.

Attribut	Verfügbarkeit	Ausprägung/Datentyp
Bezeichnung		(string)
Geschwindigkeit		(integer)
Ausmaße (Länge)		(integer)
Ausmaße (Breite)		(integer)
Ladekapazität		(integer)
Steuerung		
Anzahl		(integer)
Bahnhof		==> Laoutelement
Verfügbarkeit		(float)

Tabelle 5.5: Entität Flurförderzeuge

Entität Ladungsträger

Die Logistik bewegt ausschließlich Ladungsträger, erst die Montage kommt mit den einzelnen Bauteilen in Kontakt. Der Ladungsträger ist das Medium, in welchem ein Bauteil über den Wareneingang zum Bereitstellort transportiert wird. Nachdem der Ladungsträger geleert wurde, kann er ggf. geklappt und gestapelt seinen Weg über ein optionales Leergutlager zum Warenausgang fortsetzen. Die Detailinformationen werden von der Ladungsträgerplanung bereitgestellt. Die fehlenden Ausmaße des geklappten Ladungsträgers werden durch das

Regelwerk nach dem Vorsichtsprinzip ermittelt. Der vollständige morphologische Kasten ist in Tabelle 5.6 dargestellt.

Attribut	Verfügbarkeit	Ausprägung/Datentyp
Bezeichnung	X	(string)
Universalismus	X	KLT, GLT; SLT
Ausprägung	X	Einsatzrahmen, Gestell, Einweg
Ausmaße (Länge)	X	(integer)
Ausmaße (Breite)	X	(integer)
Ausmaße (Höhe)	X	(integer)
Stapelbarkeit (Voll)		(boolean)
Klappbarkeit (Leer)	X	(boolean)

Tabelle 5.6: Entität Ladungsträger

5.2.4 Aufgabe des Simulationsgerüsts während der Simulationsstudie

Das Simulationsgerüst ist eine relationale Datenbank. Die Aufgabe der Simulationsgerüsts ist die Sammlung, Organisation und ggf. Ergänzung relevanter Information. Die Relationen und Beziehungen (vgl. Abbildung 5.1) gehen aus der Datenanalyse mit den zugehörigen morphologischen Kästen hervor.

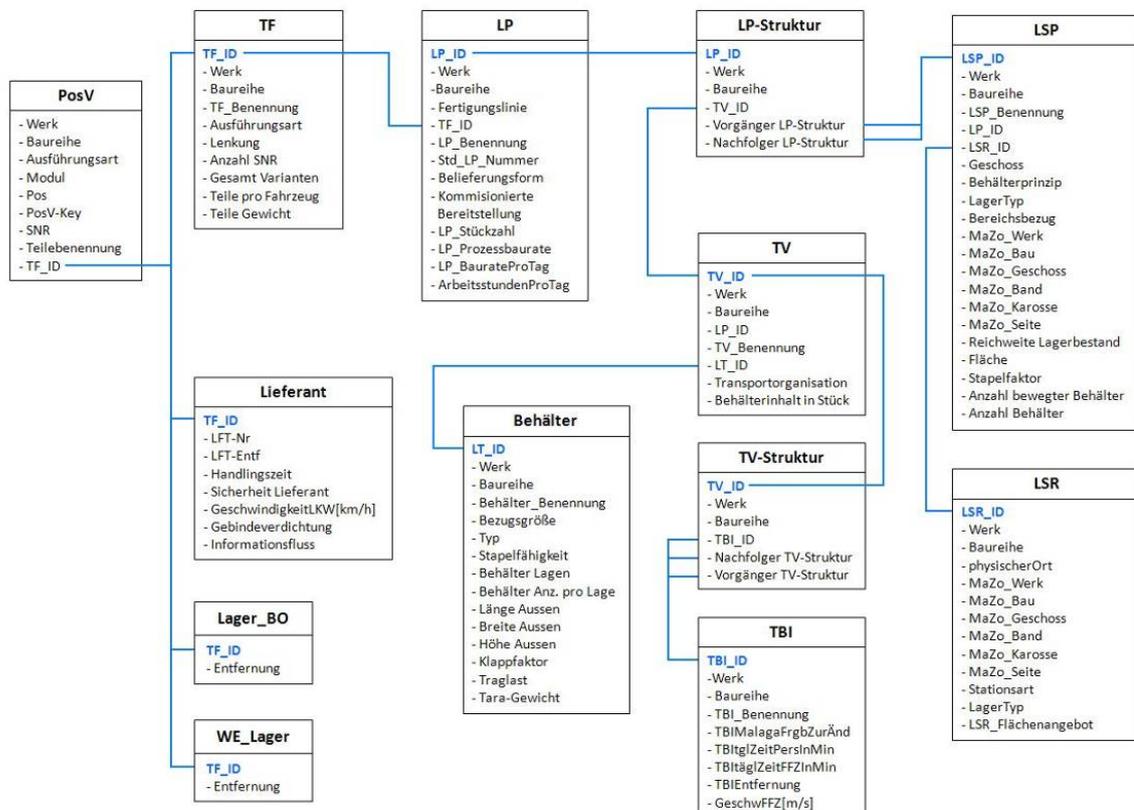


Abbildung 5.1: Relationales Datenbankschema des Simulationsgerüsts

5.3 Bewertung der Informationsqualität durch die Filterklassen

Im Folgenden wird nun die Informationsqualität der Plandaten untersucht. Für die prototypische Bewertung wurde dies in drei Schritten umgesetzt: Bereitstellung des Mengengerüsts aus dem Planungssystem der Digitalen Fabrik, Generierung eines Datenabzuges und Befüllung des Simulationsgerüsts. Mit der strukturierten Informationssammlung im Simulationsgerüst sind alle Voraussetzungen vorhanden, die Informationen qualifiziert zu bewerten. Die im Lösungskonzept vorgestellten drei Filterklassen werden in diesem Kapitel auf ihre Einsetzbarkeit mit realen Logistikplandaten untersucht.

Der Export der Planungsdaten wird über das Reporting-Modul des *SAP-BI* generiert. Hier werden die vorab definierten Berichte tagesaktuell berechnet und können als kommagetrennte Textdatei (.csv) lokal gespeichert werden. Um diese Reports nutzen zu können, wurde gemeinsam mit den Betreibern der Digitalen-Fabrik-Plattform ein Lastenheft erarbeitet, welches die benötigten Reports auf die Bedürfnisse der Belieferungssimulation und der Filterklassen angepasst. Für die prototypische Umsetzung stehen diese Berichte zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

Abbildung 5.2 zeigt den Einstieg in das Reporting-System des SAP-BI-Channels. Nachdem die entsprechende Baureihe ausgewählt wurde kann nun der Report „Materialfluss-Simulation“ abgerufen werden, vgl. Abbildung 5.3. Im nächsten Schritt werden die Daten in einer kommagetrennten Textdatei (.csv) exportiert, welche im nächsten Schritt in Abbildung 5.4 durch die MySQL-Datenbank eingelesen wird. Im letzten Schritt greift das Simulationsgerüst auf diese Datenbank zu und kann dadurch die Tabelle für die Prüfung durch die Filterklassen ermöglichen, vgl. Abbildung 5.5.

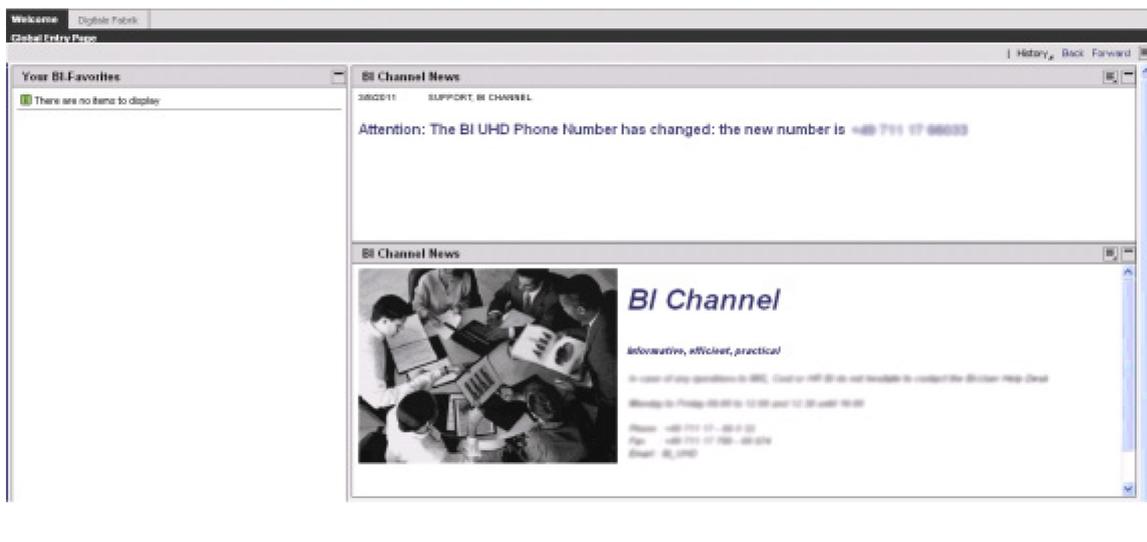


Abbildung 5.2: Einstieg in das SAP-BI-Channel System

The screenshot shows a SAP S/4HANA interface with a sidebar on the left containing navigation options like 'Aktuelle Nachrichten', 'Vorberechnete Berichte', and 'Logistik: ab'. The main area displays a report titled 'Logistik: Materialfluss Teilefamilie'. The report includes a table with columns for 'Werk', 'Baureihe', 'TF_OID', 'TF_Benennung', 'Ausführungsart', 'Lenkung', 'Anzahl SNR', 'Gesamt Varianten', 'Teile pro Fahrzeug', and 'Teile Gewicht'. The table lists various parts such as 'WIRBELSCHALTZEICHEN', 'Hochschleife_V50', and 'Verklebung / A-Schicht ab A 222 680 01 25'.

Abbildung 5.3: Abruf des Mengengerüsts als standardisierter Bericht

The screenshot shows the phpMyAdmin interface for a MySQL database named 'materialfluss'. The 'Table' dropdown is set to 'z050b_df_qt_log_mf_posv01'. The main area displays a list of tables with columns: 'Baureihe', 'Werk', 'AusführungsArt', 'Modul', 'POSV', 'POSE', 'POSV-Key', 'SNR', 'Teilebenennung', and 'TF_OID'. The tables listed include 'ABDICHTUNG VORBAU LL / W176', 'ABDICHTUNG / HAUPTBODEN TÜR/W176/C28', 'ABDICHTUNG H / BODEN / C117', 'ABDICHTUNG RW / TÜREN / C117', 'ABDICHTUNG / VOLLDACH / C117', 'ABDICHTUNG / ASD / C117', 'ABDICHTUNG NOTHAUSE / C117', 'ABDICHTUNG ALFBAU / C117', 'ABDICHTUNG / HAUPTBODEN TÜR/W176/C28', 'HOHLRAUM-INSERIERUNG / WACHSLOCHSCHABLONE', 'FUGEN UND RADENPLAN', 'ABDICHTUNG VORBAU / C117', 'ABDICHTUNG H / BODEN / C117', 'ABDICHTUNG RW / TÜREN / C117', 'ABDICHTUNG / VOLLDACH / C117', 'ABDICHTUNG / ASD / C117', 'ABDICHTUNG NOTHAUSE / C117', 'ABDICHTUNG ALFBAU / C117', and 'HOHLRAUM-INSERIERUNG U-BAU / FC'.

Abbildung 5.4: Importierte Tabellen in der MySQL-Datenbank

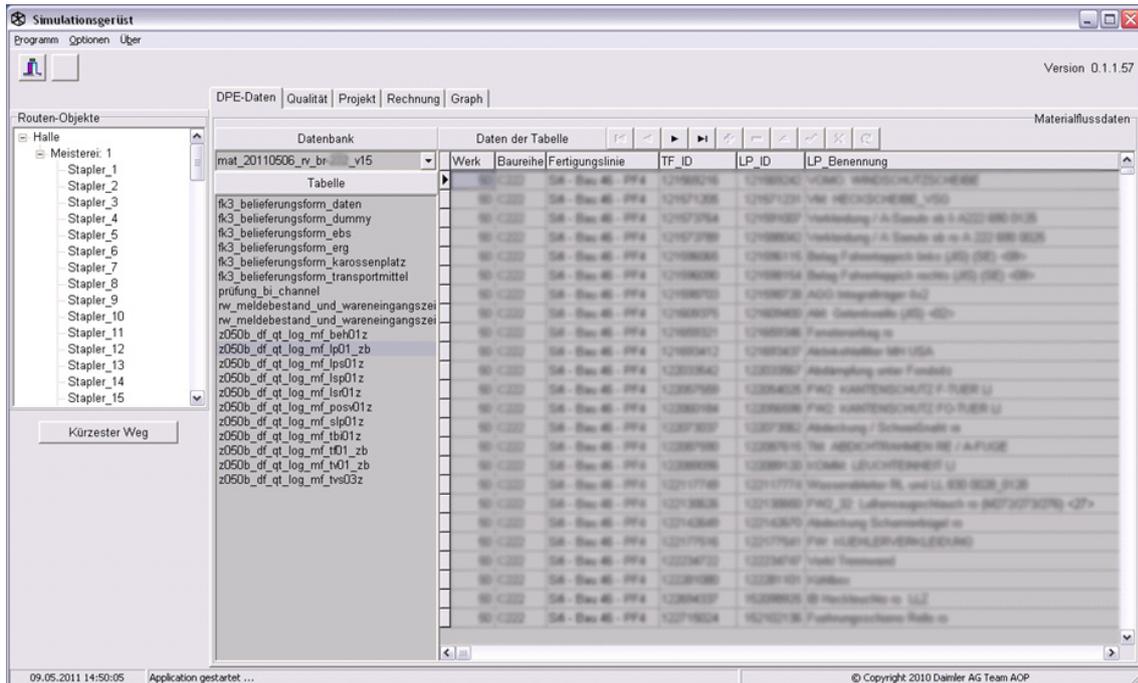


Abbildung 5.5: Datenbankzugriff aus dem Simulationsgerüst

5.4 Filterklasse 1: Referenzanalyse

5.4.1 Definition des Werkzeuges

Die Referenzanalyse setzt wie im Lösungskonzept angesprochen auf horizontale und vertikale benachbarte Baureihen auf. Durch den Vergleich mit diesen Referenzen besteht die Möglichkeit, Planungsobjekte der aktuellen Baureihenplanung und vorherigen Baureihenplanungen zu vergleichen. Da bei vergleichbaren Bauteilen, beispielsweise das Lenkrad, die Transportkette vergleichbare Eigenschaften hat, lassen sich hierbei mögliche Fehler ableiten. Auftretende Abweichung können allerdings auf baureihenspezifische Gegebenheiten zurückführbar sein und müssen daher nicht zwingend inkorrekt sein.

5.4.2 Voraussetzung und Status der prototypischen Umsetzbarkeit

Nach Analyse verschiedener Baureihen musste festgestellt werden, dass es bisher nicht möglich ist, Teilefamilien über eine Referenz eindeutig zu verknüpfen. Es gibt keine einheitliche Nomenklatur zwischen den gleichen Teilefamilien von horizontal oder vertikal referenzierten Baureihen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die in dem Planungssystem der Digitalen Fabrik Produktinformationen nicht Teil des Planungsprozesses sind, sondern über Schnittstellen aus der Entwicklung versorgt werden.

Zu beplanende Bauteile werden in den Entwicklungsabteilungen definiert und in das System aufgenommen, die Bezeichnung der einzelnen Bauteile wird individuell in einem Freitextfeld festgelegt. Dadurch entstehen je nach Baureihe und Entwicklungsteam nicht standardisierte Bezeichnungen. Auch in den Sachnummern und Teilefamilien-IDs ist keine Systematik vorhanden, mit welcher eine Referenzierung zu anderen Baureihen möglich wäre. Durch die

Vielzahl unterschiedlicher Systeme und Schnittstellen auf dem Weg von der Entwicklung bis in die Produktionsplanung ist eine Standardisierung der Namensgebung der Bauteile als auch eine systematische Vergabe von Sachnummern und Teilefamilien-IDs nur sehr aufwändig zu realisieren, wenn auch nicht unmöglich. Anstrengungen wurden unternommen, eine einheitliche Systematik in die Benennung der Teilefamilien-IDs zu etablieren, die Vorschläge werden in entsprechenden Fachkreisen diskutiert. Ein Ergebnis lag allerdings bis zum Druck dieser Arbeit noch nicht vor, so dass die prototypische Anwendung der Filterklasse 1 nicht durchgeführt werden konnte.

5.5 Filterklasse 2: komplementäre Analysen

5.5.1 Voraussetzung

Zielsetzung ist es, den Aufwand, der in die Plausibilisierung investiert wurde, nur einmalig durchzuführen. Durch die Unterstützung der Filterklasse 2 und das Auslesen des Plausibilisierungsattributs ist dieses Wissen allen weiteren Auswertungen und Werkzeugen nutzbar zu machen, die auf die identische Datenbasis aufsetzen. Voraussetzung ist eine klare Rollendefinition der beteiligten Mitarbeiter und die Schaffung eines Verständnisses, dass die bewerteten Informationen für nachgelagerte Werkzeuge und Auswertungen einen Mehrwert mit sich bringen.

5.5.2 Beispielwerkzeug Malaga

Das Prozess- und Layoutwerkzeug *Malaga* (*Materials flow Analysis – Layout Analysis – Graphic Association*) der Firma *ZIP Industrieplanung* wird bei dem deutschen Automobilhersteller als integrierter Bestandteil der Logistikplanung der Digitalen Fabrik verwendet. In den verschiedenen Werken ist *Malaga* in Kombination mit *MicroStation* in Verwendung und wird für die statische Analyse und Optimierung des Materialflusses für geplante Logistikprozesse genutzt. *Malaga* ist über eine bidirektionale Schnittstelle an das Planungssystem *DPE* angebunden.

Malaga ist für die Belieferungssimulation ein gut verwendbares Beispiel für eine komplementäre Analyse, da die verwendete Anzahl an Eingangsdaten eine hohe Deckungsgleichheit mit der Belieferungssimulation bietet. Somit ist die Voraussetzung geschaffen, Unvollständigkeiten und Inkonsistenzen bereits mit *Malaga* zu identifizieren und zu korrigieren. Durch die bidirektionale Schnittstelle wird sichergestellt, dass korrigierte Datensätze wieder im zentralen Planungssystem zur Verfügung stehen. Auf welche Art und Weise bereits eine Vollständigkeitsprüfung an Datensätzen stattgefunden hat, lässt sich durch ein Attribut erkennen. Dieses Attribut wird von Systemen, die auf den Datensatz zugreifen, ausgelesen und ggf. ergänzt. Das wirkt sich nicht nur positiv auf den Reifegrad der Planung aus, zusätzlich kann Zeit für die wiederholte Plausibilisierung von Datensätzen eingespart werden.

Abbildung 5.6 zeigt identifizierte Unvollständigkeiten an Transportketten mit dem komplementären Werkzeug *Malaga*.

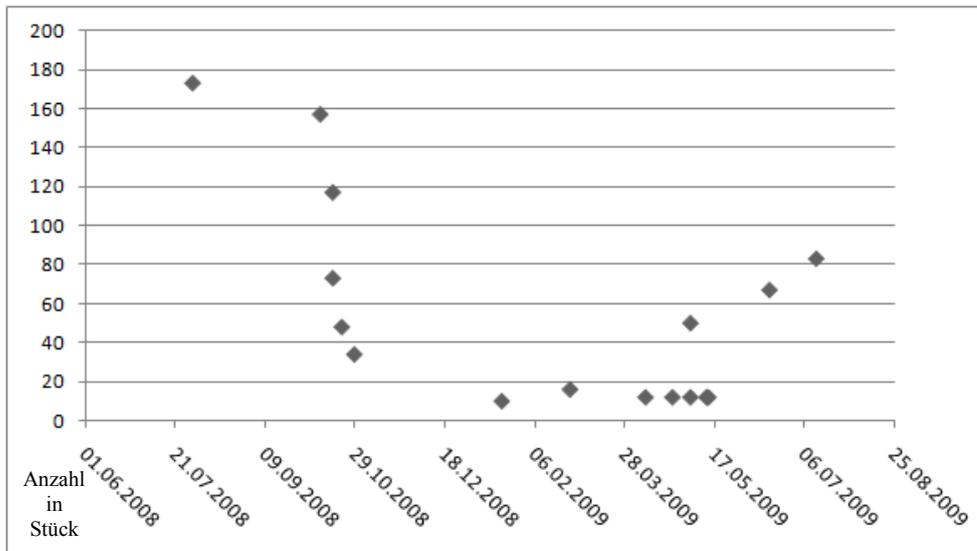


Abbildung 5.6: Anzahl der korrigierten Fehler eines komplementären Werkzeuges

5.5.3 Voraussetzung und Status der prototypischen Umsetzbarkeit

Gegenwärtig ist eine prototypische Umsetzung der Filterklasse automatisiert nicht möglich, da das Plausibilisierungsattribut in dem zentralen Planungssystem der Digitalen Fabrik implementiert werden muss. Dies wird über ein Lastenheft definiert und in das Releasemanagement der Digitalen Fabrik integriert. Durch die Implementierung in das zentrale Planungssystem ist diese Information über das Reporting des *SAP-BI* wieder auszugeben. Die zentrale Integration ist die Grundvoraussetzung für die automatisierte Prüfung zur Identifikation eines bereits korrigierten Datensatzes.

5.6 Filterklasse 3: Entscheidungsbaum-Schwellwertanalyse

5.6.1 Definition des Werkzeugs

Für die Untersuchung der Eingangsdaten für Belieferungssimulationen mit der Filterklasse „Entscheidungsbaum-Schwellwertanalyse“ wird ebenfalls auf *MySQL*-Abfragen zurückgegriffen. Der Grund hierfür ist, dass die Fragestellung sich durch ein Regelwerk mit strukturierten Abfragen vollständig mit *MySQL* abbilden lässt und die notwendige Transparenz im Code vorhanden ist, den Prozess nachzuvollziehen.

5.6.2 Aufbau Entscheidungsbaum

Prinzipiell kann jedes beliebige Attribut mit Hilfe eines Entscheidungsbaumes untersucht werden. Voraussetzung ist die Existenz bzw. die Erstellung eines Entscheidungsbaumes, der anhand der vorhandenen Informationen im Planungssystem auch baureihenübergreifend die Nachvollziehbarkeit von realen Entscheidungen ermöglicht. Exemplarisch wird nachfolgend ein Entscheidungsbaum ausgewählt und aufgebaut. Durch den Anspruch, die Entscheidungsbaume generisch für alle Baureihen zu definieren, kann ein weiterer Skaleneffekt erzielt werden: der

Aufbau eines Entscheidungsbaumes ist ein einmaliger Aufwand, für alle vorhandenen und künftigen Baureihen, sofern keine globalen Paradigmenwechsel die einzelnen Fragen obsolet machen. In solchen Fällen muss ein Entscheidungsbaum angepasst bzw. neu aufgebaut werden.

Als Beispiel für die prototypische Umsetzung wird folgende Fragestellung definiert: ist der gewählte Standardbelieferungsprozess richtig? Diese Entscheidung wird im Planungsprozess durch den Logistikplaner getroffen. Dieser definiert an Hand eines Fragenkataloges den passenden Prozess und pflegt diesen für jedes geplante Bauteil in das Logistikplanungssystem ein.

Um den Logistikplaner bei einer effizienten Planung zu unterstützen, können aus vorhandenen Baureihen einzelne Teilefamilien übernommen werden, die dann für die aktuell zu planende Baureihe angepasst werden müssen. Auch hier ist der Trend zu einer verstärkten JIS-Anlieferung von Baureihenprojekt zu Baureihenprojekt zu erkennen. Dies kann auf den Trend zurückgeführt werden, dass immer mehr Derivate auf den gleichen Montagebändern montiert werden, die Logistikflächen dabei jedoch aufgrund gegebener Produktionshallen nicht vergrößert werden können. Dadurch ist die Wahl des richtigen Belieferungsprozesses eine der Grundsatzentscheidungen im Planungsprozess. Das Planungssystem verknüpft die einzelnen Bauteile mit den passenden Lagerformen (JIS-Puffer, JIT-Puffer, LLZ-Supermarkt, AKL) und weist die entsprechenden Lagerflächen sowie die Transportmittel zu.

Ein falsch gewählter Belieferungsprozess hat Einfluss auf den gesamten Materialfluss. Aus diesem Grund soll die Wahl der Standardbelieferungsform mit der Filterklasse Entscheidungsbaum-Schwellwertanalyse exemplarisch überprüft werden. Der verwendete Entscheidungsbaum ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

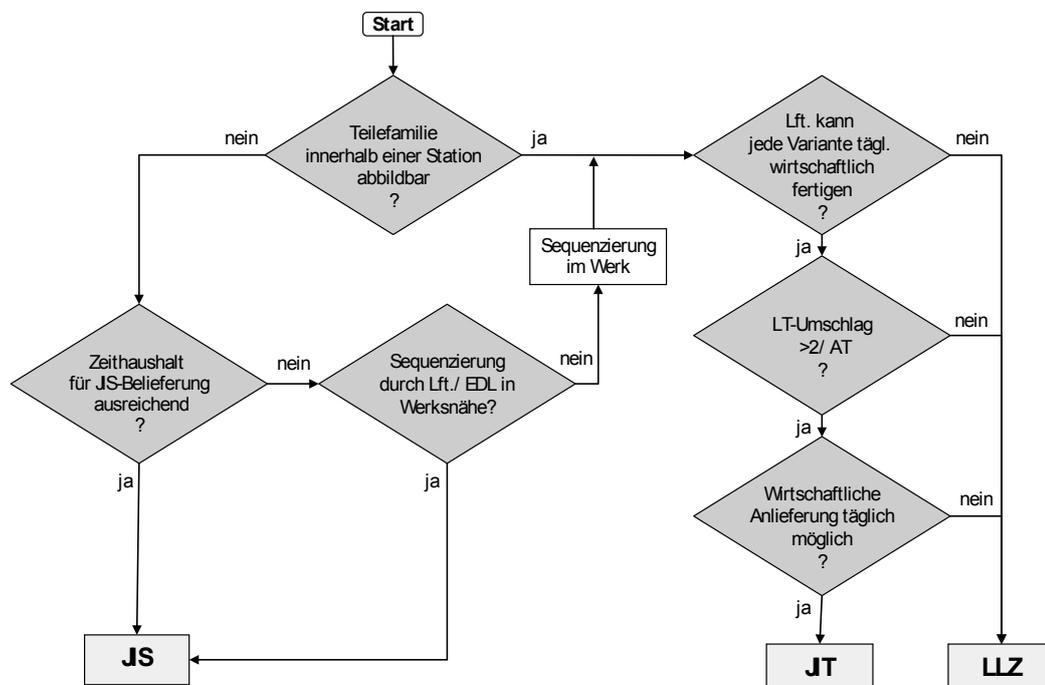


Abbildung 5.7: Entscheidungsfindung des Standardbelieferungsprozesses

5.6.2.1 Definition der Entscheidungen im Entscheidungsbaum

Von den in Abbildung 5.7 definierten sechs Fragen kann nur der LT-Umschlag > 2 je Arbeitstag direkt an Hand der vorliegenden Daten beantwortet werden. Die anderen fünf Entscheidungen können nicht direkt an Attributen im Mengengerüst beantwortet werden. Daher müssen diese Entscheidungen durch die Definition von Fragen in Unternetzwerken ermittelt und akkumuliert werden.

Der generelle Aufbau wurde wie folgt gestaltet: um die Entscheidung qualifiziert bewerten zu können, müssen eindeutige Attribute im Planungssystem vorhanden sein. Es werden so lange Unternetzwerke aufgebaut, bis die Beantwortung der einzelnen Unternetzwerkfragen direkt mit vorhandenen Attributen abgebildet werden können. Durch die Aggregation dieser Unterfragen können somit Kennwerte errechnet werden, mit deren Hilfe sich die Entscheidungen qualifiziert treffen lassen.

Prinzipiell sucht das Regelwerk immer nach einer positiven Antwort. Dadurch wird die Entscheidung mit JA beantwortet und der Entscheidungsbaum entscheidet positiv.

Entscheidungsfrage 1: Ist die Teilefamilie innerhalb einer Station abbildbar?

Die Entscheidung, ob eine Teilefamilie innerhalb einer Station abbildbar ist (genügend Pufferplatz vorhanden), ergibt sich aus dem Vergleich von Flächenangebot und Flächennachfrage. Wenn das Flächenangebot am Bereitstellort größer ist als die Nachfrage, so ist eine positive Entscheidung (JA) plausibel. Die benötigte Maßeinheit ist Quadratmeter (m^2). Das Flächenangebot am Bereitstellort kann aus dem Mengengerüst in der Tabelle LSR entnommen werden, ebenso das Behälterprinzip. Wenn das Behälterprinzip auf Grund der frühen Planungsphase noch nicht definiert wurde, so ist es mit dem Regelwerk des Simulationsgerüsts zu ermitteln. Der Flächenbedarf ist nicht als Attribut vorhanden. Um den Flächenbedarf zu ermitteln, ist die Anzahl an Sachnummern einer Teilefamilie pro Bereitstellort (sortenreine Belieferung) zu multiplizieren mit der Grundfläche des eingesetzten Ladungsträgers. Die Grundfläche ergibt sich aus der Multiplikation von Länge und Breite des Ladungsträgers, die als Attribute im Mengengerüst vorhanden sind (vgl. Tabelle 5.7).

Beschreibung	Formelzeichen	Einheit
Anzahl SNR pro TF	$\sum SNR_{TF}$	Stück
Grundfläche pro Ladungsträger	a_{LT}	m^2
Behälterprinzip	Bp_{LT}	Stück
Flächenangebot am BO	a_{BO}	m^2
Flächenbelastung durch weitere TF	$a_{TFvorhanden}$	m^2

Tabelle 5.7: Parameter Entscheidungsfrage 1 der Filterklasse 3

Formel 5.1 errechnet, ob die Teilefamilie an der Station flächentechnisch abgebildet werden kann:

$$\sum \text{SNR}_{\text{TF}} * a_{\text{LT}} * B_{\text{pLT}} < a_{\text{BO}} - a_{\text{TFvorhanden}}$$

Formel 5.1: Ist die Teilefamilie an der Station abbildbar?

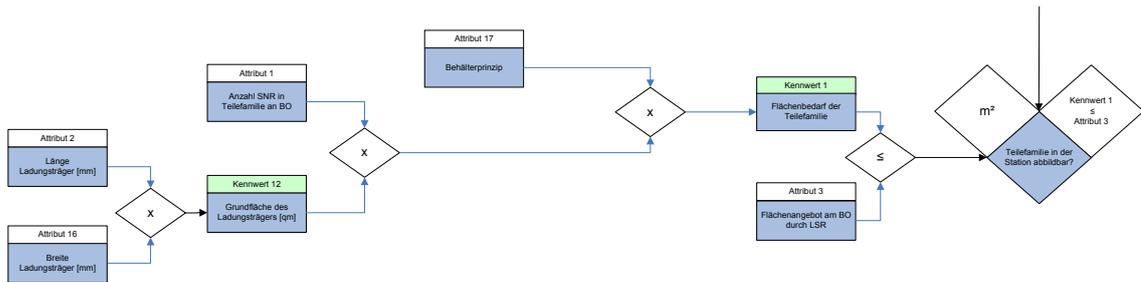


Abbildung 5.8: Entscheidungsast 1 der Filterklasse 3

Entscheidungsfrage 2: Ist der Zeithaushalt für eine JIS-Belieferung ausreichend?

Die Entscheidung, ob der Zeithaushalt für eine JIS-Belieferung ausreichend ist, wird durch den Vergleich der Zeithaushalte von Bereitstellung und Montage getroffen. Wenn die Logistik den benötigten Ladungsträger von dem Moment der Informationsübertragung (Bestellung) zum Lieferanten bis zur Auslieferung an den Bereitstellort versorgen kann, bevor die entsprechende Karosse den entsprechenden Verbauort passiert, ist der Zeithaushalt ausreichend. Maßeinheit sind Minuten (min). Die Logistik muss von einer störungsfreien Montage ausgehen (höchste Anspannung der Logistik), d.h. die entsprechende Karosse durchläuft die Montagebänder reibungslos ohne Bandstillstand, Nacharbeit oder Qualitätsauditierungen. Die Ermittlung des Zeithaushaltes der Montage ergibt sich aus dem Produkt von Karosserienummer des Verbauortes mit dem Montagetakt. Die Karosserienummer ist der Platz des Fahrzeuges innerhalb der Montagehalle, beginnend vom Anfang der Produktionslinie. Die Karosserienummer des Verbauortes findet sich als Attribut „MaZo-Karosserie“ im Mengengerüst, der Takt ist im Logistikplanungssystem nicht hinterlegt, kann aber aus vorhandenen Parametern berechnet werden.

Die Arbeitsstunden pro Tag finden sich im Mengengerüst unter dem Attribut „Arbeitsstd_Tag“, das mit der Anzahl an gebauten Fahrzeugen pro Tag geteilt wird (Quotient aus Nettoarbeitszeit und der Baurate/Arbeitstag). Die Anzahl der Fahrzeuge wird mit dem Produkt aus der maximalen „LP-Baurate“ und der maximalen „LP-Prozessbaurate“ ermittelt. Die maximalen Fahrzeuge pro Tag sind für die Taktermittlung anzusetzen, da in diesem Fall bei einer gleichbleibenden Gesamtarbeitszeit der Takt am geringsten ist und damit die größte Leitungsfähigkeit der Logistik gefordert wird.

Auf der anderen Seite steht der Zeithaushalt der Bereitstellung. Dieser ist die Summe aus der Zeit des Informationsflusses zu dem entsprechenden Lieferanten, die externe Transportzeit über das öffentliche Verkehrsnetz, die interne Transportzeit bis zum Bereitstellort sowie einem Sicherheitszuschlag. Hierbei lassen sich nicht alle Parameter direkt aus dem Mengengerüst

berechnen, die Summanden Informationsfluss und Sicherheit können nicht ermittelt werden. Sollten beide Null ergeben, wäre die Aktionszeit unter Umständen zu kurz und die Entscheidung, ob der Zeithaushalt für eine JIS-Belieferung ausreichend ist, könnte vorschnell zu Gunsten einer JIS-Belieferung fallen. Um der Realität gerecht zu werden, werden hier als Werte angenommen, die auf Erfahrungen der Logistikplaner beruhen, allerdings systemseitig nicht implementiert sind. Sie haben zudem die Funktion, nach dem Vorsichtsprinzip gewisse Zeitpuffer mit in die Kalkulation einfließen zu lassen. Im Folgenden sind diese Werte als „Annahmen“ gekennzeichnet und werden in einer zentralen Annahmentabelle transparent verwaltet. Dies ist auch für die Feinjustierung des Entscheidungsbaumes eine relevante Stellgröße.

Der Summand der externen Transportzeit setzt sich zusammen aus der Handlingszeit des Lieferanten (Annahme), einer möglichen Gebindeverdichtung (Annahme) sowie aus der Transportzeit, welche sich wiederum aus der Entfernung zum Lieferanten und einer gemittelten Durchschnittsgeschwindigkeit (Annahme) ermittelt. Die Entfernung zum Lieferanten bezeichnet hierbei die Strecke von der Sequenzbildung der JIS-Teile bis zum Wareneingang. Bei der gemittelten Durchschnittsgeschwindigkeit des Transportes ist ebenfalls nach dem Vorsichtsprinzip zu verfahren, um eventuelle Verzögerungen mit einzurechnen. Die Handlingszeit des Lieferanten sowie die Gebindeverdichtung sind ebenfalls Zeitpuffer, die den Materialfluss verlangsamen. Der Hintergrund ist, dass mit zu geringen Logistikzeiten die Realität nur bedingt abgebildet werden kann – und dies ist bei der Prüfung der Datenqualität kontraproduktiv. Als weiterer Summand ist die interne Transportzeit relevant. Diese setzt sich zusammen aus der Handlingszeit am Wareneingang (MTM-Wert) und der internen Fahrzeit zwischen Wareneingangspuffer und Bereitstellort, die wiederum berechnet wird aus dem Produkt der Durchschnittsgeschwindigkeit des eingesetzten Flurförderzeuges und der Entfernung zwischen Wareneingangspuffer und Bereitstellort. Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist im Mengengerüst vorhanden, die Wegstrecke zwischen Wareneingangspuffer und Bereitstellort muss erst ermittelt werden, beispielsweise über ein Graphenmodell (vgl. Kapitel 8 - Anlage).

Beschreibung	Formelzeichen	Einheit
Zeithaushalt Belieferung	$t_{\text{Beflieferung}}$	min
Informationsfluss -> Lieferant	$t_{\text{->Lieferant}}$	min
Zeit zw. IB-Impuls und Montagestation1	$t_{\text{IB->M1}}$	min
Entfernung zum Lieferanten	$S_{\text{Lieferant->Daimler}}$	m
Durchschnittsgeschwindigkeit LKW	v_{LKW}	m/s
Zeit für Gebindeverdichtung	t_k	min
Handlingszeit Lieferant	$t_{\text{HandlingLieferant}}$	min
Sicherheitszuschlag	$Z_{\text{Sicherheit}}$	%
Entfernung WE->Lager	$S_{\text{WE->Lager}}$	m
Durchschnittsgeschwindigkeit FFZ _n	v_{FFZn}	m/s
Handlingszeit WE->Lager	$t_{\text{HandlingWE->Lager}}$	min
Entfernung Lager->BO	$S_{\text{Lager->BO}}$	m
Durchschnittsgeschwindigkeit FFZ _m	v_{FFZm}	m/s
Handlingszeit Lager->BO	$t_{\text{HandlingLager->BO}}$	min

Tabelle 5.8: Parameter Entscheidungsfrage 2.1 der Filterklasse 3

Die Formel 5.2 im Entscheidungsast 2.1 errechnet, ob der Zeithaushalt für die Bereitstellung ausreichend ist:

$$\begin{aligned}
 t_{\text{Beflieferung}} = & t_{\text{->Lieferant}} + t_{\text{IB->M1}} + \left(\left(\frac{S_{\text{Lieferant->Daimler}}}{v_{\text{LKW}}} + t_k + t_{\text{HandlingLieferant}} \right) * Z_{\text{Sicherheit}} \right) \\
 & + \left(\left(\frac{S_{\text{WE->Lager}}}{v_{\text{FFZn}}} + t_{\text{HandlingWE->Lager}} \right) + \left(\left(\frac{S_{\text{Lager->BO}}}{v_{\text{FFZm}}} + t_{\text{HandlingLager->BO}} \right) \right)
 \end{aligned}$$

Formel 5.2: Zeithaushalt für die Bereitstellung

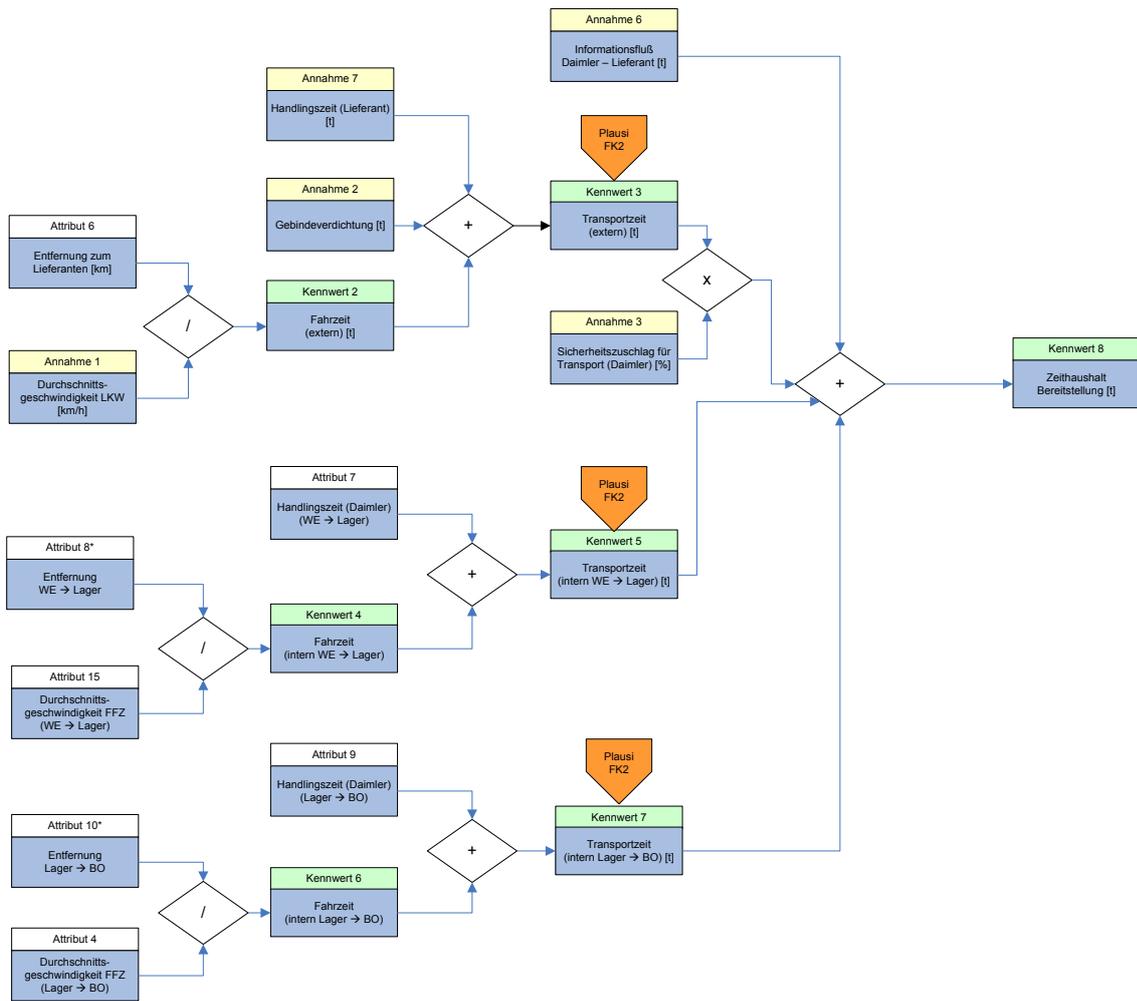


Abbildung 5.9: Entscheidungsast 2.1 der Filterklasse 3

Beschreibung	Formelzeichen	Einheit
Zeithaushalt Montage	$t_{Montage}$	min
maximale Baurate	br_{max}	Stück
maximale Prozessbaurate	pbr_{max}	%
Arbeitszeit/AT	t_{BNZ}	min
Karosenummer des BOs	Nr_{BO}	fortlaufende Nummer

Tabelle 5.9: Parameter Entscheidungsfrage 2.2 der Filterklasse 3

Die Formel 5.3 im Entscheidungsast 2.2 errechnet, wie lange die Karosse benötigt, die Station zu erreichen, an welcher das Bauteil benötigt wird:

$$t_{\text{Montage}} = t_{\text{BNZ}} / (br_{\text{max}} * pbr_{\text{max}}) * Nr_{\text{BO}}$$

Formel 5.3: Zeithaushalt für die Montage

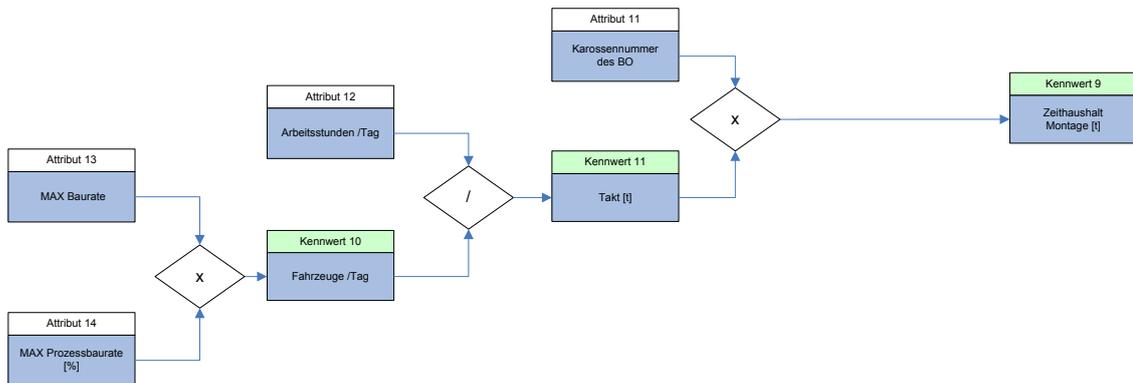


Abbildung 5.10: Entscheidungsast 2.2 der Filterklasse 3

Beschreibung	Formelzeichen	Einheit
Zeithaushalt Bereitstellung	$T_{\text{Bereitstellung}}$	min
Zeithaushalt Montage	T_{Montage}	min

Tabelle 5.10: Parameter Entscheidungsfrage 2.3 der Filterklasse 3

Die Formel 5.4 im Entscheidungsast 2.3 errechnet, ob der JIS-Zeithaushalt ausreichend ist, das benötigte Bauteil abrissfrei zu versorgen:

$$T_{\text{Bereitstellung}} \leq T_{\text{Montage}}$$

Formel 5.4: Ist der Zeithaushalt für die JIS-Belieferung ausreichend?

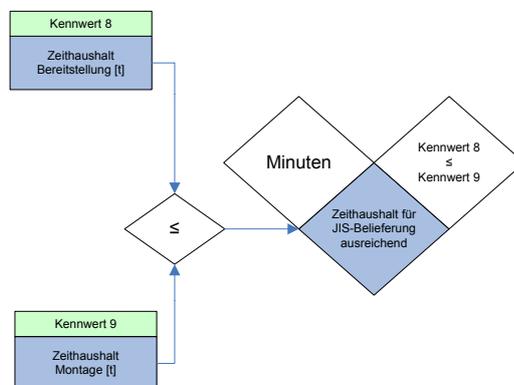


Abbildung 5.11: Entscheidungsast 2.3 der Filterklasse 3

Ermittlung der Wegstrecke Wareneingang – Bereitstellort

Die Ermittlung der Wegstrecke zwischen den Wareneingängen und den Bereitstellorten, teilweise auch über Zwischenlager, ist eine Voraussetzung für die Berechnung der internen Transportzeit. Um diese Berechnung zu ermöglichen, wird ein Graphenmodell aufgebaut. Aus den Entfernungsmatrizen können die Wegstrecken zwischen den einzelnen Stationen automatisiert und performant ausgelesen werden, ohne das Simulationswerkzeug zu öffnen. Dies ist von Bedeutung, wenn die Informationsqualität ohne anschließende Simulation bestimmt werden soll oder in der frühen Planungsphase noch kein Simulationsmodell aufgebaut wurde. Der Aufbau des Graphenmodells wird im Anhang beschrieben.

Entscheidungsfrage 3: Ist der Ladungseinheitenumschlag pro Tag größer zwei?

Bevor die Entscheidung über den Ladungseinheitenumschlag getroffen werden kann, ist die Umrechnung auszuarbeiten: die benötigten Bauteile pro Arbeitstag werden ermittelt, in dem das Produkt Anzahl Bauteile/AT aus Baurate/AT, Prozessbaurate/AT und der Anzahl Bauteile pro Fahrzeug gebildet werden. Im nächsten Schritt wird die Anzahl Bauteile/Ladeinheit ermittelt aus dem Produkt der Anzahl Bauteile/LT, der Anzahl Behälter/Lage und der Anzahl Lagen. Aus diesen Ergebnissen kann jetzt die Anzahl LE/AT ermittelt werden, in dem die Anzahl Bauteile/AT durch die Anzahl Teile pro LE geteilt werden. Dieser Hintergrund ist wichtig für das Entstehen der Kennzahl in Produktionsplanungssystem und dient zusätzlich als weitere Plausibilisierungsschleife.

Im Anschluss ist der Kennwert LE-Umschlag/Tag zu errechnen. Dies geschieht durch den Subtraktion der Anzahl Bauteile/LE von der benötigten Anzahl Bauteile/Tag. Die Anzahl Bauteile/Tag wird ermittelt aus der Multiplikation der Baurate, der Prozessbaurate sowie der Anzahl an zu verbauenden Teilen je Fahrzeug. Die Anzahl der Teile pro LE ermittelt sich aus der Multiplikation Anzahl Bauteile/LT, Anzahl Behälter/Lage sowie der Anzahl Lagen. Der ermittelte Kennwert LE-Umschlag/Tag wird mit der im Entscheidungsbaum verankerten Zwei verglichen.

Entspricht der Wert kleiner bzw. gleich zwei, so wird der Entscheidungsbaum bei NEIN fortgesetzt und die Entscheidung zu Gunsten einer LLZ-Belieferung getroffen. Sollte er größer Zwei sein, folgt die nächste Entscheidung.

Beschreibung	Formelzeichen	Einheit
Baurate	br	Stück
Prozessbaurate	pbr	%
Anzahl Teile/Fahrzeug	$n_{\text{Teile/Fzg}}$	Stück
Anzahl Teile/LT	$n_{\text{Teile/LT}}$	Stück
Anzahl Behälter/Lage	$N_{\text{Behälter/Lage}}$	Stück
Anzahl Lagen	n_{Lagen}	Stück
Arbeitstage	AT	Tage

Tabelle 5.11: Parameter Entscheidungsfrage 3 der Filterklasse 3

Die Formel 5.5 im Entscheidungsast 3 errechnet, ob ein Umschlag eines Ladungsträgers >2 ist:

$$\frac{((br * pbr * n_{\text{Teile/Fzg}}))}{(n_{\text{Teile/LT}} * n_{\text{Behälter/Lage}} * n_{\text{Lagen}})} > 2AT$$

Formel 5.5: Ist der Behälterumschlag > 2 am Arbeitstag?

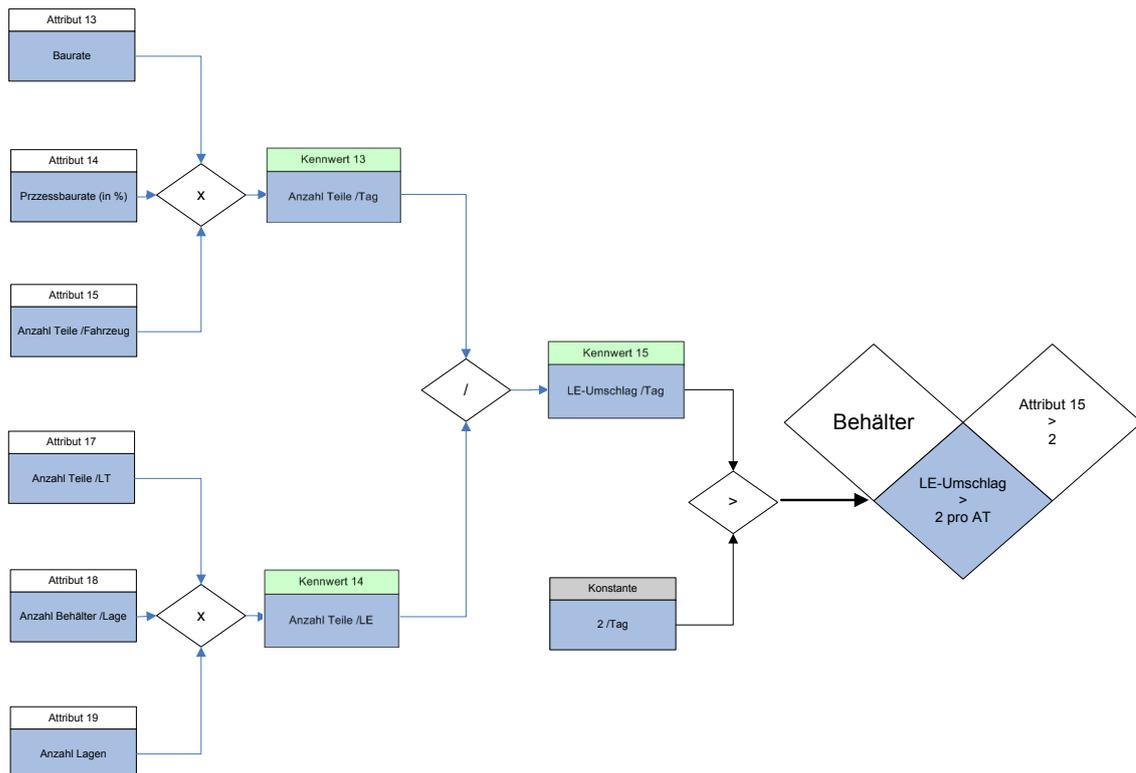


Abbildung 5.12: Entscheidungsast 3 der Filterklasse 3

Entscheidungsfrage 4: Ist eine wirtschaftliche Anlieferung täglich möglich?

Diese Entscheidung beschäftigt sich mit der Frage, ob der Lieferant sowohl täglich als auch wirtschaftlich anliefern kann. Der Hintergrund ist lieferantenspezifisch und beinhaltet die Variablen *Entfernung zum Werk* sowie ob in *Losgrößen* gefertigt wird. Abbildung 5.13 verdeutlicht dies exemplarisch, das Produktionswerk sitzt für diese Abbildung in Süddeutschland.

Die Entscheidung, ob eine wirtschaftliche Anlieferung täglich möglich ist, liegt in der Kompetenz des Lieferanten. Zwischenstufen wie Lieferantenlager in Nähe des Produktionsstandortes der Kunden oder eine tägliche Belieferung eines Lieferanten außerhalb Deutschlands machen eine tägliche Anlieferung möglich, allerdings nicht unbedingt wirtschaftlich. Beide Alternativen sind als Angebote einzuholen und mit Hilfe eines Kalkulationswerkzeuges zu vergleichen. Diese Entscheidung ist bisher nicht im Produktionsplanungssystem möglich und wird daher manuell abgefragt. Daher kann die

Entscheidung erst qualifiziert getroffen werden, sobald die Lieferanten festgelegt und zertifiziert sind. Alternativ kann der Lieferant aus der Vorgängerbaureihe bzw. einer horizontal verwandten Baureihe mit Hilfe der Modularisierung übernommen werden. Zudem müssen die Angebote vergleichbar sind und letztlich die Informationen im Produktionsplanungssystem hinterlegt werden. Die Umsetzung dieser Entscheidungsfrage war wegen der fehlenden Informationen im Planungssystem nicht möglich. Durch die Struktur des Entscheidungsbaumes ist das Ergebnis zwar hilfreich, allerdings ist die Entscheidung auch ohne Beantwortung der täglichen wirtschaftlichen Anlieferung möglich.

Art der Fertigung	Sitz des Lieferanten	Lieferanten-Lager	Wirtschaftliche Anlieferung täglich möglich?
Losgröße	China		Nicht möglich
kontinuierlich			Nicht möglich
Losgröße	China	Süd-deutschland	Möglich
kontinuierlich			Möglich
Losgröße	Deutschland		Nicht möglich
kontinuierlich			Möglich
Losgröße	Deutschland	Süd-deutschland	Möglich
kontinuierlich			Möglich

Abbildung 5.13: Aspekt der Entscheidungsfindung einer täglichen wirtschaftlichen Anlieferung bei einer Produktion in Süddeutschland

5.6.2.2 Ergebnisdarstellung

Das Ergebnis der SQL-Abfrage von Filterklasse 3 wird im Anschluss in einer Deltaliste (vgl. Kapitel 5.3.5.4) gespeichert, in welcher die Auswertungen der Datenplausibilisierung für die Teilefamilien hinterlegt werden. Diese Auswertung kann drei Ergebnisse zurückgeben:

- der Datensatz ist nicht vollständig, so dass keine Plausibilisierung möglich ist
- der Datensatz ist vollständig und die Plausibilisierung kann durchgeführt werden. Das Ergebnis zeigt Auffälligkeiten, so dass eine nachträgliche Plausibilisierung durch den Planer notwendig ist.
- der Datensatz ist vollständig und die Plausibilisierung kann durchgeführt werden. Das Ergebnis zeigt keine Auffälligkeiten und wird nicht separat ausgewiesen.

Die Referenz für die Vollständigkeit der Teilefamilien ist die Tabelle tf01, in welcher sich alle für die Baureihe relevanten Teilefamilien befinden, vgl. hierzu Abbildung 5.14.

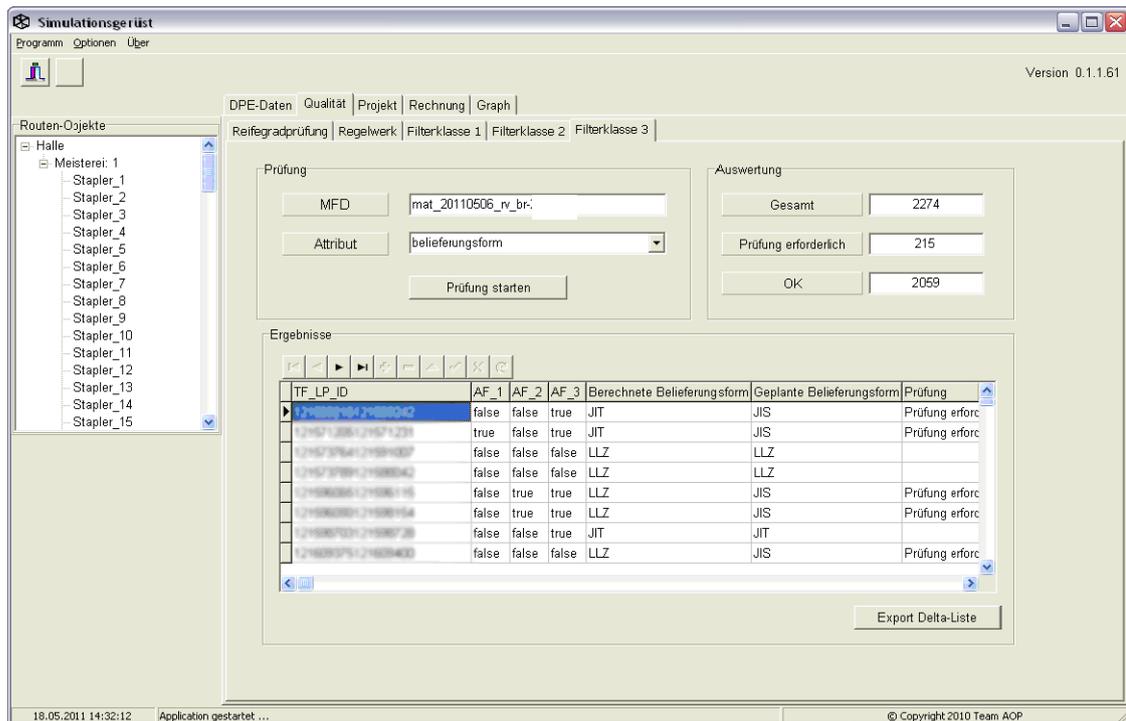


Abbildung 5.14: Auswertung Filterklasse 3 im Simulationsgerüst

5.6.2.3 Protokollierung in der Deltaliste

Die mit der Datenplausibilisierung ermittelten Informationen werden in eine Deltaliste geschrieben (vgl. Tabelle 5.12), welche den verantwortlichen Logistikplaner bei der Sicherstellung der Planungsqualität unterstützt. Die Deltaliste ist die Ergebnistabelle der Filterklassenprüfung. Die vorgestellten Methoden können nicht die Plandaten im Planungssystem der Logistik überschreiben, sondern spiegeln alle identifizierten Planung inkonsistenzen an den verantwortlichen Logistikplaner zurück. Dadurch wird die Möglichkeit geboten, die Planungen nochmals zu hinterfragen und gegebenenfalls zu ändern. Damit vom System erkannte Inkonsistenzen nicht beim nächsten Plausibilisierungsdurchlauf wieder in die Deltaliste geschrieben werden, hat der Planer die Möglichkeit, im Planungssystem das Attribut „geprüft“ zu aktivieren. Diese Planungsdaten werden von dem Plausibilisierungsmethoden nun als korrekt identifiziert und nicht erneut überprüft. Sollten Umfänge nicht als Referenz für die Prüfung der Filterklassen vorhanden sein, ist dies im Planungssystem in der entsprechenden Eingabemaske zu kennzeichnen, um den Planer darauf hinzuweisen, dass in diesem Fall keine Referenzierung möglich ist.

1	A	B	C	D	E	F	G
	TF_OID	Belieferungsform_Daten	AF 1	AF 2	AF 3	Belieferungsform_Berechnung	Plausibilisierung
499	000074432	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
500	000074401	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
501	000074319	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
502	000074001	LLZ intern	False	True	False	JIS	*Fail*
503	000074112	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
504	000069399	LLZ intern	False	True	False	JIS	*Fail*
505	000069437	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
506	000111791	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
507	000111834	LLZ intern	False	True	False	JIS	*Fail*
508	000111850	LLZ intern	False	True	False	JIS	*Fail*
509	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
510	000111833	LLZ intern	False	False	True	JIT	*Fail*
511	000123216	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
512	000123240	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
513	000123001	LLZ intern	False	True	False	JIS	*Fail*
514	000123001	LLZ intern	False	True	False	JIS	*Fail*
515	000069401	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
516	000069336	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
517	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
518	000111727	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
519	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
520	000111746	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
521	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
522	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
523	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
524	000111833	LLZ intern	False	False	True	JIT	*Fail*
525	000111833	JIT	False	False	True	JIT	OK
526	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
527	000069336	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
528	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
529	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
530	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
531	000111833	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
532	000069336	JIT	False	False	True	JIT	OK
533	000069336	JIT	False	False	True	JIT	OK
534	000069336	JIT	False	False	True	JIT	OK
535	000069336	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
536	000069336	JIT	False	False	True	JIT	OK
537	000069336	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
538	000069336	LLZ intern	False	False	True	JIT	*Fail*
539	000069336	LLZ intern	False	False	True	JIT	*Fail*
540	000069336	LLZ intern	False	False	False	LLZ	OK
541	000069336	LLZ intern	False	True	False	JIS	*Fail*
542	000069336	LLZ intern	False	False	True	JIT	*Fail*
543							

Tabelle 5.12: Deltaliste „Standardbelieferungsform“

5.6.3 Zusammenfassung und Wertung der Filterklassen

[SAR82], [SAR94], und [SAR09] bemängelt, dass es keine Möglichkeit gibt, Datensätze inhaltlich qualitativ zu bewerten. Das Konzept der Filterklassen bietet erstmalig einen Ansatz, wie Transportketten inhaltlich bewertet werden können, bevor diese in der Belieferungssimulation verwendet werden. Dies kommt nicht nur der Aussagequalität der Belieferungssimulation zu Gute, sondern hat ebenfalls einen Einfluss auf die Datenqualität der gesamten Produktionsplanung. In diesem Kapitel wurde die Machbarkeit aufgezeigt. Das Konzept der Filterklassen bietet noch viel Potential: durch die Formulierung weiterer Regeln und durch die Anbindung weiterer Systeme zur Plausibilisierung wird der Forderung entsprochen, in kürzerer Zeit mit einer verbesserten Planungsqualität neue Baureihen auszuplanen.

5.6.4 Füllstandsmessung und Freigabequantil

Bevor ein belastbares Simulationsmodell aufgebaut wird, ist der Reifegrad (z.B.: Anzahl der ausgeplanten Sachnummern mit ihren Transportketten im Verhältnis zu allen Sachnummern eines Fahrzeuges) der Baureihenplanung zu prüfen. Dies ist unabhängig von der Bewertung durch die Filterklassen. Der Grad des Füllstandes der für die Analyse benötigten Informationen wird über die Anzahl der freigegebenen Teilefamilien realisiert. Freigegebene Teilefamilien enthalten nur eine zugeordnete Transportkette und bilden keine alternativen Möglichkeiten ab. Nicht freigegebene Teilefamilien können auch nicht verifizierte Transportketten enthalten, gerade wenn sich der Prozess noch in der Findungsphase befindet und die Lieferanten und die Standardbelieferungsform nicht komplett definiert sind. Die Gesamtanzahl an vollständig parametrisierten Teilefamilien bilden 100% des Füllstandes ab. Wenn einzelne Teilefamilien eine nicht vollständig parametrisierte Transportkette mit sich bringen, kann diese Teilefamilie nicht in der Belieferungssimulation verwendet werden. Dies führt dazu, dass einzelne Auswertungen wie Kreuzungsbelastungen und die Anzahl der benötigten FFZ nicht korrekt ermittelt werden können. Durch die unterschiedlichen Versorgungsprozesse sind auch Hochrechnungen nicht möglich. Vor jeder Auswertung ist mit Hilfe eines Füllstandsdiagramms die Aussagequalität zu bewerten. Prinzipiell sind Auswertungen mit weniger als 100% aller Teilefamilien möglich, dies beeinflusst jedoch die Aussagekraft der Simulationsstudie. Dies ist bei Aussagen zur gesamten Montagehalle zu berücksichtigen und der Dokumentation beizufügen. Grundsätzlich wird die Entscheidung, ob eine Belieferungssimulation mit weniger als allen Teilefamilien durchgeführt wird, gemeinsam zwischen Planer und Simulationsexperten definiert, der Planer wird für die eingeschränkte Aussagekraft bei einer Analyse von unter 100% sensibilisiert. Abbildung 5.15 zeigt die Füllstandsprüfung im Simulationsgerüst.

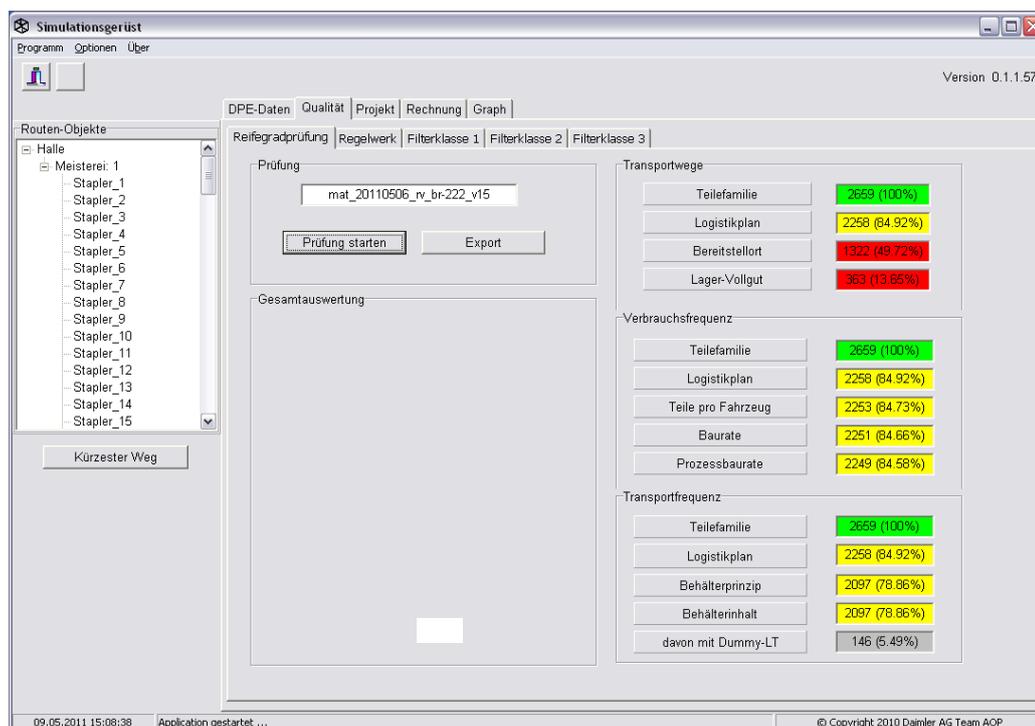


Abbildung 5.15: Füllstand der Eingangsdaten aus dem Planungssystem der Digitalen Fabrik

Im Gegensatz zur Simulationsstudie lässt sich die EBS-Analyse auch mit einem Füllstand von weniger als 100% durchführen. Dies ist begründet in den unterschiedlichen Sichtweisen der beiden Analysen. Die EBS-Analyse bewertet einzelne Transportketten hinsichtlich ihrer Plausibilität. Die Simulationsstudie hingegen zeigt die Ressourcen auf, die eine große Anzahl an Transportketten bedienen. Unvollständige bzw. nicht vorhandene Transportketten tangieren somit die Ressourcen der Simulationsstudie hinsichtlich der Anzahl an Ressourcen und deren Auslastung.

5.7 Aufbau Simulationsgerüst und Modellgenerierung

5.7.1 Das Regelwerk im Simulationsgerüst

5.7.1.1 Aufbau und Anwendung des Regelwerkes

Das Simulationsgerüst enthält die vorhandenen Daten aus dem Planungssystem der Digitalen Fabrik. Im folgenden Kapitel wird das Regelwerk aufgebaut, um die fehlenden relevanten Daten zu erschließen, sofern diese noch nicht ausgeplant wurden. Es gibt unterschiedliche Verfahren für die Speicherung und Nutzarmachung von Expertenwissen. Dazu gehören semantische Netze oder Wissensdatenbanken (Informationen Knowledge Database), beispielsweise nach [GR08] und [RG06]. Auch die Definition eines Regelwerkes ist zu diskutieren.

Dedizierte Transformationssprachen zur Formulierung eines Regelwerkes wie *RuleML* können digitale Informationen interpretieren. Obwohl diese Sprachen oft auf *XML* aufbauen, ist eine Regelformulierung ohne entsprechende Vorkenntnisse bzw. Schulungen nur beschränkt möglich. Einen Mehrwert bieten diese Transformationssprachen bei stark heterogenen Systemlandschaften. [EBE06] zeigt ein Konzept auf, welches Regeln aus semantischen Netzen automatisch in SQL-Abfragen übersetzt, um die Verwendung in relationalen Datenbanken zu ermöglichen. Ein großer Vorteil ist die einfache Transformation.

Im untersuchten Beispiel wurden alle Daten in einer relationalen Datenbank vorgehalten. Auf Grund der übersichtlichen Regeln für eine Informationsgenerierung in Belieferungssimulationen werden Transformationssprachen wie *RuleML* nicht benötigt. Die Systemlandschaft von Datenbank und Simulationswerkzeug erzeugt keine Deckungslücken bzw. Redundanzen, die eine entsprechende Semantik erfordern. Um sowohl den Aufwand für den Simulationsexperten bei der Formulierung von Regeln klein zu halten als auch die notwendige Transparenz der Belieferungssimulation zu gewährleisten, werden alle folgenden Regeln durch modellierte SQL-Abfragen aus der vorhandenen Datenbank aufgebaut. Mittelfristig bietet das Konzept OntoSQL von [EBE06] Potentiale, den Funktionsumfang von *RuleML* auf relationalen Datenbanken zu nutzen.

Der Aufbau des Regelwerks wird im Folgenden an ausgewählten Beispielen demonstriert. Dabei handelt es sich neben der Vervollständigung der Wareneingangsdaten und der Findung der Meldebestandsdaten auch um das Anlegen der Informationen eines Flurförderzeuges.

Das Fehlen benötigter Informationen wurde bereits mehrfach im Zusammenhang mit der Belieferungssimulation angesprochen. Einer der Gründe hierfür ist, dass diese Informationen

erst zu einem späteren Zeitpunkt im PEP erhoben und ausgeplant werden, die Belieferungssimulation aber planungsbegleitend zu einem früheren Zeitpunkt den größten Mehrwert bieten kann. Daher ist es notwendig, die fehlenden Informationen zu generieren. Dies geschieht unter dem Vorbehalt, dass bei dem Fortschreiten der Planung die echten Planungsdaten die vorab generierten Informationen überschreiben, um insbesondere bei Validierungs- und Verifikationsschleifen Unsicherheiten zu reduzieren.

Wenn das Regelwerk auf Grund fehlender Plandaten angewendet wurde, so ist das Verhalten des Modells akribisch zu prüfen und zu dokumentieren. Die korrekte Kommunikation der Simulationsergebnisse in einem unsicheren Umfeld ist eine der Herausforderungen, die akkurat gemeistert werden muss, um die notwendige Transparenz in die Simulationsstudie zu erlangen.

Im Folgenden wird exemplarisch ein Regelwerk aufgebaut, mit dessen Hilfe die fehlenden Daten generiert werden können. Dieses Regelwerk ist im Simulationsgerüst implementiert.

Regel: Anlegen von Flurförderzeugen

In der Logistikplanung sind keine Detailinformationen zu Flurförderzeugen hinterlegt. Da diese Fahrzeuge aber zwingend für die Materialversorgung notwendig sind, müssen diese fehlenden Ressourcendaten angelegt und ergänzt werden. Es wird im vorliegenden Beispiel ein „Stapler (klein)“ mit den relevanten technischen Daten eingeführt und definiert, dass die Steuerung über einen zentralen Bahnhof erfolgen soll. Weiter wird der Stapler einem Versorgungsprozess zugeordnet und für den Simulationsparameter „Anzahl Fahrzeuge“ ein Initialwert übergeben.

```
INSERT INTO Flurfoerderzeug
(Bezeichnung, Geschwindigkeit, Laenge, Breite, Ladekapazitaet,
Steuerung, Verfuegbarkeit, Anzahl, Bahnhof)
VALUES
("Stapler_Klein", 5 , 2.5 , 1.2 , 2 , "Fifo" , 98.5, 3, "OG");
```

```
UPDATE Versorgungsprozesse
SET
Fahrzeuge = "Stapler_Klein",
Abrufmedium = "Knopfabruf",
Belieferungsform = "JIT",
Versorgungsprozess = "Direktverkehr"
WHERE
Bezeichnung = "JIS_EG_OG_Direkt_Stapler";
```

Regel: Implementierung der Anlieferzeiten

Im folgenden Beispiel sind noch keine Anlieferzeiten für die Wareneingänge definiert. Die Ausplanung geschieht im Planungsprozess erst, wenn die tatsächlichen Lieferanten ausgewählt wurden und eine Feinplanung bezüglich Anlieferintervalle erfolgt ist. Ergänzt werden die Ankunftszeiten der Bauteile auf Grund von Erfahrungswerten anderer oder vorheriger Baureihen.

```
UPDATE Produkte
SET
Wareneingangszeiten = "MO-0800;DI-0800;MI-0800;DO-0800;FR-0800"
WHERE
Produkte.Wareneingangszeiten Is Null;
```

Regel: Ermittlung des Meldebestandes

Ein weiteres Beispiel ist die Errechnung der Meldebestände. Der Meldebestand wird erreicht, wenn ein Ladungsträger am Bereitstellort eine kritische Menge erreicht hat, die der Logistik eine Nachversorgung ohne einen Abriss der Fertigung ermöglicht. Mathematisch errechnet sich ein Meldebestand von einem halbvollen Ladungsträger als

$$\text{Meldebestand} = x / 2 * (n - 1)$$

wobei n die Anzahl der Ladungsträger am Bereitstellort und x die Anzahl der in einem Ladungsträger enthaltenen Bauteile ist. Die Regel zur Berechnung des Meldebestandes greift nur, wenn keine Informationen in der Datenbank hinterlegt wurden und die Anzahl an Bauteilen eines Ladungsträgers ungleich null ist, da dies auf ein bisher nicht ausgeplantes Bauteil schließen lässt.

```
UPDATE Produkte
SET Meldebestand = Teile_pro_Ladungstraeger / 2 * (Behaelteranzahl - 1)
WHERE
Meldebestand Is Null AND Not Teile_pro_Ladungstraeger = 0;
```

Diese Beispiele verdeutlichen, wie Wissen durch die Formulierung von Regeln abgebildet werden kann. Dabei wurde die Abfragesprache SQL verwendet, da die Syntax weit verbreitet ist und Werkzeuge zur Regelformulierung leicht eingesetzt werden können. Die Formulierung des Regelwerkes wird von dem Simulationsexperten durchgeführt, der das Wissen der Planer durch Interviews und Erfahrungswerte der Simulation zugänglich macht. Der Aufbau des Regelwerkes durch simulationsfremde Mitarbeiter wird vermieden. Das Regelwerk ist direkt im Simulationsgerüst zu formulieren, um Zwischenschritte wie zusätzliche Datenbanken zu vermeiden. Dies beruht auf der Erkenntnis, dass viele temporäre Datenbanken zur Unübersichtlichkeit bzgl. der Datenaktualität führen.

5.7.1.2 Import der Informationen aus der Logistikplanung

Vor dem Einspielen des aktuellen Standes der Logistikplandaten wird der Inhalt der Simulationsdatenbank zurückgesetzt (initialisiert). Dies hat zur Folge, dass bei jeder Initialisierung auch das Regelwerk angewendet werden muss. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass die importierten Daten den gleichen Importzeitstempel haben. Bei der Befüllung der Simulationsdatenbank wird der Excel-Export des Mengengerüsts als eigene Relation eingebunden, damit SQL-Statements auf das Mengengerüst zugreifen können. Für die oben beschriebenen Entitäten wird das Mengengerüst hinsichtlich der benötigten Daten durchsucht und die identifizierten Daten in die Relation der entsprechenden Entität überführt. Das folgende SQL-Statement verdeutlicht am Beispiel der Entität Ladungsträger, wie der Import aus dem Mengengerüst in die Simulationsdatenbank angebunden ist:

```

INSERT INTO
  Ladungstraeger
  ( Bezeichnung, Universalismus, Auspraegung, Stapelbarkeit, Ausmasse,
  Klappbarkeit )
SELECT
  Import_Mengengeruest.BehNramBO,
  First(Import_Mengengeruest.BehUniSpezamWE),
  First(Import_Mengengeruest.BehAuspraegungamWE),
  First(Import_Mengengeruest.BehStapelbaramWE),
  First([BehLaengeamBO] & "/" & [BehBreiteamBO] & "/" &
  [BehHoeheamBO]),
  First(Import_Mengengeruest.[LP-RueckfuehrungGeklappt]),
FROM
  Import_Mengengeruest
GROUP BY
  Import_Mengengeruest.BehNramBO;

```

Zur Aggregation wird die Funktion *GROUP BY* genutzt, da es sich bei der Behälterbezeichnung um das Schlüsselfeld der Relation Ladungsträger handelt. Eine mehrfache Einfügung der Ladungsträgerbezeichnung wird somit unterbunden. Der Datenimport aus dem Planungssystem der Logistikplanung ist transparent und performant angebunden. Tabelle 5.13 zeigt die Initialisierung der Simulationsdatenbank, den Import der Planungsdaten sowie die Anwendung des Regelwerkes zur Vervollständigung der relevanten Simulationseingangsdaten.

Produkte								
	Bereitstello	Lagerleergu	Warenausg	Behälteranz	Meldebesta	Reichweite	Wareneingangszeiten	Versorgung:
Initialisierung	*							
Import aus Mengengerüst	\\W:050\B:46\	\\W:050\WT:Si	\\W:050\B:46\	2		4		SPM_1.OG_Ge
	\\W:050\B:46\ #	#	#	2		4		LLZ_EG_Gebiet
	\\W:050\B:46\ #	#	#	2		4		LLZ_EG_Gebiet
	\\W:050\B:46\	\\W:050\WT:Si	\\W:050\B:48\	2		4		LLZ_OG_Gebie
	#	#	#	2		4		LLZ_OG_Gebie
	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:48\	\\W:050\B:48\	2		4		LLZ_OG_Gebie
	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	2		0		JIS_EG_OG_Dir
	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	2		0		JIS_EG_OG_Dir
Anwendung Regelwerk	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	2	25	4	MO-0800;DI-0800;MI-0800	JIT_EG_Direkt
	\\W:050\B:46\ #	#	\\W:050\WT:Si	2	25	0	MO-0800;DI-0800;MI-0800	JIS_FT_EG_OG
	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	2	25	0	MO-0800;DI-0800;MI-0800	JIS_EG_OG_Dir
	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	2	25	0	MO-0800;DI-0800;MI-0800	JIS_EG_OG_Dir
	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:46\	2	25	4	MO-0800;DI-0800;MI-0800	JIT_EG_Direkt
	#	#	\\W:050\B:48\	2	25	4	MO-0800;DI-0800;MI-0800	LLZ_OG_Gebie
	#	#	#	2	25	4	MO-0800;DI-0800;MI-0800	LLZ_EG_Gebiet
	\\W:050\B:46\	\\W:050\B:48\	\\W:050\B:48\	2	25	4	MO-0800;DI-0800;MI-0800	LLZ_OG_Gebie
	#	#	#	2	25	4	MO-0800;DI-0800;MI-0800	LLZ_OG_Gebie
	#	#	#	2	25	4	MO-0800;DI-0800;MI-0800	LLZ_OG_Gebie

Tabelle 5.13: Anwendung des Regelwerkes

Die Anwendung des Regelwerkes zur Wissensergänzung erfolgt nach jeder Initialisierung des Simulationsgerüsts. Dadurch wird sichergestellt, dass sich keine Relikte, verursacht durch veraltete Plandaten, in der Datenbank befinden. Das Regelwerk wurde in einer eigenen Relation als SQL-Statement gespeichert. Bei der Anwendung dieser Regeln geht ein VBA-Skript tupelweise durch die Plandaten und führt die einzelnen SQL-Statements aus. Das Ergebnis sind vollständige Simulationseingangsparameter (vgl. Tabelle 5.13). Dieses Vorgehen kann bei jeder Aktualisierung der Plandaten iterativ durchgeführt werden. Abbildung 5.16 zeigt das Regelwerk im Simulationsgerüst.

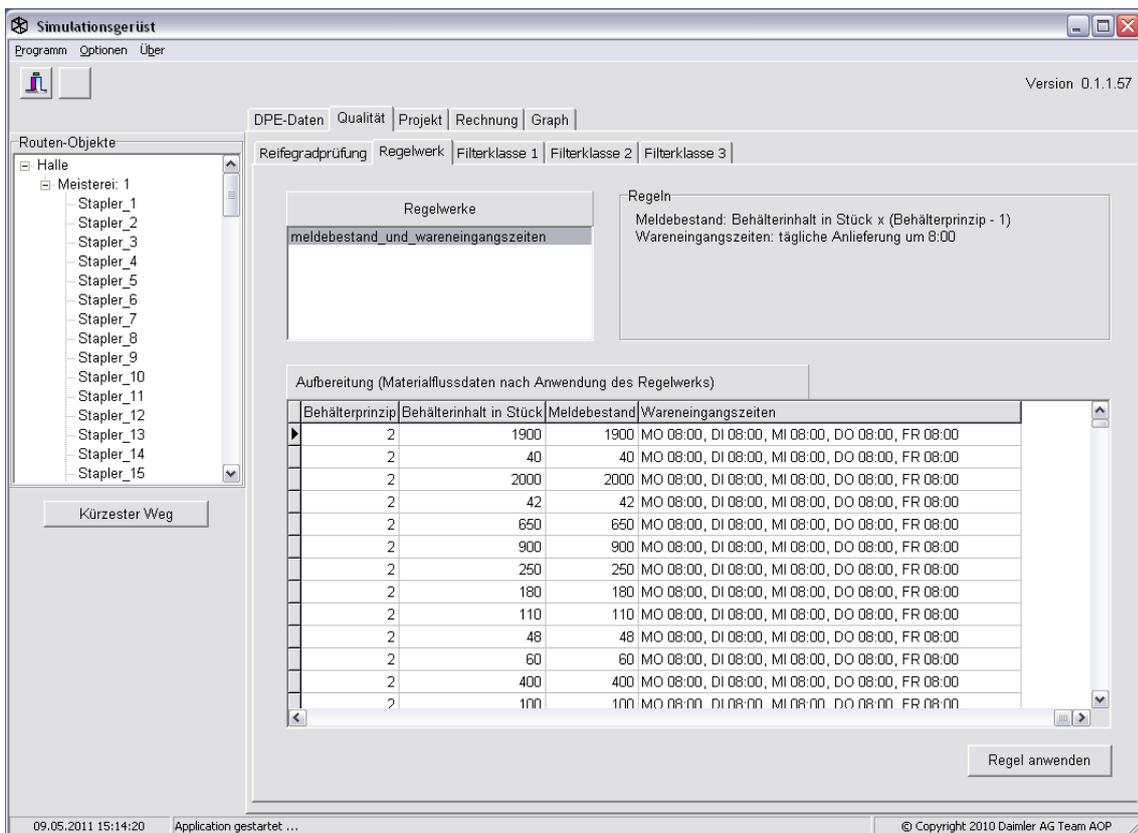


Abbildung 5.16: Regelwerk im Simulationsgerüst

5.7.2 Generierung der Belieferungssimulation durch das Logistikmodul

Das Logistikmodul ist die Objektbibliothek im Simulationsprogramm, im Kontext bausteinorientierter Simulationsprogramme auch Bausteinbibliothek genannt. Nachdem die Eingangsdaten vollständig in der benötigten Form vorliegen, wird wie im Lösungskonzept beschrieben das Logistikmodul exemplarisch initialisiert. Der Aufbau des Logistikmoduls ist in Abbildung 5.17 abgebildet.

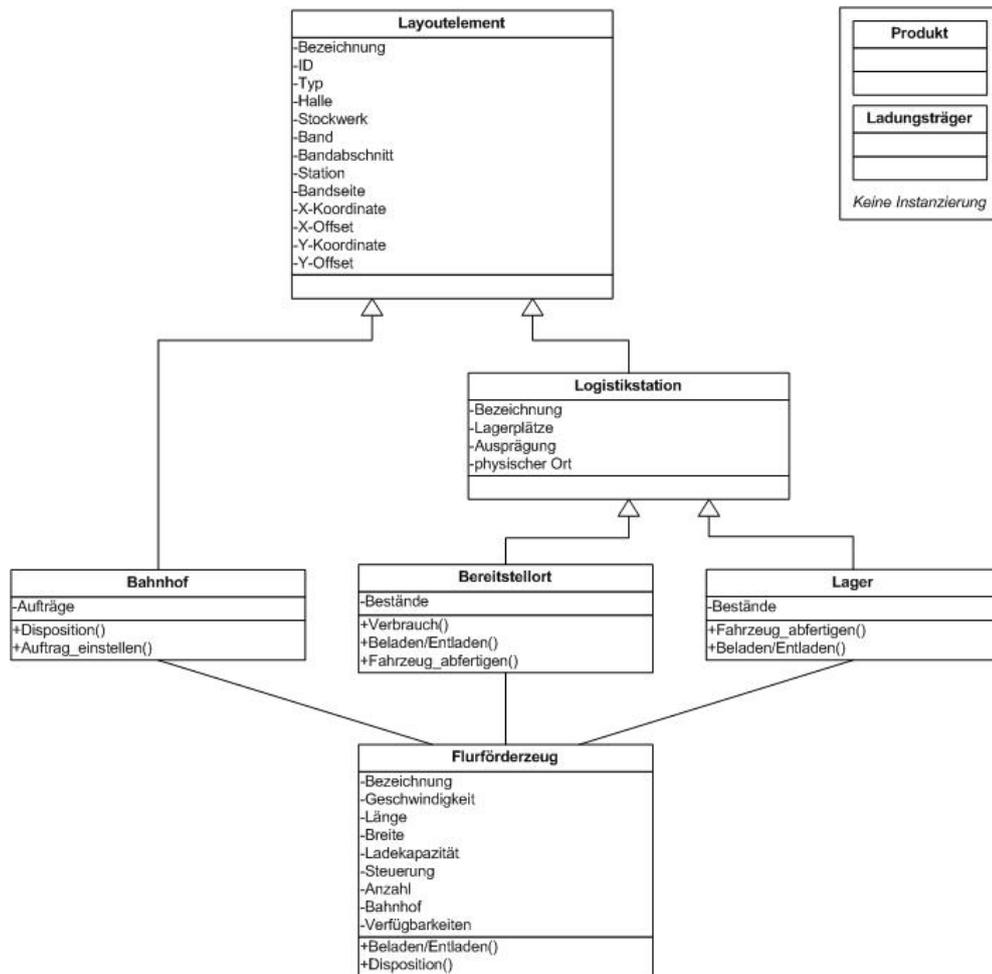


Abbildung 5.17: Aufbau des Logistikmoduls

5.7.2.1 Exemplarisches Verhalten der Belieferungssimulation

Der Verbrauch der Montage am Verbauort wird durch einen zentralen Taktgeber gesteuert, dessen Intervall dem geplanten Montagetakt entspricht. Sollte der Wert nicht digital zur Verfügung stehen, lässt er sich aus den vorhandenen Logistikplandaten errechnen (Quotienten der Nettoarbeitszeit und der täglichen Baurate).

Jeder Baustein *Bereitstellort* reduziert in Montagetakt in Abhängigkeit der geplanten Verbaurate seinen Bestand. Wenn der (teils im Regelwerk ermittelte) Meldebestand erreicht ist, wird eine Nachbestellung ausgelöst und der entsprechende Fahrauftrag am zugeordneten Bahnhof eingelastet. Die Aufgabe des Bahnhofs ist die Disposition der Fahraufträge an die stationierten Flurförderzeuge. Wenn kein freies Fahrzeug vorhanden sein sollte, wird der Auftrag mit einem Ticketing-System in einer Warteschlange eingereiht, um beim nächsten freiwerdenden Flurförderzeug eingelastet zu werden.

Entsprechend der Vorgabe der Standardversorgungsprozesse wird bei GLT-Staplern das Vollgutlager angefahren, der Ladungsträger beladen und der Bereitstellort versorgt. An dem Bereitstellort wird der volle Ladungsträger mit dem leeren Ladungsträger getauscht, im

nächsten Prozessschritt wird das Leergut zum Leergutsammelplatz gefahren, worauf sich der Stapler wieder verfügbar meldet und den nächsten Auftrag übernimmt bzw. seinen Heimatbahnhofanfahrt. Bei GLT- und KLT-Routenverkehren wird bei der Bestellauslösung im Vollgutlager der Ladungsträger bereitgestellt und für den nächsten Umfuhzug kommissioniert. Durch die Entnahme der Ladungsträger im Vollgutlager wird beim Erreichen der Meldegrenze ein Nachbestellvorgang ausgelöst, welcher vom Lieferanten am Wareneingang mit seinen Anlieferzeiten zu synchronisieren ist.

5.7.2.2 Parametrierung der Belieferungssimulation

Im Simulationsgerüst sind nun alle benötigten Informationen für den Modellaufbau vorhanden. Aus Gründen der Transparenz werden zu Beginn einer Modellparametrisierung in der Initialisierungsphase des Simulators alle Relationen des Simulationsgerüsts über eine *ODBC*-Schnittstelle ausgelesen und in den internen Tabellen von *PlantSimulation* zwischengespeichert.

In der Methode der Modellgenierung werden folgende Bausteine aufgerufen:

OBDC:

Schnittstelle zwischen *PlantSimulation* und der Datenbank

Init (Methode):

Die Methode verwendet in *PlantSimulation* den *ODBC*-Baustein, der durch eine, in der *ODBC*-Verwaltung unter Microsoft Windows definierte, Schnittstelle (vgl. Abbildung 5.18) eine Verbindung zum *mySQL*-Server herstellt und die Tabellen in den Simulator überträgt.

Is

do

```
ODBC.login(mySQL-Datenbank, root, PASSWORD);
```

```
--Produkte lesen
```

```
ODBC.SQL(TAB_Produnkte,
"SELECT *
FROM Produkte
WHERE Produkte.Lagervollgut <> '#' AND
Produkte.Bereitstellort <> '#' AND
Produkte.Lagerleergut <> '#");
```

```
--Fahrzeuge lesen
```

```
ODBC.SQL(TAB_Fahrzeuge,
"SELECT *
FROM Flurförderzeug");
```

```
--Verbindung zur Datenbank beenden
```

```
ODBC.logout;
```

end;

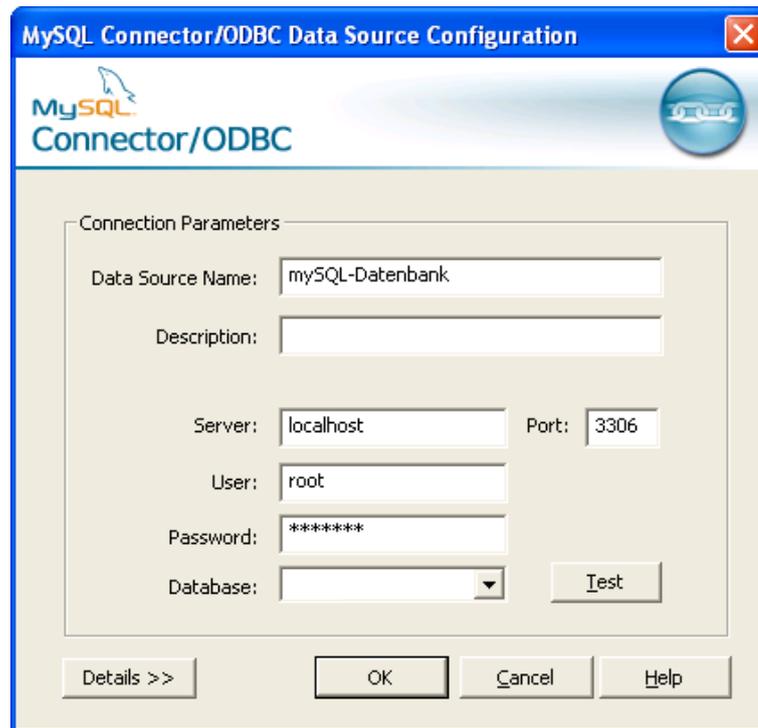


Abbildung 5.18: Einrichtung der ODBC-Schnittstelle

Während der Initialisierung im Simulator werden die physischen Orte der einzelnen Bausteine ausgewertet, in dem die passenden Entitäten gesucht werden. Der Baustein wird dadurch automatisch mit allen relevanten Informationen versorgt. Die parametrisierten Bausteine sind ab jetzt vollständig und können für Simulationsläufe verwendet werden (vgl. Abbildung 5.19).

Am Beispiel eines Bereitstellortes soll dieses Verfahren verdeutlicht werden: bei der Layoutübernahme wurde dem Baustein Bereitstellort als einzige Information neben seinen Koordinaten seine Bezeichnung „physischer Ort“ zugeteilt. In der Initialisierungsphase wird in der Tabelle Produkt die Spalte Bereitstellort nach seiner individuellen Bezeichnung durchsucht. Somit werden alle Transportketten identifiziert, an denen dieser Bereitstellort beteiligt ist. Während des Simulationslaufes werden die Bestände lokal von den Bereitstellorten verwaltet, die beim Erreichen des Meldebestandes an der vorgelagerten Stelle eine Bestellung auslösen.

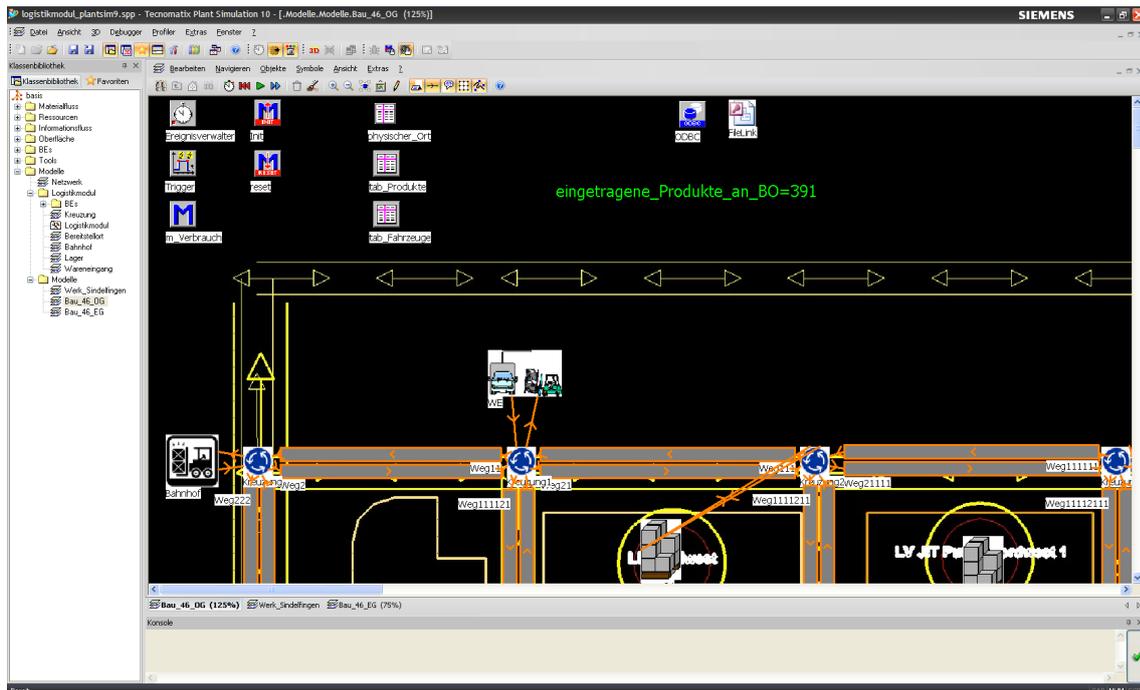


Abbildung 5.19: Hallenlayout im Simulator

5.8 Zusammenfassung Kapitel 5

5.8.1 Stand der Umsetzbarkeit

Der vorgestellte Prototyp ist funktionsfähig und kann Ergebnisse sowohl der Plausibilisierung als auch der Modellgenerierung vorweisen. Die Machbarkeit der einzelnen Filterklassen wurde exemplarisch aufgezeigt, insbesondere Filterklasse 3 kann mit einer vollständigen Prüfung der Fragestellung „ist die Belieferungsform richtig gewählt?“ eine Deltaliste aufbauen und der Logistikplanung einen Mehrwert geben.

Durch die standardisierte Methode der Digitalen Fabrik und der Anbindung des Planungssystems als Lieferant eines Großteils der Eingangsdaten konnten die bisherigen Aufwände der Datenerhebung und -aufbereitung reduziert werden. Das Simulationsmodell wird über die beschriebenen Schnittstellen aus den aufbereiteten Daten des Simulationsgerüsts aufgebaut. Der Weg des Modellaufbaus wird mittels einer Checkliste validiert und verifiziert, das komplett aufgebaute Modell ist jedoch nochmals gegen die (erwartete) Wirklichkeit zu prüfen, um eventuelle Inkonsistenzen aufzudecken.

Weiter konnte durch die qualitative Bewertung der Eingangsdaten aktiv untersucht werden, ob diese Daten plausibel sind. Diese Auswertung sensibilisiert den Logistikplaner mit dem Umgang seiner Plandaten und unterstützt ihn aktiv bei dem Ziel, in immer kürzeren Produktlebenszyklen eine gleichbleibend hohe Qualität zu gewährleisten.

5.8.2 Weiterer Handlungsbedarf

Bereits mit der Filterklasse 2 plausibilisierte Transportketten können zwar mit anderen Filterklassen überprüft werden, in der Auswertung ist dies allerdings aus Gründen der Transparenz gesondert aufzuzeigen. Hier ist das gleiche Verständnis zur Herkunft und zur Prüfung der Datenqualität von hoher Bedeutung. Damit der Prototyp diese bereits plausibilisierte Datensätze identifizieren kann, ist im Mengengerüst ein zusätzliches Attribut mitzugeben. Dieses Attribut ist im Planungssystem an der Teilefamilie anzuhängen. Diese Anforderung ist zum gegenwärtigen Stand nicht umgesetzt. Die Definition des Attributes wird in einem Lastenheft definiert und in den nächsten Release des Logistikplanungssystems der Digitalen Fabrik integriert, um das Konzept der Filterklasse 2 operativ bewerten zu können.

Weiteres Potential bietet die Filterklasse 3. Durch die Definition weiterer Regeln können mit den Entscheidungsbäumen die Eingangsdaten der Belieferungssimulation weiter auf Korrektheit untersucht werden. Diese Regeldefinition ist bei der Erstellung aufwändig und mit mehreren Plausibilisierungsschleifen verbunden. Dafür spricht der Einsatz dieser Regeln über den gesamten Produktentstehungsprozess für die Baureihen, die ebenfalls über ein standardisiertes Reporting verfügen.

6 Zusammenfassung und kritische Würdigung

6.1 Beantwortung der Forschungsfragen (Post-Untersuchung)

Die frühe Fokussierung auf die unterschiedlichen Ausprägungen der Eingangsdaten, deren Beschaffung und Verifikation hat das Potential, eine Belieferungssimulation wirtschaftlich zu erstellen und valide Ergebnisse über den gesamten Lebenszyklus zu produzieren. In wie weit diese Hypothese bestätigt werden kann wird in diesem Kapitel beschrieben:

1. Mit welchen Maßnahmen kann eine Belieferungssimulation wirtschaftlich erstellt werden?

Die Antwort ist die standardisierte Automatisierung, um den Planer und den Simulationsexperten von zeitintensiven Routinetätigkeiten entlasten zu können. Dazu gehören wie im Lösungskonzept beschrieben und wie im Demonstrator prototypisch umgesetzt die standardisierte Anbindung des Simulationsgerüsts an das Planungssystem der Logistik (vgl. Kapitel 5.2), das Speichern und die Verwendung von Expertenwissen im Simulationsgerüst (vgl. Kapitel 5.4), aber auch die Plausibilisierung der Eingangsdaten mittels der entwickelten Filterklassen (vgl. Kapitel 5.3).

Die Tätigkeiten, die im Rahmen einer Belieferungssimulationsstudie automatisiert werden können, wurden im Rahmen dieser Arbeit beschrieben und diskutiert. Dazu gehören:

- reduzierte Aufwände für die Aufbereitung der einsetzbaren Plandaten aus dem Planungssystem der Digitalen Fabrik.
- Speichern von dezentralen simulationsrelevanten Daten und deren Einsatz bei der Wiederverwendung von Simulationsmodellen der gleichen Baureihe.
- Erarbeitung, Validierung und Verifikation eines Regelwerkes zur Generierung von relevanten, aber noch nicht ausgeplanter Informationen unter Berücksichtigung der eingeschränkten Verwendung in der Ergebnisdarstellung.
- Erarbeitung und Anwendung eines nachhaltigen Prozesses, um wiederholte Plausibilisierungen der gleichen Datensätze zu vermeiden.
- Einsparung von Zeit und Ressourcen durch den Einsatz der vorgestellten Methoden von Zeit und Ressourcen.

Weiter werden alle Beteiligten unterstützt, mit reduziertem Ressourceneinsatz gleiche, wenn nicht sogar bessere Ergebnisse durch den strukturierten und dokumentierten Aufbau zu erreichen. Diese Möglichkeit ist durch die in der Einleitung beschriebene große Anzahl an vollständig parametrisierten Transportketten gegeben. Von einer vollständigen automatisierten Modellgenerierung wird in dem Kontext der Intralogistik abgeraten, da hier zwar die Wirtschaftlichkeit des Modellaufbaus gegeben sein kann, allerdings die Transparenz und somit die zwingend erforderliche Nachvollziehbarkeit durch das Zusammenspiel mehrerer

unterschiedlicher Prozesse nicht darstellbar ist. Der Planer als Kunde muss ebenfalls den Aufbau des Modells nachvollziehen können. Der Arbeitspunkt im Spannungsfeld zwischen dem Grad der Automatisierung und der Transparenz ist schematisch in Abbildung 6.1 dargestellt. Wird ein Arbeitspunkt weiter rechts vom Arbeitspunkt gewählt, so wird zwar der Planer durch den zunehmenden Grad der Automatisierung entlastet, gleichzeitig steigt jedoch der Aufwand der zusätzlichen bei Modellvalidierung und -verifikation an. Dies ist gerade bei komplexen Modellen nicht zu unterschätzender Aufwand. Auf der anderen Seite ist jedoch auch eine Einsparung möglich, wenn die Verifikation und Validierung nur einmalig erforderlich ist.

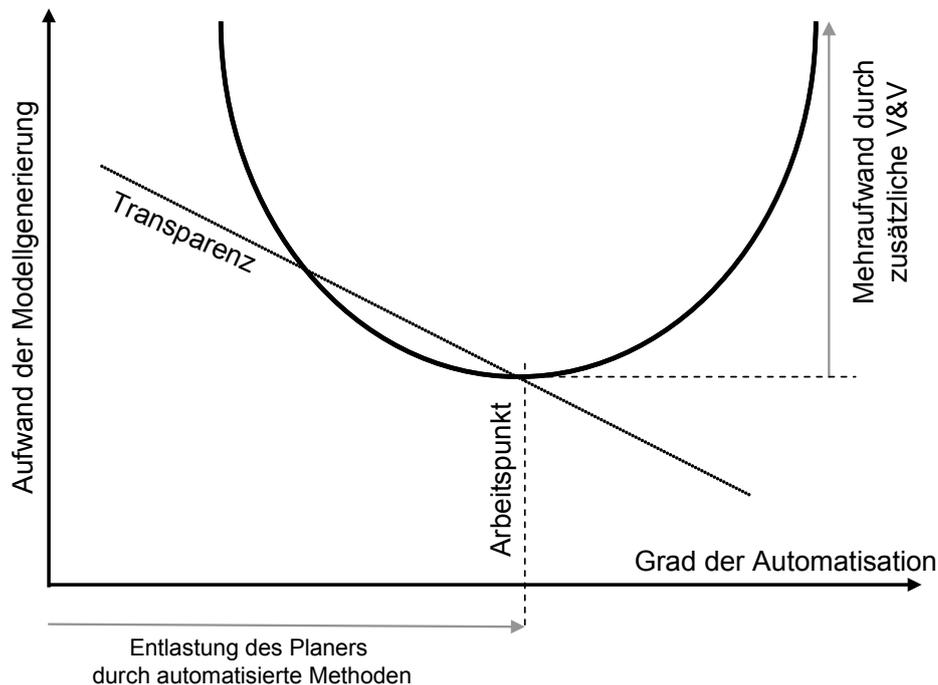


Abbildung 6.1: Festlegung des Arbeitspunktes bei kompletten Belieferungssimulationen

Dieser Arbeitspunkt kann je nach Fragestellung der Simulation unterschiedlich sein. Es hat sich im Rahmen dieser Untersuchung gezeigt, dass ein vollständig automatisierter Modellaufbau, der für den Planer als Kunde nicht nachvollzogen werden kann, nicht zielführend ist. Die angesprochene Transparenz ist für alle Beteiligten eine zwingende Voraussetzung, einerseits für die Modellvalidierung und -verifizierung, andererseits für die Glaubwürdigkeit der Simulationsergebnisse. Somit ist die Herausforderung, einen möglichst hohen Automatisierungsgrad bei gleichzeitiger vollständiger Transparenz anzustreben.

2. Wie wirkt die Datenqualität auf den Modellaufbau?

Die Antwort auf diese Frage ist abhängig von den beiden untersuchten Qualitätskriterien „Korrektheit“ und „Vollständigkeit“. Es ist notwendig, dass beide Qualitätsmerkmale im Rahmen einer Simulationsstudie untersucht werden.

Inkorrekte, aber vollständige Transportketten haben keinen Einfluss auf den Modellaufbau, allerdings direkte Auswirkungen auf die Belastbarkeit der Simulationsergebnisse. Ein Beispiel hierfür ist ein falscher Ladungsträgerinhalt (100 Bauteile statt 10 Bauteile) führt zu einem Modellaufbau, da ein Wert vorhanden ist. Dass der falsche Wert Auswirkungen auf die Versorgungsintervalle hat, wird bei dem Modellaufbau nicht betrachtet.

Korrekte, aber unvollständige Transportketten können nicht in die Belieferungssimulation übernommen werden, da hierbei für den Modellaufbau relevante Daten fehlen und diese nicht über ein definiertes Regelwerk (vgl. Kapitel 5.4) erschlossen werden können. Ein Beispiel hierfür ist, dass einer Transportkette kein Ladungsträger zugeordnet ist. Daraus kann kein Abrufverhalten generiert werden und somit werden die logistischen Ressourcen falsch ausgelegt. Daher ist es von grundlegender Bedeutung, dass alle Transportketten einer Belieferungssimulation bekannt sind um die Belastbarkeit der Simulationsergebnisse bewerten zu können (vgl. Kapitel 5.3).

3. Wie kann die Qualität der Eingangsparameter im Vorfeld beeinflusst werden, um Mehraufwand bei der Modellerstellung zu vermeiden?

Prinzipiell ist die Anwendung der Filterklassen als Methode zur Bewertung der Datenqualität unabhängig von einer Simulationsstudie möglich. Durch den Einsatz dieser Filterklassen hat der Planer ein Instrument an der Hand, gezielt unvollständige und inkorrekte Transportketten zu identifizieren und die notwendigen Anpassungen vorzunehmen.

Hierbei ist es wichtig, dass der Dialog zwischen Logistikplanung und Simulationsexperten regelmäßig stattfindet. Ein Beispiel hierfür ist es, dass der Planer versteht, dass die von ihm bereitgestellten Transportketten von der Simulation nur gelesen und nicht manipuliert werden. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch einen strukturierten Ablauf der Belieferungssimulationsstudie mit einer vorherigen Prüfung der Datenqualität wertvolle Ressourcen eingespart werden können. Somit ist eine Investition in die Vollständigkeit und Korrektheit der Planungsdaten nicht nur für die Simulationsergebnisse sinnvoll, sondern für die Übergabe an andere Abteilungen, wie beispielsweise die Serienplanung (betriebsbegleitend), notwendig.

4. Wie müssen die internen Prozesse verändert werden, um aus Logistiksimulationen den optimalen Nutzen zu ziehen?

Ergebnisse einer Belieferungssimulation sind Erkenntnisse über das dynamische Verhalten innerhalb der logistischen Versorgungswege innerhalb einer Produktionshalle. Dazu gehören

auch Erkenntnisse über die Anzahl der benötigten Ressourcen unter Berücksichtigung dynamischer Einflussfaktoren.

Beispiele für dynamische Einflüsse sind Störverhalten von FFZ oder die stoßweise Fahrweise an Engpässen wie Kreuzungen mit hohem Verkehrsaufkommen. Wichtig ist für diese Untersuchung, dass allen Beteiligten, sowohl auf der Sachbearbeiterebene als auch im Management bewusst ist, dass die Qualität (Qualitätsmerkmale „Vollständigkeit“ und „Korrektheit“) der Transportketten nicht nur einen direkten Einfluss auf die Aussagen der Belieferungssimulation haben, sondern auch auf die gesamte Planungsqualität (vgl. Kapitel 5.3.7).

Daher sind alle internen Prozesse so zu definieren, dass der Fokus auf der Qualitätssicherung liegt. Dazu gehören neben den Erfahrungswerten der Planer und Simulationsexperten auch integrierte transparente – und vor allem vom Planer akzeptierte – Plausibilisierungsmethoden. Solange diese Methoden noch nicht vollständig umgesetzt sind, entsteht ein signifikanter Mehraufwand bei der Datenplausibilisierung und der Modellvalidierung und –verifikation.

5. Wie kann der Wiederverwendungsgrad erhöht werden?

Der Aufwand der Aufbereitung der Eingangsdaten hat einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Wiederverwendung. Mit dem Einsatz des Simulationsgerüsts (vgl. Kapitel 5.4) wird die Möglichkeit gegeben, wie eine wirtschaftliche Wiederverwendung gewährleistet werden kann. Durch eine Neuparametrisierung des kompletten Modells („Urbefüllung“) wird durch die vorgestellte Methode die Möglichkeit geschaffen, auf eine aufwändige und fehleranfällige manuelle Nachparametrisierung („Delta-Befüllung“) vollständig zu verzichten.

6. Wie lassen sich die notwendigen, betriebsintern vorhandenen Datenquellen automatisiert in eine Belieferungssimulation einbinden?

Betriebsinterne Datenquellen, wie beispielsweise die Plandaten aus dem Planungssystem der Digitalen Fabrik, werden über standardisierte Reports tagesaktuell ausgegeben. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass diese Reports möglichst ohne großen Aufwand in das Simulationsgerüst überführt werden können. Ebenfalls wichtig ist die Vergleichbarkeit, unterschiedliche Baureihen mit teilweise individuellen Prozessen mit der gleichen Systematik bedienen zu können. Nach der Übertragung der Plandaten in das Simulationsgerüst und nach den eingesetzten Plausibilisierungsmethoden ist mittels eines Regelkreises zu prüfen, ob der notwendige Füllstand für belastbare Aussagen vorhanden ist (vgl. Kapitel 5.3.7).

7. Wer ist für die Pflege der Eingangsdaten und der Simulationsläufe verantwortlich?

Wichtig ist im Vorfeld einer Belieferungssimulationsstudie die klare Verteilung der Verantwortung. In Bereichen mit einer hohen Arbeitsteilung hat das Management dafür Sorge

zu tragen, dass nicht nur die Kernverantwortlichkeiten eindeutig beschrieben sind, sondern darüber hinaus auch die Schnittstellen zu anderen Bereichen klar geregelt sind. Dies ist insbesondere im Rahmen des „Simultaneous Engineering“ von Bedeutung.

Im Rahmen einer Belieferungssimulationsstudie ist der verantwortliche Logistikplaner zuständig für die Erhebung und Ausplanung der Plandaten inklusive ihrer Plausibilisierung. Der Simulationsexperte ist verantwortlich für die Erhebung und Implementierung der dezentralen, simulationsrelevanten Daten, den Aufbau des Simulationsgerüsts sowie des Simulationsmodells und letztlich auch für die Ermittlung der Simulationsergebnisse. Somit hat der Simulationsexperte die Verantwortung, dass das Modell validierbar und verifizierbar ist und somit belastbare Simulationsergebnisse aufzeigen kann. Dies gilt, sofern die Eingangsdaten vom Planer plausibilisiert worden sind.

8. Wie können heterogene Datenbanksysteme miteinander in die Simulation integriert werden, ohne Scheingenauigkeiten zu produzieren?

Scheingenauigkeiten werden durch die sukzessive Anbindung dieser heterogenen Datenquellen an das Simulationsgerüst vermieden, wenn jede Anbindung für sich in einer eigenen Schleife plausibilisiert wird. Scheingenauigkeiten entstehen durch das Zusammenspiel heterogener Datenbanksysteme mit unterschiedlichen Granularitäten und spiegeln eine falsche Sicherheit in die Ergebnisse wider. Jedes dieser Systeme hat seine eigene Sichtweise und seine eigene Granularität auf die in ihm vorgehaltenen Planungsdaten. Wird mehr als eine Datenquelle gekoppelt, so sind die Wechselwirkungen zu identifizieren, beispielsweise mittels der Methode der statistischen Versuchsplanung. Die statistische Versuchsplanung variiert mit mehreren Eingangsdaten gleichzeitig. Damit wird ein Zusammenhang zu den Zielgrößen hergestellt, um die optimale Einstellung der Eingangsdaten zu bekommen. Eine Methode, verschiedene Datenbanken zu koppeln bietet das Simulationsgerüst (vgl. Kapitel 5.2).

In der prototypischen Umsetzung zeigte sich, dass oft weniger mehr sein kann, beispielsweise wenn die Plandaten nicht aus hochgerechneten Vergangenheitswerten oder auf Prognosen beruhen. Ein solcher Datenstand kann nicht zu belastbaren Erkenntnissen führen, eine zusätzliche Verschärfung mit einer untertägigen stoßweisen Fahrweise kann auf Grund von einer fehlenden Plausibilisierung keinen Mehrwert generieren. Das Erkennen des Zusammenspiels der Daten innerhalb des Modells kann Scheingenauigkeiten verhindern und somit die Qualität der Belieferungssimulationsstudie positiv beeinflussen.

Ebenfalls stellte sich heraus, dass viele Stärken der Simulation (Störungsverhalten von FFZ oder stoßweisen Abrufen) sich sehr schwer in die Realität übertragen lassen. In einer Planungsphase vor SOP ist eine solche Genauigkeit nicht zielführend, da dieses Verhalten in der Praxis nicht, oder nur sehr aufwändig nachvollziehbar ist. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen: sollte ein FFZ auf Grund einer defekten Batterie auf einer Logistikroute ausfallen, können andere FFZ dank breiter Fahrgassen dieses überholen, es entsteht kein Verkettungseffekt. Auch ist in der Regel eine defekte Zugmaschine zeitnah durch ein Ersatzfahrzeug ausgetauscht, so dass ein drohender Bestandsabbriss vermieden werden kann.

6.2 Findungsanspruch

Um die Forschungsfragen in Kapitel 6.1 beantworten zu können, mussten neue Methoden und Vorgehensweisen entwickelt werden.

Entwickelt wurden:

- das Simulationsgerüst (Kapitel 5.4) als zentraler Knoten zwischen den Planungssystemen der Digitalen Fabrik, dezentralem Expertenwissen, einem Regelwerk zur Generierung von fehlenden Informationen und dem Simulator,
- Filterklassen für die Plausibilisierung der Eingangsdaten (Kapitel 5.3) aus den Planungssystemen der Digitalen Fabrik, mit deren Unterstützung dem verantwortlichen Logistikplaner wertvolle Ressourcen eingespart werden können und seine geplanten Umfänge noch von einer weiteren Seite bewertet werden.

Ein positiver Nebeneffekt ist hierbei, dass mit der vorgestellten Vorgehensweise eine verstärkte Transparenz innerhalb einer Belieferungssimulation geschaffen wird. Diese Transparenz ist die Voraussetzung für die Validierung und Verifikation des Simulationsmodells und damit der Garant für belastbare Ergebnisse.

Die technische Machbarkeit konnte teilweise nachgewiesen werden. Dadurch wurde eine weitere Grundlage geschaffen, die auf dem Weg zur fehlerfreien Planung notwendig ist.

6.3 Kritische Würdigung

Zielsetzung dieser Arbeit war die wirtschaftliche Generierung von Belieferungssimulationen unter Verwendung rechnerunterstützter Plausibilisierungsmethoden für die Bewertung der Eingangsdaten. Diese Zielsetzung und die daraus abgeleiteten Methoden des Simulationsgerüsts und der Filterklassen stießen bei allen Beteiligten auf ein großes Interesse, sowohl im Umfeld des Unternehmens als auch auf den besuchten Konferenzen, auf denen die Konzepte präsentiert und kontrovers diskutiert werden konnten. Es zeigte sich, dass Belieferungssimulationen ohne die Verwendung des Simulationsgerüsts mit einem erheblichen Aufwand der Datenplausibilisierung (vgl. Kapitel 2.7) zwar belastbare Ergebnisse aufzeigen konnten, allerdings die Wiederverwendung des Modells bei einer notwendigen Neuparametrierung durch eine fortschreitende Planung wirtschaftlich nicht darstellbar ist. Mit dem Einsatz des Simulationsgerüsts konnte nachgewiesen werden, dass eine Anbindung der einsetzbaren simulationsrelevanten Daten, deren Prüfung durch die Filterklassen und der strukturierten Aufbereitung sowohl dem Planer als auch dem Simulationsexperten eine Entlastung mit sich bringt. Dieser Effekt erhöht sich mit jedem weiteren Parametrierung der gleichen Baureihe (vgl. Abbildung 6.2).

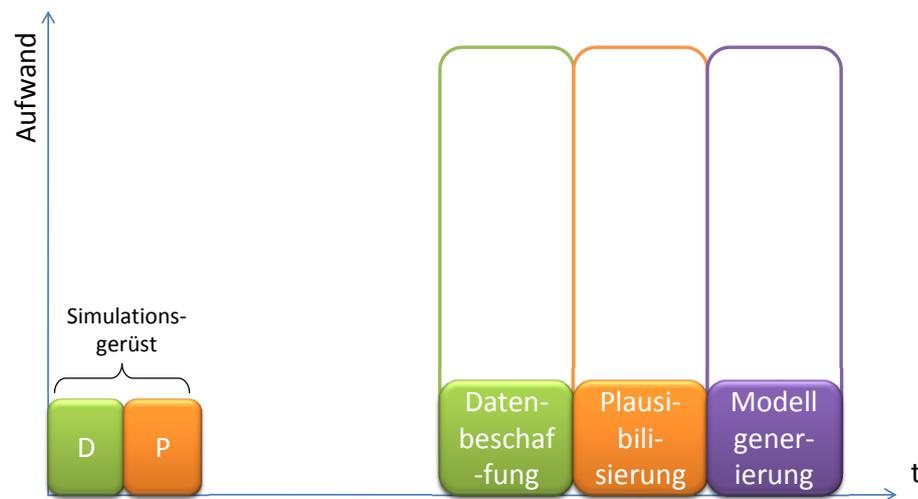


Abbildung 6.2: erreichte Zielsetzung dieser Arbeit

Allerdings konnten nicht wie ursprünglich geplant alle im Lösungskonzept beschriebenen Filterklassen umgesetzt werden. Die notwendigen Anpassungen der Planungssysteme der Entwicklung und der Digitalen Fabrik waren in der gegebenen Zeit nicht umsetzbar. Filterklasse 1 und Filterklasse 2 sind nicht im Demonstrator überprüfbar. Die Grundvoraussetzungen sind jedoch geschaffen, in weiteren wissenschaftlichen Ausarbeitungen diese Konzepte umzusetzen und zu bewerten.

Filterklasse 3, die Entscheidungsbaum-Schwellwertanalyse, plausibilisiert aktuelle Plandaten und gibt gefundene Auffälligkeiten zurück an den Planer in einer Deltaliste. In der prototypischen Umsetzung wurde die Fragestellung abgebildet, ob der Belieferungsprozess richtig gewählt wurde. Das Definieren und Ausarbeiten des Regelwerkes dieser Entscheidungsbäume ist zwar aufwändig, jedoch amortisieren sich diese Aufwände durch eine permanente Anwendung innerhalb und außerhalb des Baureihenprojektes.

Der automatische Modellaufbau trägt dazu bei, eine Belieferungssimulationsstudie strukturiert und wirtschaftlich zu erstellen. Allerdings sind die Definition und der Aufbau des Simulationsgerüsts kein Selbstläufer, Erfahrungswerte sowohl auf der Eingangsdatenseite als auch auf Kenntnisse über dynamische Zusammenhänge müssen vorhanden sein. Das Simulationsgerüst ist als Hilfsmittel zu sehen, es ersetzt keine planerische Leistung und kein Simulationsverständnis, es entlastet jedoch die Beteiligten von Routineaufgaben und schafft somit mehr Raum für Auswertungen und Analysen.

6.4 Ausblick und weiterer Handlungsbedarf

Generell ist zu untersuchen, ob die Planung für eine Belieferungssimulation in einem frühen Planungsstadium überhaupt die notwendigen Eingangsdaten bereitstellen kann. Solange viele Annahmen auf der Planungsseite vorhanden sind und im Planungssystem viele Dummywerte und viele Übernahmen aus vorherigen Baureihen vorhanden sind, ist die Simulationswürdigkeit kritisch zu hinterfragen. Alternativ gibt es statische Untersuchungen, aber auch spezielle

Engpassanalysen an ausgewählten Bereichen innerhalb der Montagehalle. Für diese Engpassanalysen werden keine ausgeplanten Transportketten vorausgesetzt, Haupteingangsgröße ist der Volumenstrom der betrachteten Kreuzungen. Hierbei wäre eine vollständige Belieferungssimulation nicht die wirtschaftlichste Wahl. Es liegt in der Hand des Simulationsexperten zu entscheiden, welche Methode mit welcher Detaillierung die Fragestellungen der Planung hinreichend beantwortet, vgl. Filterklasse 2.

Die Methode der Modellgenerierung einer Belieferungssimulation ist von vielen unterschiedlichen Dimensionen beeinflusst: das Planungssystem, unterschiedliche Planer in verschiedenen Abteilungen, Simulationsexperten, der Erfahrungsschatz der Beteiligten, das Zeitbudget für die Simulationsstudie sowie letztlich die vorhandenen und zugänglichen Plandaten. Im Bereich der Logistikplanung ist mit einer einheitlichen Planungssystematik ein erster Schritt getan, in kürzerer Zeit die einzelnen Baureihen zu planen. Mit zunehmender Unterstützung durch Planungssysteme steigen aber auch die Anforderungen an den Planer. Somit wird eine der nächsten großen Herausforderungen darin bestehen, den Anwendern Werkzeuge an die Hand zu geben, die trotz einer hohen Komplexität beherrschbar bleiben und die nötige Transparenz bieten, dem Planer bei seiner Vielzahl an Aufgaben zu unterstützen. Einige Beispiele hierfür sind:

System:

- Plausibilisierung der Plandaten hat direkt im Planungssystem der Digitalen Fabrik zu erfolgen
- Erhöhung der Transparenz im Planungssystem und Kennzeichnung des Ursprungs der Datenerhebung ist darzustellen
- Schaffung neuer Schnittstellen unter der Prämisse, dass der Informationsfluss jederzeit nachvollziehbar ist

Organisation:

- Die systematische Einbindung aller Verantwortlichen in die Belieferungssimulationsstudie, um das notwendige Verständnis der Eingangsdaten gemeinsam zu erarbeiten, um frühzeitig inkonsistente Planungsdaten zu identifizieren.
- Klare Definition von abteilungsübergreifenden Schnittstellen zwischen den an der Planung beteiligten Parteien. Gerade unter dem Gesichtspunkt eines „Simultaneous Engineering“ ist dies eine zwingende Voraussetzung.

Diskret-ereignisorientierte Simulationen sind ein etabliertes Werkzeug zur Absicherung der Planung. Allerdings gibt es im Umfeld der Simulationen noch genügend Handlungsbedarf, diese ohne Reibungsverluste in komplexe IT-Landschaften zu integrieren und den Informationsfluss zu gewährleisten. Das Ziel ist es letztlich, mit den Ergebnissen schneller und flexibler, und somit wirtschaftlicher planen zu können. Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, allerdings besteht hier weiterhin ein großer Bedarf an Methoden, die den Planer in seinem immer komplexeren Arbeitsumfeld unterstützen.

7 Literaturverzeichnis

- [ARN06] Arnold, Dieter Hrsg.: Intralogistik. Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [ARN95] Arnold, Dieter: Materialflusslehre. Mit 23 Tabellen. Vieweg, Braunschweig, 1995.
- [BAC97] Backes, Matthias: Simulationsunterstützung zur operativen Produktionsplanung und -regelung. In (VDI - Verein Deutscher Ingenieure Hrsg.): Fortschrittsberichte VDI. Rechnerunterstützte Verfahren. Beuth, Berlin, 1997.
- [BAU08] Baumgarten, Helmut Hrsg.: Das Beste der Logistik. Innovationen, Strategien, Umsetzungen. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2008.
- [BCW03] Bayer, Johann; Collisi, Thomas; Wenzel, Sigrid Hrsg.: Simulation in der Automobilproduktion. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2003.
- [BHZ03] Bongulielmi, Luca; Henseler, Patrick; Zwicker, Ekkehard: Das Digitale Produkt Grundlage für den IT-unterstützten Verkaufs- und Logistikprozess. In (Informationssysteme in Industrie und Handel Hrsg.): Industrie Management 1/2003. Gito mbH Verlag für Industrielle Informationstechnik und Organisation, Berlin, 2003.
- [BIE04] Bierwirth, Thomas: Virtuelle Logistikplanung für die Automobilindustrie, Methoden und Modelle im Rahmen der Digitalen Fabrik. Dissertation. Shaker, Aachen, 2004.
- [BK08] Baier, Jochen; Krieg, Raimund: Automatisierter Modellaufbau für Materialflusssimulationen in der Nutzfahrzeugproduktion. In (Rabe, M. Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. 13. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Fraunhofer IRB, Berlin, 2008; S. 51–60.
- [BKR96] Blessing, Stefan; Kugelmann, Doris; Reinhart, Gunther: Sichere Handhabung mit 3D-Simulation und visueller Sensorik. In (Schmidt, G.; Freyberger, F. Hrsg.): Autonome mobile Systeme. Springer, Berlin, 1996.
- [BM07] Bracht, Uwe; Masurat, Thomas: Neue Richtlinie zur Einführung in die Digitale Fabrik. In Logistik für Unternehmen, Heftnummer 6, 2007; S. 60–64.
- [BRA08] Bracht, Uwe; Rooks, Tobias; Adrian, Roberto: Virtuelle Logistikplanung für die Montage im Rahmen der Digitalen Fabrik. In (Rabe, M. Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart, 2008
- [BRE98] Breiman, Leo: Classification and regression trees. Chapman & Hall, Boca Raton, 1998.
- [BRH06] Baier, Jochen; Ruf, Harald; Hill, Henning: Verknüpfung von Materialflusssimulation und Planungsdatenbanken. Verringerung der Projektlaufzeit bei Simulationsstudien durch automatisierten Modellaufbau. In Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Heftnummer 01-02, 2006; S. 70–76.
- [BRK04] Bierschenk, Sabine; Ritter, Arno; Kuhlmann, Timm: Status Quo - Digitale Fabrik - auch für kleine und mittlere Unternehmen? Aktuelle Studie des Fraunhofer IPA. In Digital Engineering, Heftnummer 5, 2004; S. 26–28.

- [BS06] Baluch, Issa; Schäfer, Kerstin: Transport Logistik in Geschichte, Gegenwart und Zukunft. Deutscher Verkehrsverlag, Hamburg, 2006.
- [BWG09] Bracht, Uwe; Wenzel, Sigrid; Geckler, Dieter: Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Springer, Berlin, 2009.
- [CHE76] Chen, Peter Pin-Shan: The Entity-Relationship Model - Toward a Unified View of Data. In *ACM Transactions on Database Systems*, Heftnummer 1, 1; S. 9–13.
- [CZA09] Czaja, Lothar: Qualitätsfrühwarnsysteme für die Automobilindustrie. Gabler, Wiesbaden, 2009.
- [DD05] Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas: Einführung in Operations Research. Springer, Berlin, 2005.
- [DEM94] Deming, William Edwards: Out of the crisis. Quality productivity and competitive position. Cambridge University Press, Cambridge, Mass., 1994.
- [DIN00] DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.: Verpackung – Kleinladungsträgersysteme. Beuth, Berlin, 2000.
- [DIN85] DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.: Nummerierung; Grundbegriffe. Beuth, Berlin, 1985.
- [DIN89] DIN - Deutsches Institut für Normung e.V.: Transportkette; Blatt 1 Grundbegriffe. Beuth, Berlin, 1989.
- [DN09] Dreher, Stefan; Nürnberger, Alexej: Routenoptimierung in der Produktionslogistik. In *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Heftnummer 3, 2009; S. 131–135.
- [DS08] Domschke, Wolfgang; Scholl, Armin: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht. Springer, Berlin, 2008.
- [DS94] Daferner, Martin; Singh, Harbhajan: Anwendung eines multifunktionalen Animationskonzeptes. In (Kampe, G.; Zeitz, M. Hrsg.): *Simulationstechnik. Fortschritte in der Simulationstechnik*. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1994; S. 223–228.
- [DSV97] Domschke, Wolfgang; Scholl, Armin; Voß, Stefan: Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. Springer, Berlin, 1997.
- [EBE06] Eberhart, Andreas: Automatic Generation of Java/SQL Based Inference Engines from RDF Schema and RuleML. In (Horrocks, I.; Hendler, J. Hrsg.): *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006; S. 102–116.
- [ECK02] Eckardt, Frank: Ein Beitrag zu Theorie und Praxis datengetriebener Modellgeneratoren zur Simulation von Produktionssystemen. Shaker, Aachen, 2002.
- [ERS10] Engel, Mathias et al.: Zehn Jahre Digitale Fabrik in der Automobilindustrie. Vergangenheit und Zukunft der Digitalen Fabrik – DIFA-Status Quo. In *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Heftnummer 3, 2010, 105; S. 178–183.
- [EVE96] Eversheim, Walter Hrsg.: Produktion und Management "Betriebshütte". Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1996.
- [FIT06] Fitzek, Daniel: Anlaufmanagement in Netzwerken. Grundlagen, Erfolgsfaktoren und Gestaltungsempfehlungen für die Automobilindustrie. Haupt, Bern, 2006.
- [FLO62] Floyd, Robert W.: Shortest Path. In (Association for Computing Machinery Hrsg.): *Communications of the ACM*. ACM, New York, 1962; S. 345.

- [FRI07] Fritz, Jürgen Ulrich: Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik. Schriftenreihe Produktionstechnik. Dissertation, Saarbrücken, 2007.
- [FRI09] Frick, Rainer: Datenorientierte Modellbildung in der Simulation. In (Gnauk, A.; Luther, B. Hrsg.): Arbeitsgemeinschaft Simulation - 20. Symposium. Shaker, Aachen, 2009; S. 332–337.
- [GH07] Gehr, Frank; Hellingrath, Bernd: Logistik in der Automobilindustrie. Innovatives Supply Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [GR08] Gocev, Pavel; Rabe, Markus: Semantic Web Framework for Modelling and Simulation of Manufacturing Systems. In (Rabe, M. Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. 13. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Fraunhofer IRB, Berlin, 2008; S. 177–186.
- [GSS06] Gitye, Stefan; Schäfer, Achim; Sträter, Holger: Auf dem Weg zur effizienten Produktion. In IT Production, Heftnummer 10, 2006; S. 30–32.
- [HAC84] Hackstein, Rolf: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984.
- [HAC89] Hackstein, Rolf: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [HEG03] Hegenscheidt, Matthias: Kennliniengestützte Leistungsprognose verketteter Produktionssysteme. VDI-Verlag, Düsseldorf, Hannover, 2003.
- [HEL02] Helfert, Markus: Planung und Messung der Datenqualität in Data-Warehouse-Systemen. Dissertation. Difo-Druck, Bamberg, 2002.
- [HGH08] Hildebrand, Knut; Gebauer, Marcus; Hinrichs, Holger; Mielke, Michael Hrsg.: Daten- und Informationsqualität. Auf dem Weg zur Information Excellence. Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 2008.
- [HHR04] Heinrich, Lutz J.; Heinzl, Armin; Roithmayr, Friedrich Hrsg.: Wirtschaftsinformatik-Lexikon. Oldenbourg, München, 2004.
- [HIN04] Hinkel, Peter: Digitale Fabrik - guter Start. In Link - about realities and visions, Heftnummer 1, 2004; S. 6–9.
- [HM06] Heinrich, Stefan; Meyer, Gottfried: Ablaufsimulation im VDA. Ein Bericht aus der Arbeitsgruppe. In (Wenzel, S. Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. SCS Publishing House, Erlangen, 2006; S. 423–428.
- [HOM07a] Hommers, Rolf: Ökologische Produktionslogistik: Ökonomische Grundlagen, Funktionen und Ziele der Logistik mit den an Bedeutung gewinnenden ökologischen Einflüssen ... in der Wirtschaft und Industrie im Speziellen. Grin, München, 2007a.
- [HOM07b] Hompel, Michael ten: Beitrag zur Prozessstandardisierung in der Intralogistik. In Logistics Journal, Heftnummer Nicht-referierte Veröffentlichung, 2007b; S. 1–12.
- [INS00] Institute of Electrical and Electronics Engineers: High-Level Architecture (HLA), IEEE Standards 1516, 1516.1, 1516.2. IEEE-Publishing, Washington DC, USA, 2000.
- [INT08] International Organization for Standardization: Qualitätsmanagement, Genf, 2008.

- [JEN07] Jensen, Sven: Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionsdatensystemen am Beispiel einer Job Shop Fertigung. Dissertation. University Press, Kassel, 2007.
- [JH00] Jacob, Dirk; Höhn, Michael: Assembly of Semiconductors Based Microsystems with Sensor Guided Tools. In (Reichl, H. Hrsg.): System Integration in Micro Electronics. VDE-Verlag, Berlin, 2000; S. 193–202.
- [KOE07] Koether, Reinhard: Technische Logistik. Hanser, München, 2007.
- [KÖT03] Köth, Claus-Peter: Die Branche vor der nächsten Revolution. In (Wilhelm Missler Hrsg.): Automobil Industrie. Vogel Business Media, Würzburg, 2003; S. 12–15.
- [KR98] Kuhn, Axel; Rabe, Markus (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- [KRA01] Krause, Frank-Lothar: Digitale Fabrik. In Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Heftnummer 3, 2001, 96; S. 84.
- [KUD00] Kudlich, Thomas: Optimierung von Materialflusssystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation. Dissertation. Herbert Utz, München, 2000.
- [KÜH06] Kühn, Wolfgang: Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner. Hanser, München, 2006.
- [LE01] Luczak, Holger; Eversheim, Walter: Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Springer, Berlin, 2001.
- [LIT61] Little, John D. C.: Operations Research, Vol. 9, No. 3, S. 383-387, Operations Research Society of America and The Institute of Management Sciences, Hanover, MD, USA, 1961
- [LW06] Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [MEN05] Menges, Raimund: Frühzeitige Produktbeeinflussung und Prozessabsicherung. Die Digitale Fabrik ist der Schlüssel zum Erfolg. In (Günter Spur Hrsg.): ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb. Hanser, München, 2005; S. 25–31.
- [MS09] Müller-Sommer, Hannes; Straßburger, Steffen: Ausprägungen und Nutzung der Logistiksimulation im Umfeld der Automobilindustrie. In (Gnauk, A.; Luther, B. Hrsg.): Arbeitsgemeinschaft Simulation - 20. Symposium. Shaker, Aachen, 2009; S. 353–361.
- [MÜL10] Müller-Sommer, Hannes: Aufwände der Belieferungssimulation - eine Umfrage im VDA Arbeitskreis Ablaufsimulation. <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15869>, 23.03.2011.
- [POR04] Porter, Michael E.: Competitive advantage. Creating and sustaining superior performance. Free Press, New York, NY, 2004.
- [RAB03] Rabe, Markus: Modellierung von Layout und Steuerungsregeln für die Materialfluss-Simulation. Fraunhofer IRB, Berlin, 2003.
- [RB07] Rinza, Tobias; Boppert, Julia: Logistik im Zeichen zunehmender Entropie. In (Günthner, W. A. Hrsg.): Neue Wege in der Automobillogistik. Die Vision der Supra-Adaptivität. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007; S. 17–28.

- [RG06] Rabe, Markus; Gocev, Pavel: Simulation Models for Factory Planning Through Connection of ERP and MES Systems. In (Wenzel, S. Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. SCS Publishing House, Erlangen, 2006; S. 223–232.
- [RMW10] Roberts, Laura; Mosen, Riccardo; Winter, Eggert Hrsg.: Gabler Wirtschaftslexikon. Gabler, Wiesbaden, 2010.
- [ROO09] Rooks, Tobias: Rechnergestützte Simulationsmodellgenerierung zur dynamischen Absicherung der Montagelogistikplanung bei der Fahrzeugneutypplanung im Rahmen der Digitalen Fabrik. Dissertation. Shaker, Aachen, 2009.
- [RSW08] Rabe, Markus; Spiekermann, Sven; Wenzel, Sigrid Hrsg.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Springer, Berlin Heidelberg, 2008.
- [SAR09] Sargent, Robert G.: Verification and Validation of Simulation Models. In (Rossetti, M.; Hill, R.; Johansson Björn; Dunkin, A. Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. IEEE-Publishing, Washington DC, 2009; S. 162–176.
- [SAR82] Sargent, Robert G.: Verification and validation of simulation models. In (Cellier, F. E. Hrsg.): Progress in modelling and simulation. Proceedings of the course presented during the IASTED Conference Simulation '80 at Interlaken, Switzerland (June 23-27, 1980). Academic Press, London, 1982; S. 159–169.
- [SAR94] Sargent, Robert G.: Verification and Validation of Simulation Models. In (Tew, J. D. Hrsg.): Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference. IEEE-Publishing, New York, 1994; S. 77–87.
- [SBM10] Straßburger, Steffen; Bergmann, Sören; Müller-Sommer, Hannes: Modellgenerierung im Kontext der Digitalen Fabrik - Stand der Technik und Herausforderungen. In (Zülch, G.; Stock, P. Hrsg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik: Organisation und Personal. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2010; S. 37–44.
- [SCG79] Schlesinger, Steward et al.: Terminology for model credibility. In SIMULATION, Heftnummer March, 1979, 32; S. 103–104.
- [SCH06a] Schneider, Markus; Otto, Andreas: Taktische Logistikplanung vor Start-of-Production (SOP). In: Logistikmanagement Nr. 2, 8. Jahrgang, (2006), Fraunhofer IML, Dortmund, S. 60
- [SCH06b] Schuh, Günther: Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2006.
- [SCH08] Schneider, Markus: Logistikplanung in der Automobilindustrie. Konzeption eines Instruments zur Unterstützung der taktischen Logistikplanung vor "Start-of-Production" im Rahmen der Digitalen Fabrik. Gabler, Wiesbaden, 2008.
- [SCH09] Schulte, Christof: Logistik. Wege zur Optimierung der Supply Chain. Vahlen, München, 2009.
- [SCH87] Schmid, Bernd: Modellaufbau und Validierung. In (Biethahn, J.; Schmid, B. Hrsg.): Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. Springer, Berlin, 1987; S. 52–60.
- [SEL05] Selke, Christian: Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung. Dissertation. In (Reinhart, G. Hrsg.): Schriftreihe Forschungsberichte iw. Herbert Utz, München, 2005.

- [SO06] Schneider, Markus; Otto, Andreas: Taktische Logistikplanung vor Start-of-Production (SOP). In (Fraunhofer SCS Hrsg.): Logistik Management. Zeitschrift der Kommission Logistik, 2006; S. 62.
- [SPL95] Splanemann, Ralph: Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen aus systemneutral definierten Unternehmensdaten. In (Universität Bremen Hrsg.): Bremer Schriften zur Betriebstechnik und Arbeitswissenschaft. Mainz Verlag, Aachen, 1995.
- [SSH03] Straßburger, Steffen; Schmidgall, Günther; Haasis, Sigmar: Distributed manufacturing simulation as an enabling technology for the digital factory. In (Mukundan, G. Hrsg.): Journal of Advanced Manufacturing Systems (JAMS). World Scientific, Singapore, 2003; S. 111–126.
- [SSS06] Straßburger, Steffen et al.: Werkzeuge und Trend der Digitalen Fabrikplanung. Analyse der Ergebnisse einer Onlinebefragung. In (Wenzel, S. Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik. SCS Publishing House, Erlangen, 2006; S. 391–402.
- [TKH06] Thomas, Frank; Kilger, Christoph; Hermann, Ralf: Informationstechnologie als Treiber der Intralogistik. In (Arnold, D. Hrsg.): Intralogistik. Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006; S. 193–237.
- [VDA10] VDA - Verband der Automobilindustrie: Empfehlung 4500 - Kleinladungsträger. Beuth, Berlin, 2010.
- [VDA11] VDA - Verband der Automobilindustrie: Empfehlung 4810 - Ausprägungen der Logistiksimulation. Beuth, Berlin, 2011.
- [VDI08a] VDI - Verein Deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 3633-1 Simulation von Logistik- Materialfluss- und Produktionssystemen. Beuth, Berlin, 2008a.
- [VDI08b] VDI - Verein Deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 4499-1 Digitale Fabrik, Grundlagen. Beuth, Berlin, 2008b.
- [VDI09] VDI - Verein Deutscher Ingenieure: Fabrikplanung Planungsvorgehen. Beuth, Berlin, 2009.
- [VDM04] VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenhersteller: Intralogistik. Forum Intralogistik, Frankfurt am Main, 2004.
- [WAC03] Wacker, Roland: Automatische Generierung von Simulationsmodellen auf Basis einer Socket-Lösung mit Planungsdatenbank und dem Simulationssystem Quest von Delmia. Am Beispiel des Montagewerkes 2 in Tuscaloosa /USA des Unternehmens DaimlerChrysler, Sindelfingen, 2003.
- [WEN02] Wenzel, Sigrid: Modellbildung in der ereignisdiskreten Simulation. In (Arbeitsgemeinschaft Simulation Hrsg.): ASIM Nachrichten, 2002-2; S. 10–15.
- [WIL02] Wildemann, Horst: Produktionscontrolling. Controlling von Verbesserungsprozessen in Unternehmen. TCW Transfer-Centrum-Verl, München, 2002.
- [WJ08] Wenzel, Sigrid; Jauss, Anke: Diskussion eines Benchmark-Verfahrens für den Vergleich von Simulationswerkzeugen in Produktion und Logistik. In (Rabe, M. Hrsg.): Advances in Simulation for Production and Logistics Applications. 13. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Fraunhofer IRB, Berlin, 2008; S. 565–574.

- [WW08] Wurdig, Thomas; Wacker, Roland: Generische Simulationslösung für Fördertechnik. In (Rabe, M. Hrsg.): *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. 13. ASIM Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik. Fraunhofer IRB, Berlin, 2008; S. 11–20.
- [WW96] Wand, Yair; Wang Richard Y.: Anchoring Data Quality Dimensions in Ontological Foundations. In (Vardi, M. Y. Hrsg.): *Communications of the ACM*, New York, 1996; S. 86–95.
- [WWC08] Wenzel, Sigrid; Weiß, Matthias; Collisi-Böhmer, Simone; Pitsch, Holger; Rose, Oliver Hrsg.: *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [WZ09] Westkämper, Engelbert; Zahn, Erich: *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Springer, Berlin, 2009.
- [ZEN06] Zenner, Christian: *Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung*. Dissertation. In (Bley, H.; Weber, C. Hrsg.): *Schriftreihe Produktionstechnik*, Band 37. Universität des Saarlands, Saarbrücken, 2006.

8 Anhang

8.1 SQL Statements der Filterklasse 3

```

Select
    TF_LP_ID,
    AF_1,
    AF_2,
    AF_3,
    `Berechnete Belieferungsform`,
    `Geplante Belieferungsform`,
    Case
        When `Berechnete Belieferungsform` = `Geplante
Befierungsform`
            Then ''
            Else 'Prüfung erforderlich'
    End Prüfung

From
(Select
    TF_LP_ID,
    AF_1,
    AF_2,
    AF_3,

    Case
        When (AF_1 = 'false' AND AF_2 = 'false' AND AF_3 = 'true')
            Then 'JIT'
        When (AF_1 = 'true' AND AF_2 = 'false' AND AF_3 = 'true')
            Then 'JIT'
        When (AF_1 = 'true' AND AF_2 = 'true' AND AF_3 = 'true')
            Then 'JIS'
        When (AF_1 = 'true' AND AF_2 = 'true' AND AF_3 = 'false')
            Then 'JIS'
        Else 'LLZ'
    End `Berechnete Belieferungsform`,
    Belieferungsform As `Geplante Belieferungsform`

From
(Select
    TF_LP_ID,
    Case
        When `Laenge Aussen` IS NULL
            Then 'false'
        When `Behälterprinzip` IS NULL
            Then 'false'
        When `Breite Aussen` IS NULL
            Then 'false'
        When `Anzahl SNR` IS NULL
            Then 'false'
        When LSR_Flaechenangebot IS NULL
            Then 'false'
        When (`Breite Aussen` / 1000) * (`Laenge Aussen` / 1000) *
`Anzahl SNR` * `Behälterprinzip` <= LSR_Flaechenangebot
            Then 'true'
        Else 'false'
    End AF_1,

```

```

Case
  When `Informationsfluss Daimler-Lieferant [min]` IS NULL
    Then 'false'
  When `Entfernung_Lieferant [km]` IS NULL
    Then 'false'
  When `Durchschnittsgeschwindigkeit LKW [km/h]` IS NULL
    Then 'false'
  When `Handlungszeit (Lieferant) [min]` IS NULL
    Then 'false'
  When `Gebindeverdichtung [min]` IS NULL
    Then 'false'
  When `Sicherheitszuschlag für Transport (Daimler) [%]` IS NULL
    Then 'false'
  When `Entfernung WE --> Lager [m]` IS NULL
    Then 'false'
  When `Durchschnittsgeschwindigkeit FFZ [m/s]` IS NULL
    Then 'false'
  When `Handlungszeit (Daimler) (WE --> Lager) [min]` IS NULL
    Then 'false'
  When Lager_BO_Entf IS NULL
    Then 'false'
  When `Handlungszeit (Daimler) (Lager --> BO)` IS NULL
    Then 'false'
  When K_ID IS NULL
    Then 'false'
  When ((`Informationsfluss Daimler-Lieferant [min]`*60)+((1+
`Sicherheitszuschlag für Transport (Daimler)
[%]`/100)*((`Handlungszeit (Lieferant) [min]`*60)+(`Gebindeverdichtung
[min]`*60)+(`Entfernung_Lieferant [km]`/`Durchschnittsgeschwindigkeit
LKW [km/h]`)*3600))+(`Transportzeit (intern) WE --> Lager
[min]`*60)+((`Handlungszeit (Daimler) (Lager -->
BO)`)+(Lager_BO_Entf/`Durchschnittsgeschwindigkeit FFZ [m/s]`))) <=
(((`Arbeitszeit / Tag
[h]`/(Max_LP_BaurateProTag*Max_LP_Prozessbaurate/100))*K_ID)*3600+(`Ze
itpuffer Vor-IB [h]`)*3600)
    Then 'true'
  Else 'false'
End AF_2,

Case
  When LP_BaurateProTag IS NULL
    Then 'false'
  When LP_Prozessbaurate IS NULL
    Then 'false'
  When `Teile pro Fahrzeug` IS NULL
    Then 'false'
  When `Behälterinhalt in Stück` IS NULL
    Then 'false'
  When `Behälter Anz. pro Lage` IS NULL
    Then 'false'
  When `Behälter Lagen` IS NULL
    Then 'false'
  When (`Umschlagsgrenze [Umschläge]`) <=
((LP_BaurateProTag*LP_Prozessbaurate*`Teile pro
Fahrzeug`)/(`Behälterinhalt in Stück`*`Behälter Anz. pro
Lage`*`Behälter Lagen`))
    Then 'true'

```

```
        Else 'false'  
    End AF_3,  
    Belieferungsform  
  
From  
`mat_20110506_rv_br-xxx_v15`.fk3_belieferungsform_ebs  
  
) Abfrage  
  
) Prüfung
```

8.2 *Aufbau des Graphenmodells für Filterklasse 3*

Das Konzept der Filterklasse 3 besteht aus der automatisierten Prüfung der Datensätze hinsichtlich ihrer inhaltlichen Korrektheit. Um die Prüfung automatisiert durchführen zu können, müssen alle Entscheidungen innerhalb der vorliegenden Informationen abbildbar sein. Ein Beispiel hierfür ist wie in Kapitel 5.3 beschrieben die Entscheidung, ob der Zeithaushalt der Montageversorgung ausreichend ist. Dazu muss ein Graphenmodell der Montagehalle aufgebaut werden, mit dessen Hilfe die Filterklasse prüfen kann, ob für die gewählte Belieferungsform der Zeithaushalt ausreichend ist. Aus dem Graphenmodell kann der kürzeste Weg von dem Wareneingang über die Lager bis zum Bereitstellort ermittelt werden (Dijkstra-Algorithmus), woraus wiederum die benötigte Zeit für die Belieferung errechnet werden kann. Im Folgenden wird ein Graphenmodell für die Filterklasse 3 in Anlehnung an [ARN95] aufgebaut:

8.2.1 **Informationsbedarf des Graphenmodells**

Die für die Erstellung eines Graphenmodells relevanten Informationen finden sich im Mengengerüst der Logistikplanung sowie im spezifischen Hallenlayout. Die in Tabelle 8.1 dargestellten Attribute werden in einem SAP-BI-Report definiert und die einzelnen Tabellen können danach automatisiert in eine Datenbank übergeben werden, verknüpft über den Primärschlüssel. Diese Datenbank ist das Grundgerüst für die Erstellung eines Graphenmodells.

<ul style="list-style-type: none"> • Teilefamilie_ID • Werk • Baureihe • Band • TF_Benennung 	Durch diese allgemeinen Informationen kann eine Teilefamilie eindeutig identifiziert werden.
<ul style="list-style-type: none"> • Teile / Fahrzeug • Baurate • Prozessbaurate • Teile / Arbeitstag 	Der tägliche Materialverbrauch im beobachteten Bereich ist die Basis für die Analyse des Materialflusses.
<ul style="list-style-type: none"> • Behälter-Inhalt am Bereitstellort • Behälter_ID am Bereitstellort • Behälter-Typ am Bereitstellort • Behälter-Art am Bereitstellort • Behälter-Prinzip am Bereitstellort 	Die Beschaffenheit und Anzahl der Behälter wird für die Berechnung der Lieferfrequenz benötigt.
<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeug • max. Transportkapazität • \emptyset-Handlingszeit • \emptyset-Fahrgeschwindigkeit • Fahrzeit • Standard-Logistikplan_ID • Transportzeit 	Die Kenndaten der Transportfahrzeuge werden für die Berechnung der Versorgungszeiten zwischen Bereitstellorten und Lagern benötigt.
<ul style="list-style-type: none"> • Materialzone-Karosse • Materialzone-Seite • Vollgut_Lager und Leergut_Lager 	Die Materialzonen am Band und die Lager sind Quellen und Senken der Materialflüsse.
<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitszeit / Tag 	Zeitbasis für den Verbrauch.
<ul style="list-style-type: none"> • Verbrauch Behälter am Bereitstellort / Arbeitstag • Frequenz • Reichweite 	Durch den Materialverbrauch und die Behälterdaten können Lieferfrequenzen berechnet werden.

Tabelle 8.1: Informationsbedarf des Graphenmodells

Das Hallenlayout bildet die Grundlage für die graphentheoretische Darstellung des Materialflusssystemes. Der physische Materialfluss lässt sich damit statisch beschreiben. Dafür werden alle materialflussrelevanten Objekte identifiziert und in das Graphenmodell übernommen.

- Logistikstationen (WE, Lager, Bereitstellorte)
- Fahrwegeckpunkte

Der Aufbau des Graphenmodells ist Anfangs analog zum Aufbau des Layouts im Simulator für Belieferungssimulationen. Begonnen wird mit der Identifikation der relevanten Logistikstationen, im nächsten Schritt werden die exakten Lagerflächen mit der dazugehörigen Verbindung zum Wegenetz sowie die Fahrwegeckpunkte aufgenommen. Die verwendeten

Logistikstationen (LSP) werden dem Mengengerüst entnommen und mit dem Layout verknüpft (LSR, xyz-Koordinaten). Im nächsten Schritt werden die Fahrstraßen des Layouts vermessen. Gemessen wird die Mitte der jeweiligen Fahrstraße. Die Fahrstraße wird maßstabsgerecht als Linie im Wegenetz dargestellt (vgl. Abbildung 8.1)

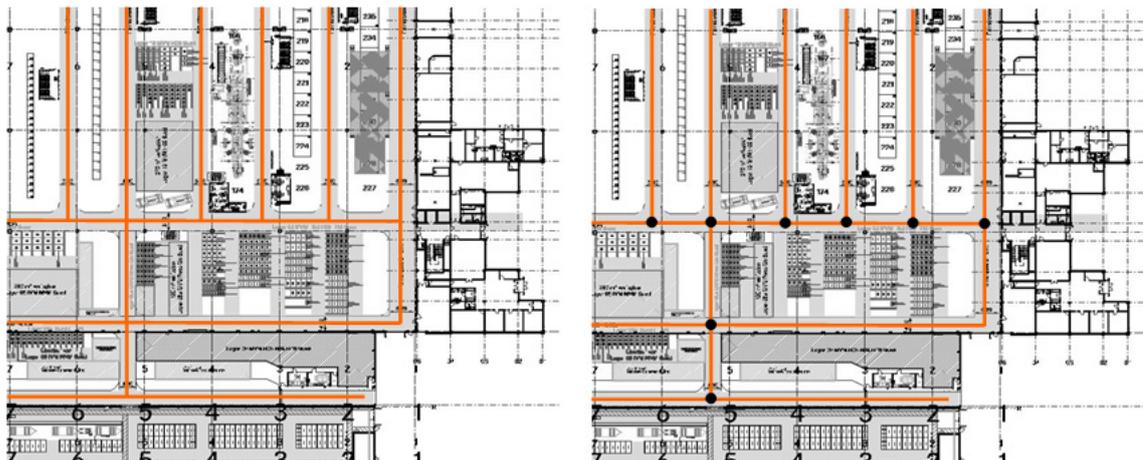


Abbildung 8.1: Wegenetz im Layout mit Knotenpunkten

Alle Kreuzungen des Wegenetzes sind Fahrwegeckpunkte. An diesen Punkten entscheidet das Flurförderzeug nach einem Regelwerk seine neue Richtung. Nachdem alle Wegstrecken vermessen wurden, wird für den Graphenaufbau das Layout der Maßstab in die entsprechenden absoluten Werte umgerechnet.

8.2.2 Aufbau des Graphenmodells

Um Entfernungen im Wegenetz performant ermitteln zu können, wird ein Modell aus einer Kombination aus Graphentheorie und Matrizenrechnung aufgebaut, deren Datenbasis das Mengengerüst der entsprechenden Baureihe ist. Grundlage für das Graphenmodell ist das dazugehörige Hallenlayout. Die notwendigen Knoten und Kanten werden wie folgt definiert:

- Knoten: Wareneingang, Lager, Bereitstellorte, Fahrwegeckpunkte
- Kanten: gemitteltes Wegenetz

Alle vorhandenen Knoten werden fortlaufend nummeriert und die Kanten werden mit den gemessenen Entfernungen versetzt. Als Zwischenergebnis entsteht ein ungerichteter und bewerteter Graph, der alle relevanten Informationen des Hallenlayouts enthält (vgl. Abbildung 8.2).

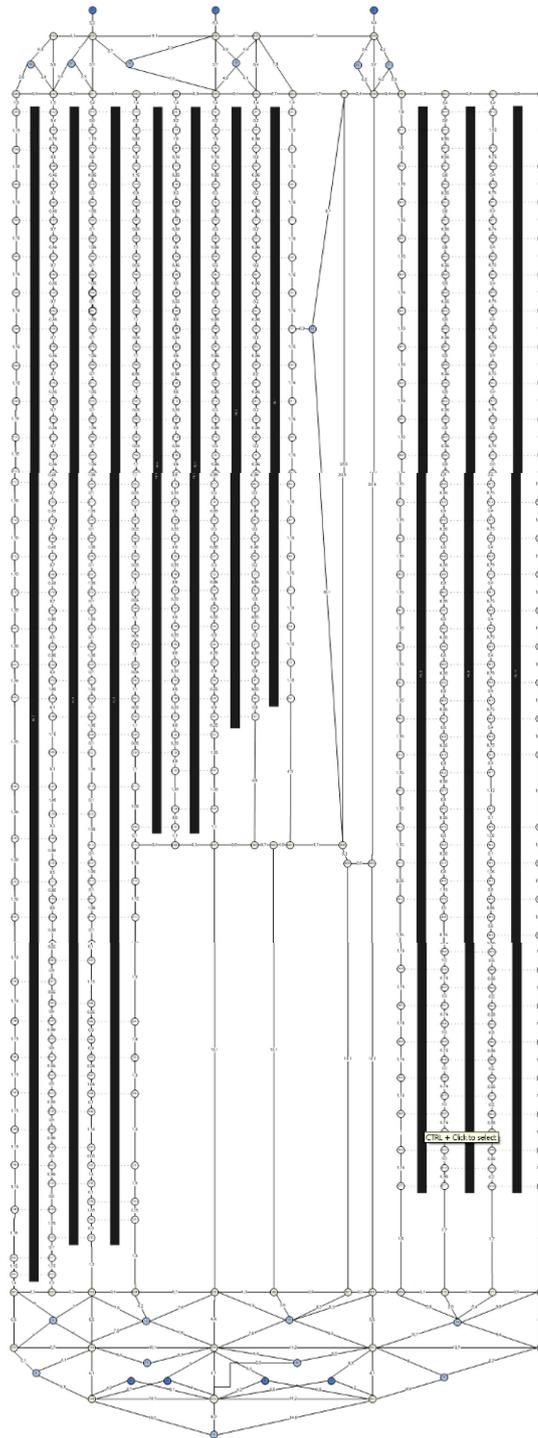


Abbildung 8.2: Ungerichteter und bewerteter Graph der Montagehalle

Jetzt können die Materialflüsse zwischen den Logistikstationen durch eine eindeutige Folge von Knotennummern ausgedrückt werden. In Abbildung 8.5 wird exemplarisch der Transportweg eines Staplers zwischen dem Lager 05a und dem Bereitstellort 19 (rechts) visualisiert.

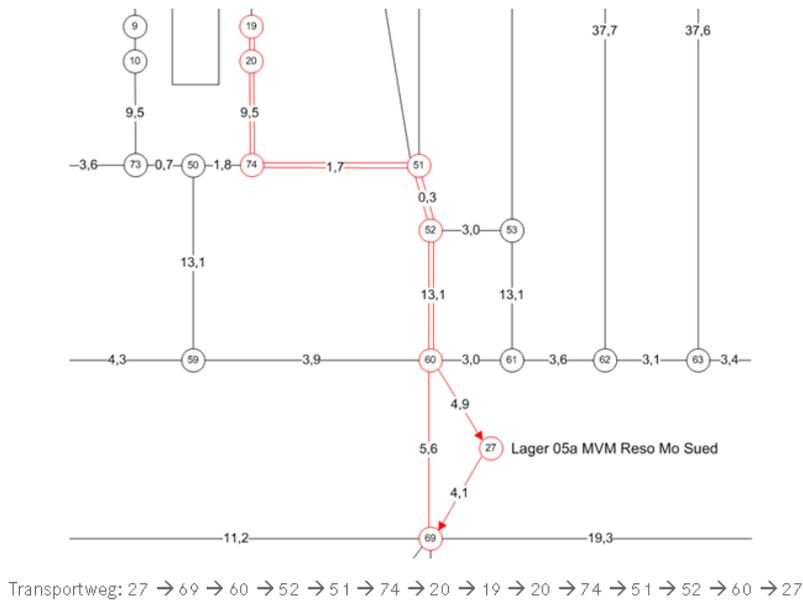


Abbildung 8.5: Transportweg zwischen Lager und Bereitstellort mit Knotenabfolge

8.2.3 Matrixmodell

Die verwendeten Methoden basieren auf der Matrizenrechnung. Der Aufbau der benötigten Matrizen wird in den folgenden Kapiteln beschrieben, bevor die konkrete Entfernung zwischen zwei Knotenpunkten ermittelt werden kann.

8.2.3.1 Adjazenzmatrix

Mit Hilfe der Adjazenzmatrix werden Struktur und Flussrichtung eines Graphen in einem Zahlenschema gespeichert. Dies wird durch die Definition der Nachbarschaftsbeziehung der einzelnen Knoten erreicht, vgl. Abbildung 8.6.

Die Elemente sind definiert als:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{falls eine Kante } \langle i, j \rangle \text{ existiert} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} = m$$

Dies bedeutet, die Anzahl der Elemente a_{ij} ist gleich der Anzahl der Kanten m (nach [ARN95], S. 53). Im vorliegenden Prototypen wird die Matrix händisch erstellt, mittels einer Schnittstelle können die Kanten und Knoten alternativ auch automatisiert ermittelt werden.

$$\begin{pmatrix}
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0
 \end{pmatrix}$$

Abbildung 8.6: Auszug der Adjazenzmatrix

8.2.3.2 Vorgängermatrix

Die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Knoten werden ebenfalls in der Vorgängermatrix abgebildet. Ihre Elemente werden wie folgt definiert:

$$v_{ij} = \begin{cases} i & \text{falls } \langle i, j \rangle \in E \text{ oder } i = j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Vorgängermatrix kann somit wie in Abbildung 8.7 dargestellt direkt aus der Adjazenzmatrix ermittelt werden.

1. Die Werte der Adjazenzmatrix werden mit dem Zeilenindex ersetzt
2. Die Werte der Hauptdiagonalen werden durch den Zeilenindex ersetzt

Adjazenzmatrix	Zeilenindex	Vorgängermatrix
$ \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} $	$ \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{pmatrix} $	$ \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 5 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 6 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 7 & 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 8 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 & 9 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 10 & 10 \end{pmatrix} $

Abbildung 8.7: Entwicklung der Vorgängermatrix

Durch die zeilenweise Lesung der Vorgängermatrix werden folgende Informationen sichtbar:

Zeile 1: Knoten 1 ist Vorgänger von sich selbst und von Knoten 2. Dies bedeutet, es existiert die Kante $\langle 1, 2 \rangle$. Die Vorgängerbeziehung $\langle 1, 1 \rangle$ ist mathematisch begründet und stellt keinen Verweis auf sich selbst dar.

Zeile 2: Knoten 2 ist Vorgänger von sich selbst, von Knoten 1 und Knoten 3, d.h. die Kanten $\langle 1, 2 \rangle$ und $\langle 2, 3 \rangle$ existieren.

Der Vergleich der beiden Matrizen zeigt den gleichen Informationsgehalt, die Nachbarschaftsbeziehungen werden korrekt abgebildet.

8.2.3.3 Bewertungsmatrix

Die Bewegungen auf den Kanten im Graphen werden durch eine Bewertungsmatrix abgebildet, dies wird durch folgende Elemente definiert:

$$c_{ij} = \begin{cases} \text{Kantenbewertung } \langle i, j \rangle & \text{für alle Kanten } \langle i, j \rangle \\ 0 & \text{für } i = j \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Bewertungsmatrix wird nicht aus den beiden schon entwickelten Matrizen berechnet, jedoch können über die Adjazenzmatrix die konkreten Werte für vorhandene Kanten zugeordnet werden. Die Elemente der Hauptdiagonalen sind 0, alle weiteren Elemente, die nicht über eine Kante in Beziehung stehen, erhalten den Wert unendlich. Somit ist die Entfernung zu sich selbst 0 und zu Elementen, die nicht verkantet sind, unendlich groß (vgl. Abbildung 8.8).

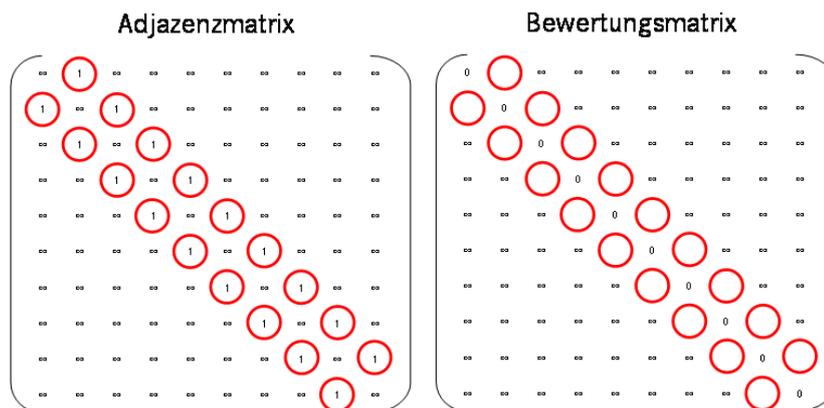


Abbildung 8.8: Entwicklung der Bewertungsmatrix

Die komplette Abbildung des gerichteten und ungerichteten Graphen wird in der Bewertungsmatrix dargestellt. Als Information ist sowohl die Nachbarschaftsbeziehung als auch die konkrete Entfernung zwischen den Knoten abgebildet. Nun kann im nächsten Schritt die Entfernung zwischen zwei Knoten im Hallenlayout ermittelt werden.

8.2.4 Ermittlung kürzester Wege

Die Ermittlung der kürzesten Wege zwischen zwei Logistikstationen ist für die Ermittlung des Zeitfensters für Belieferungen relevant. Um die Entfernungen automatisiert verwenden zu können, wird der Tripel-Algorithmus nach Floyd und Warshall [FLO62] verwendet. Voraussetzung dafür ist das Vorliegen der Bewegungsmatrix $C(G)$ und der Vorgängermatrix $V(G)$. Der Algorithmus ersetzt die Pfeilbewertungen c_{jk} bzw. Nachbarschaftsverhältnisse v_{ik} durch die Weglängen c^*_{ik} der bisher gefundenen Wegabschnitte und den dazugehörigen Vorgängerknoten v^*_{ik} . Das Ergebnis aller Transformationen wird in der Kürzeste-Wege-Matrix $D(G)$ und der dazu passenden Routenmatrix $R(G)$ dargestellt. Die Ermittlung erfolgt iterativ. In jedem Iterationsschritt werden alle Tripel (i, j, k) mit $i=1(1)n, j$ fest, $k=1(1)n$ untersucht. Für die Iteration 1 sind alle Tripel $(i, 1, k)$, für Iteration 2 $(i, 2, k)$ und für Iteration n (i, n, k) . Diese Tripel werden für jeden Knoten überprüft, ob die Summe aus den bisherigen kürzesten Wegen von (i) nach (j) und von (j) nach (k) kleiner ist als der bisher identifizierte kürzeste Weg von (i) nach (k) :

$$c^*_{ik} + c^*_{jk} < c^*_{ik}$$

Wenn diese Bedingung erfüllt wird, so wird c_{ik} durch die Entfernung c^*_{ik} des ermittelten Teilweges über den Knoten j ersetzt. Der kürzeste Weg ist allerdings erst dann gefunden, wenn die Summe aller Teilwege der kürzeste Weg ist. Nach Iterationsschritt n bricht der Tripel-Algorithmus ab, darauf wird die Bewertungsmatrix $C(G)$ in die Kürzeste-Wege-Matrix transformiert, wie auch die Transformation der Vorgängermatrix $V(G)$ in die Routenmatrix $R(G)$.

$$D(G) = C^{(n)}(G) \quad R(G) = V^{(n)}(G)$$

Die Routenmatrix bildet nun die Vorgängerknoten mit den jeweiligen kürzesten Wegen ab, mittels rekursiver Vorgehensweise können nach [ARN95] daraus die Knotenfolgen der kürzesten Wege abgeleitet werden.

Die entwickelte Routenmatrix wird nun in die MySQL-Datenbank überführt, damit der Bewertungsalgorithmus selbständig den Weg auslesen und damit die notwendige Zeit ermitteln kann, vgl. Kapitel 5.3.