

UNIVERSITÄT DES SAARLANDES

SCHRIFTENREIHE PRODUKTIONSTECHNIK

Herausgeber: H. Bley und C. Weber



Band 41

Jürgen Ulrich Fritz

**Zielführende Modellierung und Analyse
schlanker Fertigungssysteme mit der
Digitalen Fabrik**

LFT

Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM

Saarbrücken 2007

Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik

Dissertation zur Erlangung des Grades des
Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III
- Chemie, Pharmazie und Werkstoffwissenschaften -
der Universität des Saarlandes

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Jürgen Ulrich Fritz

Tag der Einreichung: 12.03.2007

Tag des Kolloquiums: 19.07.2007

Dekan:	Prof. Dr. Uli Müller
Vorsitzender:	Prof. Dr. Walter Arnold
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Bley
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Christian Weber
Akademischer Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Nikolay Avgoustinov

Jürgen Ulrich Fritz

Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik

Universität des Saarlandes
Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 41

Geleitwort der Herausgeber

Die Schriftenreihe Produktionstechnik wird von den Inhabern der Lehrstühle für Konstruktionstechnik/CAD (Prof. Dr.-Ing. C. Weber) und für Fertigungstechnik/CAM (Prof. Dr.-Ing. H. Bley) der Universität des Saarlandes gemeinsam herausgegeben. Zweck der Schriftenreihe ist es, die auf dem Gebiet der Produktionstechnik an der Universität des Saarlandes erarbeiteten Forschungsergebnisse einer breiteren Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen. In der Schriftenreihe erscheinen in erster Linie die an den Lehrstühlen entstandenen Dissertationen. Daneben werden aber auch andere Forschungsberichte, die in den thematischen Rahmen passen und von allgemeinem Interesse sind, in die Schriftenreihe aufgenommen. Die Herausgeber wünschen sich ein reges Interesse an der Schriftenreihe und würden sich freuen, wenn hieraus fruchtbare Dialoge mit Praktikern und Forschern entstünden.

Prof. Dr.-Ing. C. Weber

Prof. Dr.-Ing. H. Bley

© Universität des Saarlandes 2007
Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM
Prof. Dr.-Ing. Helmut Bley
Postfach 15 11 50
D – 66041 Saarbrücken

ISBN 978-3-930429-70-7
ISSN 0945-6244

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Robert Bosch GmbH sowie am Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes.

Die hochschulseitige Betreuung erfolgte durch Herrn Professor Dr.-Ing. Helmut Bley, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes. Ihm danke ich dafür, dass er meine Arbeit stets gefördert hat und immer zu fruchtbaren Diskussionen bereit war.

Herrn Professor Dr.-Ing. Christian Weber, Fachgebietsleiter Konstruktionstechnik an der TU Ilmenau, danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit sowie die Übernahme des Korreferates.

Besonders danke ich den Kollegen der zentralen Forschung und Vorausentwicklung der Robert Bosch GmbH. Sie haben durch ein außergewöhnlich gutes Arbeitsklima genauso zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, wie durch zahlreiche, Gewinn bringende Diskussionen. Hervorheben möchte ich dabei meinen Vorgesetzten Herrn Dr. Gunnar Hellener, der diese Arbeit stets unterstützt hat und durch welchen es mir ermöglicht wurde, Ideen und Ergebnisse bei Konferenzen vor internationalem Fachpublikum zu präsentieren. Herrn Dr.-Ing. Detlev von der Osten-Sacken sowie Herrn Dr.-Ing. Claas Christian Wuttke danke ich für Ihr Engagement, mich bei der Themenfindung zu unterstützen. Herrn Dipl.-Ing. Christian Luckner danke ich für die fachliche Betreuung und die notwendigen Freiräume, die für die Erstellung dieser Arbeit unerlässlich waren.

Ich danke auch den Kollegen des Lehrstuhls für Fertigungstechnik/CAM der Universität des Saarlandes, die mich als externen Doktoranden auf verschiedene Weise unterstützt haben. Vielen Dank auch an Frau Eva Kaiser M.A., die mich bei der Erstellung von Veröffentlichungen und bei der Überarbeitung dieser Arbeit mit viel Engagement unterstützt hat.

Nicht zuletzt danke ich meiner geliebten Frau Verena-Annina für ihre Geduld und ihr Verständnis sowie ihre vielseitige Hilfe während meiner Promotionszeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich während meiner gesamten Ausbildung in jeder erdenklichen Art unterstützt haben.

Leinfelden-Echterdingen, im Juli 2007

Jürgen Ulrich Fritz

Für Celina Marie

Kurzfassung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit stellt Methoden und Werkzeuge zur Verfügung, die eine zielführende Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen ermöglichen und unterstützen. Neben innovativen Einsatzmöglichkeiten der Materialflusssimulation werden dabei auch alternative Methoden und Werkzeuge verwendet. Die Wahl der zielführenden Analyse-methode wird durch eine Heuristik sichergestellt. Deren Entwicklung ist wesentliches Ergebnis dieser Arbeit. Als Grundlage dieser Heuristik dient ein Portfolio, welches Analyseprobleme der Fabrik- und Fertigungsplanung klassifiziert, und zwar entsprechend dem für die Modellerstellung erforderlichen Detaillierungsgrad und der zu beobachtenden Untersuchungshäufigkeit. Abhängig von den genannten Kriterien wird eine geeignete Analyse-methode zugeordnet.

Zu den Analysemethoden des Portfolios zählen der Simulationsmodelleraufbau, zur Simulation alternative Methoden und Werkzeuge, simulationsbasierte Kennfelder und der teilautomatische Simulationsmodelleraufbau aus statischen Fertigungssystemmodellen der Digitalen Fabrik. Für die Entwicklung der Heuristik werden fehlende Methoden und Werkzeuge identifiziert, die zur Anwendung der Analysemethoden erforderlich sind. Die systematische Beseitigung dieser Defizite ist wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit.

Defizite bestehen bei sämtlichen Analysemethoden mit Ausnahme des Simulationsmodelleraufbaus. Die spezifischen Vorteile alternativer Methoden und Werkzeuge sowie die der Simulation werden durch geeignete Konzepte für ihren kombinierten Einsatz genutzt. Simulationsbasierte Kennfelder stellen einen neuartigen Ansatz dar, der eine einfache und schnelle Analyse ermöglicht, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind und ein geeignetes Kennfeld vorliegt. Da der Initialaufwand der Erstellung von Kennfeldern hoch ist, wird eine Methodik erarbeitet, um dies effizienter zu machen. Außerdem wird ein Schnittstellenkonzept entwickelt und implementiert, welches den teilautomatischen Simulationsmodelleraufbau aus statischen Fertigungssystemmodellen der Digitalen Fabrik erlaubt.

Durch ausgewählte Praxisbeispiele erfolgen Tests und eine Evaluation aller Methoden und Werkzeuge der zielführenden Modellierung und Analyse.

Abstract

The subject thesis provides methods and tools, with which target-oriented modeling and analysis is made possible and supported. In addition to innovative fields of application for material flow simulation, alternative methods and tools are employed. The selection of a target-oriented analytic method is backed by the use of a heuristic procedure. The development of the heuristics is an important result of this thesis. The heuristics is based on a portfolio organizing analytical problems of factory and manufacturing planning according to the required level of detail and the observed frequency of investigation. Depending on these criteria, a suitable analytic method is assigned.

The analytic methods of the portfolio are simulation modeling, alternative methods and tools, simulation-based characteristic diagrams and semi-automatic simulation modeling based on static manufacturing system models of the Digital Factory. The development of the heuristics identifies methods and tools, which are required, but still missing for applying the analytic methods. Systematically removing these deficits is an essential element of this thesis.

Deficits are identified for all analytic methods with the exception of simulation modeling. The specific advantages of alternative methods and tools as well as simulation are combined, using appropriate concepts. Simulation-based characteristic diagrams are a novel approach, allowing for easy and fast analysis, provided certain prerequisites are satisfied and an appropriate characteristic diagram is available. Because of considerable initial efforts creating simulation-based characteristic diagrams, a methodology for reducing these efforts is provided. Furthermore, an interface concept is developed and implemented, allowing for semi-automatic simulation modeling based on static manufacturing system models of the Digital Factory.

All methods and tools of target-oriented modeling and analysis are tested and evaluated through selected practical examples.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2	Modellbasierte Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik	5
2.1	Begriffsabgrenzungen	5
2.2	Rand- und Rahmenbedingungen	7
2.2.1	Marktumfeld der Fabrik- und Fertigungsplanung	7
2.2.2	Rechnerunterstützung im Produktentstehungsprozess	11
2.2.3	Produktionssysteme zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme	15
2.3	Analyse und Modellierung von Fertigungssystemen	19
2.3.1	Analyse von Fertigungssystemen	19
2.3.2	Modellierung von Fertigungssystemen	25
2.4	Zusammenfassung und Fazit	43
3	Heuristik zur Auswahl zielführender Methoden für die Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen	45
3.1	Einführung	45
3.2	Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio	46
3.2.1	Simulationsmodellenaufbau	47
3.2.2	Teilautomatischer Simulationsmodellenaufbau	49
3.2.3	Alternative Methoden und Werkzeuge	50
3.2.4	Simulationsbasierte Kennfelder	51
3.3	Zusammenfassung und Fazit	52
4	Alternative Methoden und Werkzeuge	55
4.1	Einführung	55
4.2	Verifikation und Validierung von Warteschlangenmodellen	56
4.3	Optimierung mittels Warteschlangenmodellen	59
4.4	Einsatzgebiete von Warteschlangenmodellen	60
4.4.1	Workshop-begleitender Einsatz von Warteschlangenmodellen	60
4.4.2	Kombination von Simulations- und Warteschlangenmodellen	62
4.5	Zusammenfassung und Fazit	69

5	Simulationsbasierte Kennfelder	71
5.1	Einführung	71
5.2	Grundlagen von Kennlinien und Kennfeldern	71
5.2.1	Kennzahlen und Kennwerte	71
5.2.2	Darstellungsformen für Kennlinien und Kennfelder	72
5.3	Kennfelder in der Fabrik- und Fertigungsplanung	74
5.4	Simulationsbasierte Kennfelder	77
5.4.1	Ansatz und Potenziale simulationsbasierter Kennfelder	77
5.4.2	Klassifizierung simulationsbasierter Kennfelder	80
5.4.3	Nach- und Vorteile simulationsbasierter Kennfelder	81
5.5	Methodik für die Erzeugung simulationsbasierter Kennfelder	82
5.5.1	Aufbau eines generischen Simulationsmodells	83
5.5.2	Festlegung der Simulationsdaten	86
5.5.3	Durchführung von Sensitivitätsanalysen	96
5.5.4	Entwicklung geeigneter Kennzahlen	109
5.5.5	Erstellung des Kennfeldes	110
5.6	Beispiele für simulationsbasierte Kennfelder	113
5.6.1	Systemneutrale Kennfelder	113
5.6.2	Systemspezifische Kennfelder	122
5.7	Zusammenfassung und Fazit	125
6	Teilautomatischer Simulationsmodelleraufbau	127
6.1	Einführung	127
6.2	Integration der Simulation in die Digitale Fabrik	128
6.3	Statische Fertigungssystemmodelle der Digitalen Fabrik	129
6.3.1	Detaillierungsgrad von statischen Fertigungssystemmodellen und Simulationsmodellen	129
6.3.2	Modellierungsleitfaden der Digitalen Fabrik	131
6.3.3	Modellierungskatalog der Digitalen Fabrik	132
6.4	Konzeption der Simulationsschnittstelle	133
6.4.1	Datenanalyse	134
6.4.2	Softwarearchitektur der Schnittstelle	138
6.4.3	Protokollierung der Modellerstellung	140
6.4.4	Simulationsauswertungen	140
6.5	Implementierung der Simulationsschnittstelle	142
6.5.1	Softwaretechnische Umsetzung	142
6.5.2	Verifikation und Validierung des Schnittstellenkonzeptes	146
6.6	Einsatz der Schnittstelle an einem realistischen Fertigungssystem	149

6.7 Zusammenfassung und Fazit	151
7 Zusammenfassung der Arbeit und kritische Bewertung der Ergebnisse	153
7.1 Alternative Methoden und Werkzeuge	154
7.2 Simulationsbasierte Kennfelder	155
7.3 Teilautomatischer Simulationsmodellbau	156
8 Ausblick	159
Literaturverzeichnis	161
Abbildungsverzeichnis	177
Tabellenverzeichnis	181
Abkürzungsverzeichnis	182
Anhang	186

1 Einleitung

Die Lösung ist immer einfach,
man muß sie nur finden.

Alexander Solschenizyn

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Durch die rasante Entwicklung neuer Technologien werden die Innovationszyklen immer kürzer. Der Übergang vom Verkäufermarkt hin zum Käufermarkt macht darüber hinaus die Entwicklung und Produktion kundenindividueller Lösungen notwendig. Hieraus ergeben sich kürzere Marktzyklen, die häufige Neuplanungen oder Rekonfigurationen von Fertigungssystemen erfordern [HeMi03]. Dadurch werden insbesondere im Serienanlauf Probleme verursacht, die zu Zeitverlusten führen und zusätzliche ungeplante Kosten mit sich bringen [Rein03].

Eine dynamische Adaption an veränderte Anforderungen und eine ständige Optimierung sind in diesem turbulenten Umfeld der Fabrik- und Fertigungsplanung entscheidend. Die Planungsaufgaben werden dadurch immer komplexer. Desweiteren macht wachsender Wettbewerb eine deutliche Qualitätssteigerung der Fabrik- und Fertigungsplanungsergebnisse erforderlich, da Planungsfehler zu verspäteten Markteintritten führen und damit über den Produkterfolg entscheiden können. Deshalb müssen dynamische Zusammenhänge und stochastische Parameter von Fertigungssystemen bereits frühzeitig in der Planung berücksichtigt werden.

Ein etabliertes Werkzeug zur Modellierung, Analyse und Bewertung dynamischer Zusammenhänge von Fertigungssystemen ist die Materialflusssimulation, die in Grob- und Feinplanungsphasen eingesetzt werden kann. In Abhängigkeit von der Planungsphase und der konkreten Fragestellung muss der Detaillierungsgrad der Modellerstellung gewählt werden, welcher auch die erforderliche Güte der Eingangsdaten festlegt.

Generell ist der Aufwand einer Simulationsuntersuchung auch mit den heute verfügbaren Softwareprogrammen sehr hoch. So erfordern auch weniger aufwändige Simulationsuntersuchungen in der Regel mehrere Wochen an Zeitaufwand. Dies verhindert die konsequente

Anwendung der Simulation und somit auch ein großes Potenzial an Verbesserungen, die durch deren Einsatz möglich werden.

Analyseprobleme unterscheiden sich nicht nur nach dem Detaillierungsgrad der erforderlichen Modellierung, sondern auch nach der Untersuchungshäufigkeit der Fragestellungen in der Planungspraxis. Diese Tatsache bleibt bislang unberücksichtigt. Durch Anwendung zur Materialflusssimulation alternativer sowie ergänzender Methoden und Werkzeuge bietet sie jedoch ein hohes Potenzial für eine deutliche Verbesserung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses bei der modellbasierten Analyse von Fertigungssystemen. Für die Verwendung dieser Methoden und Werkzeuge müssen die im Folgenden erläuterten, veränderten Rand- und Rahmenbedingungen der modernen Fabrik- und Fertigungsplanung berücksichtigt werden, die gleichzeitig neue Ansatzpunkte liefern.

Um den eingangs beschriebenen Herausforderungen begegnen zu können, wird heute sowohl organisatorisch als auch softwaretechnisch die Parallelisierung und Optimierung der Produkt- und Fertigungssystem-Entwicklung angestrebt.

Organisatorisch ist dafür der konsequente Planungsmethodeneinsatz erforderlich, welcher durch die unternehmensspezifische Entwicklung und Einführung von Vorgehensweisen zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme ermöglicht wird. Diese Vorgehensweisen, vereinfachend lediglich als *Produktionssystem* bezeichnet, folgen zahlreichen Prinzipien, wie beispielsweise dem der Prozessorientierung, Standardisierung, Flexibilität und Transparenz. Die Umsetzung der Bausteine eines solchen Produktionssystems wird durch die Konsolidierung und Verankerung unternehmensspezifisch angepasster Planungsmethoden im Rahmen eines verbindlichen Planungsleitfadens erreicht.

Zur Beherrschung der Komplexität und Dynamik heutiger Fertigungssystementwicklungen ist neben der beschriebenen organisatorischen Komponente auch die softwaretechnische Unterstützung zwingend erforderlich. Oberbegriff hierfür ist die *Digitale Fabrik*. Die Materialflusssimulation stellt dabei ein wichtiges Modul dar, welches bislang weder vollständig verankert noch datentechnisch integriert ist.

Werden Detaillierungsgrad und Untersuchungshäufigkeit von Analyseproblemen einerseits, sowie die dargelegten veränderten Rand- und Rahmenbedingungen andererseits berücksichtigt, ergeben sich innovative Möglichkeiten einer zielführenden Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen. Durch bedarfsgerechten Einsatz adäquater Methoden verringert sich der Aufwand deutlich.

Abbildung 1-1 zeigt das Spannungsfeld aus Rand- und Rahmenbedingungen sowie alternativer und ergänzender Verfahren der Materialflusssimulation. Im Rahmen dieser Arbeit wird innerhalb des beschriebenen Spannungsfeldes die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur zielführenden Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen ermöglicht und unterstützt.

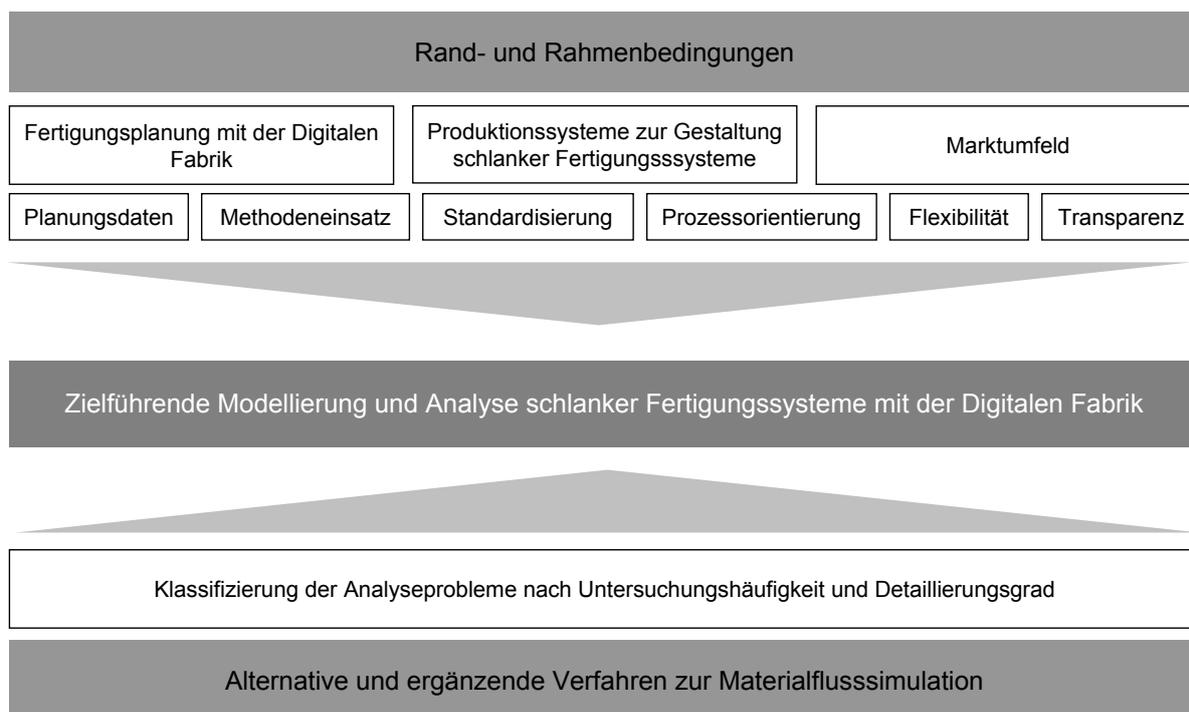


Abbildung 1-1: Spannungsfeld aus Rand- und Rahmenbedingungen sowie alternativer und ergänzender Verfahren der Materialflusssimulation

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Der Aufwand einer Simulationsuntersuchung für die Phasen der Datenbeschaffung und des Modellaufbaus macht einen großen Teil des Gesamtaufwandes aus. Nicht immer ist die Durchführung einer detaillierten Simulationsuntersuchung und damit problemspezifischen Modellerstellung zielführend. Vielmehr muss vor der Durchführung der Studie unter Berücksichtigung von Detaillierungsgrad und Untersuchungshäufigkeit ein geeignetes Vorgehen festgelegt werden. Diese Arbeit hat den Anspruch, die für eine Entscheidungsfindung erforderliche Heuristik und die darin fehlenden Methoden und Werkzeuge zu entwickeln (Kapitel 3).

Der erste Ansatzpunkt einer zielführenden Analyse beinhaltet zur Materialflusssimulation alternative und ergänzende Methoden und Werkzeuge, welche eine schnelle Modellierung und Auswertung ermöglichen. Für bestimmte Anwendungszwecke stellen insbesondere warteschlangenbasierte Verfahren ein wichtiges Werkzeug dar. Ein zentrales Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Darstellung des Einsatzes genannter Verfahren im Rahmen von Simulationsfragestellungen (Kapitel 4).

Um häufig wiederkehrende Fragestellungen bei Analyseproblemen aufwandsarm beantworten zu können, bieten sich die Erstellung und der Einsatz simulationsbasierter Kennfelder an. Jedoch ist mit der Erstellung solcher Kennfelder ein hoher Initialaufwand verbunden. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Entwicklung einer Methodik für die effiziente Erstellung simulationsbasierter Kennfelder. Diese Methodik wird durch Anwendung auf Praxisbeispiele evaluiert. Außerdem wird aufgezeigt, inwiefern der Einsatz dieser Kennfelder aufwändige Analysemethoden für bestimmte Fragestellungen ersetzen kann. Darüber hinaus können Planungsergebnisse durch deren Einsatz qualitativ gesteigert werden (Kapitel 5).

Einen weiteren Ansatzpunkt zur Verminderung des Aufwandes beim Einsatz der Materialflusssimulation bietet die Rechnerunterstützung der modernen Fabrik- und Fertigungsplanung mit der Digitalen Fabrik. Statische Fertigungssystemmodelle, die für die Berechnung von Kosten- und Kapazitätskennzahlen im Rahmen der digitalen Planung generiert werden, können als Grundlage für die Simulationsmodellerstellung verwendet werden. Ziel dieser Arbeit ist deshalb die Konzeption und Implementierung einer geeigneten Schnittstelle für den automatischen Simulationsmodelleraufbau auf Basis statischer Fertigungssystemmodelle der Digitalen Fabrik (Kapitel 6).

Die für diese Arbeit erforderlichen Grundlagen sind Inhalt von Kapitel 2. Eine Zusammenfassung und kritische Bewertung der erzielten Ergebnisse wird in Kapitel 7 vorgenommen. Der Ausblick in Kapitel 8 beinhaltet offene Punkte und Ansätze für weitere Entwicklungs- und Forschungsaktivitäten.

2 Modellbasierte Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik

2.1 Begriffsabgrenzungen

In diesem Abschnitt werden zunächst grundlegende Begriffe definiert und abgegrenzt, welche für diese Arbeit von zentraler Bedeutung sind.

Unter *Planung* versteht man das gedankliche Durchdringen eines zukünftigen Geschehens mit dem Ziel, diejenigen Entscheidungen vorzubereiten und zu treffen, die zur Erreichung des gewünschten Zustandes notwendig sind. Der gewünschte Zustand wird unter Beachtung denkbarer zukünftiger Entwicklungen, die zum Teil mit Hilfe von Prognoseverfahren ermittelt werden, als Zielsetzung definiert. Hauptmerkmal der Planung ist demnach die Zukunftsbezogenheit sowie das im Gegensatz zur Improvisation rationale, nachvollziehbare Vorgehen [Wien05].

Neben dem allgemeinen Begriff der Planung ist eine Definition und Unterscheidung der *Fertigungsplanung*, der *Fabrikplanung* sowie der *Produktionsplanung* erforderlich. Diese Begriffe sind in der Literatur nicht eindeutig definiert. Unter Fertigungsplanung werden in dieser Arbeit gemäß der Definition in [AWF60] alle einmalig zu treffenden Maßnahmen bezüglich der Gestaltung des Erzeugnisses, der Fertigungsvorbereitung und der Planung und Bereitstellung von Betriebsmitteln verstanden. Die Fertigungsplanung ist auch Teil der Fabrikplanung, die nach [Hoit93] die Produktions-Standortplanung, die Layoutplanung von Werk, Gebäude und Geschoßflächen und die Maschinen- und Einrichtungs-Layoutplanung umfasst. Die vier allgemeingültigen Hauptzielsetzungen der Fabrikplanung sind [KeSG84]:

1. günstiger Produktions- bzw. Fertigungsfluss
2. menschengerechte Arbeitsbedingungen
3. gute Flächen- und Raumausnutzung
4. hohe Flexibilität der Bauten, Anlagen und Einrichtungen

Da sich Fabrik- und Fertigungsplanung gegenseitig beeinflussen und starke Überdeckungen haben, wird in dieser Arbeit zwischen beiden Begrifflichkeiten nicht streng unterschieden. Die Methoden und Werkzeuge, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden,

unterstützen gleichermaßen Aufgaben, die streng der Fabrikplanung sowie streng der Fertigungsplanung zugeordnet werden müssen, als auch Aufgaben an deren Schnittstellen. Das Ergebnis der Fabrik- und Fertigungsplanung ist ein *Fertigungssystem* bzw. ein System interagierender Fertigungssysteme.

In der Literatur wird der Begriff der *Produktionsplanung* teilweise auch um den Zusatz *Technische* ergänzt, um den Bezug zu den technisch-ingenieurwissenschaftlichen Tätigkeiten insbesondere bei der Planung vor Produktionsbeginn aufzuzeigen [Zenn06]. Hier wird unter Produktionsplanung die *fertigungsbegleitende* taktische und operative Planung von Faktoren und Produktionsprogrammen sowie der Produktionssteuerung und -kontrolle verstanden. Die *fertigungsbegleitende Produktionsplanung* greift durch das Fertigungssystem auf das Ergebnis der Fabrik- und Fertigungsplanung zu.

Ein *Produktionssystem* stellt eine Vorgehensweise dar, welche alle genannten Planungsaufgaben durch geeignete Planungsmethoden unterstützt. In Abschnitt 2.2.3 wird detailliert auf Produktionssysteme eingegangen.

Abbildung 2-1 veranschaulicht die in dieser Arbeit global verwendeten Begriffsabgrenzungen, deren Zusammenhänge und eine Auswahl wichtiger Aufgaben der Fabrik-, Fertigungs- sowie der fertigungsbegleitenden Produktionsplanung.

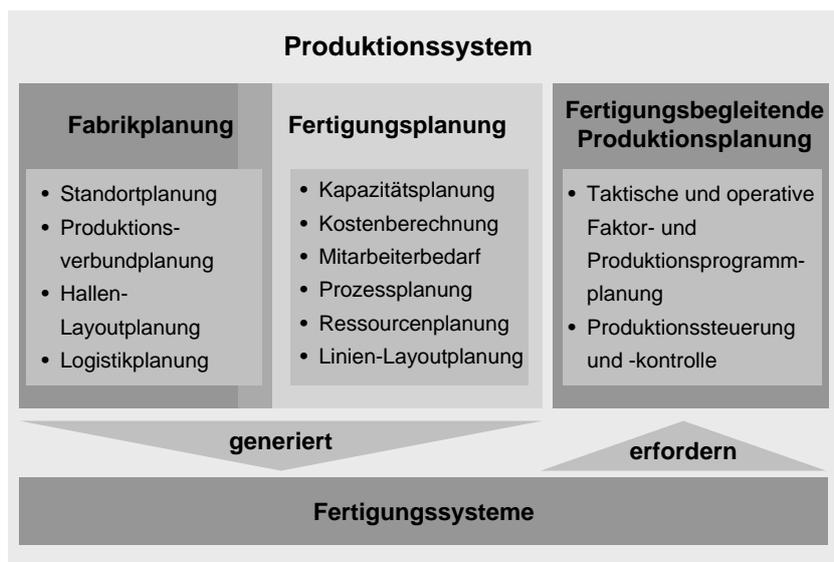


Abbildung 2-1: Abgrenzung und Zusammenhänge der in dieser Arbeit verwendeten Begrifflichkeiten

2.2 Rand- und Rahmenbedingungen

Diese Arbeit entsteht im Spannungsfeld aus Rand- und Rahmenbedingungen der Fertigungsplanung einerseits und der methodischen Anwendung von Modellierungs- und Analysemethoden andererseits.

Rahmenbedingungen werden durch das Marktumfeld als exogene Einflussgrößen der Fertigungsplanung vorgegeben und stellen damit Bedingungen dar, die nicht oder nur in geringem Maße beeinflusst werden können.

Die Randbedingungen sind durch die Entwicklung eines Produktionssystems zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme und durch die Digitale Fabrik, welche durch die rasche Entwicklung in der Informationstechnologie ermöglicht wurde, vorgegeben. Auf das Marktumfeld sowie die genannten Rand- und Rahmenbedingungen geht dieser Abschnitt detailliert ein.

2.2.1 Marktumfeld der Fabrik- und Fertigungsplanung

Das Marktumfeld der Fabrik- und Fertigungsplanung hat sich in den letzten Jahren fundamental gewandelt. Dies ist in erster Linie auf das in Abbildung 2-2 gezeigte Verhältnis von Produktvielfalt und Produktionsvolumen zurückzuführen.

War die zu Beginn der Industrialisierung vorherrschende Handwerksproduktion von hoher Produktvielfalt und geringem Produktionsvolumen geprägt, erfolgte mit der Massenproduktion nach Henry Ford die Konzentration auf ein Produkt, welches in sehr hoher Stückzahl gefertigt wurde.

Die Massenproduktion führte zur Hochautomatisierung von Fertigungsanlagen, die eine hohe Inflexibilität mit sich brachte [LaSc01]. Kurze Innovationszyklen und kundenindividuellere Produkte haben diesen Trend zu Gunsten hoher Produktvielfalt und kleinerer Produktionsvolumina umgekehrt und die Entwicklung der schlanken Produktion forciert (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Die dargestellte Entwicklung von Produktvielfalt und Produktionsvolumina ist auf einen fundamentalen Paradigmenwandel zurückzuführen, der sich wie folgt zusammenfassen lässt [Brus04]:

- Die Zyklen der Markteinführung neuer Produkte sind drastisch reduziert: In weniger als einem Jahrzehnt wurden die Modellzyklen in der Automobilindustrie von fünf

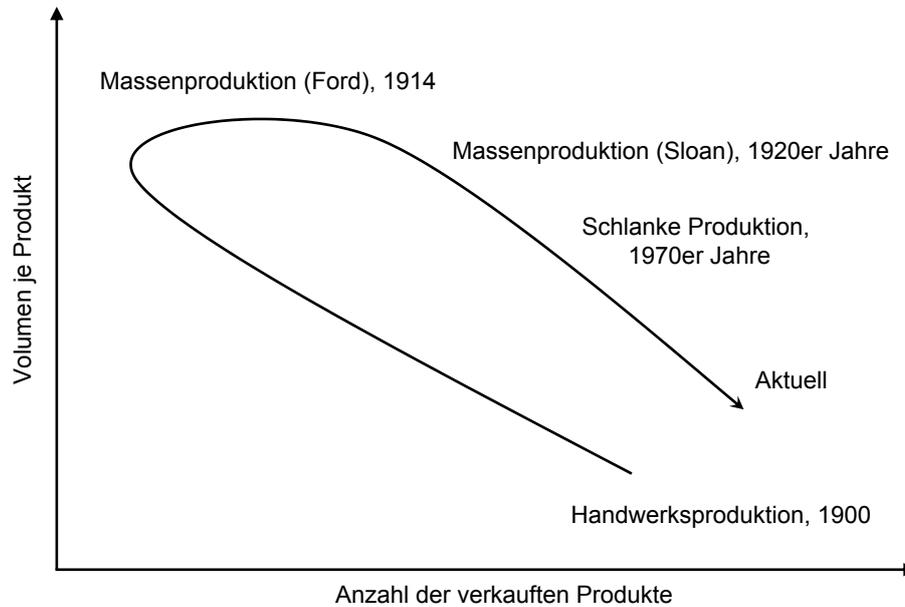


Abbildung 2-2: Entwicklung der Produktvielfalt und des Produktionsvolumens in Anlehnung an [WoJR90].

Jahren auf weniger als zwei Jahre reduziert. Dies führt zu erheblichen Qualitätsproblemen und kann die geplante Markteinführung verzögern [Shir06].

- Qualität und Leistung über dem Produktlebenszyklus sind von entscheidender Bedeutung: Alle Bereiche der Produktentstehung werden heute mit gesteigerten Qualitätsanforderungen konfrontiert.
- Vom „Design des Kunden“ zu „Design für den Kunden“: In den 60er Jahren konnte die Industrie ihre Produkte auf dem Markt durchsetzen. Heutzutage verlangen die Kunden nach aktiver Einflussnahme bei der Produktentstehung.
- Anbieten kundenindividueller Lösungen: Die Forderung der Kunden nach individuellen Lösungen hat weitreichende Folgen hinsichtlich der Flexibilität von Fertigungssystemen bezüglich Produktvarianten.
- Miniaturisierung von Produkten mit gleichbleibender mechanischer Funktionalität: Die Miniaturisierung von Produkten führt auch zur Entwicklung miniaturisierter Fertigungseinrichtungen mit deutlich gesteigerten Anforderungen an die Präzision.

Für produzierende Unternehmen lassen sich daraus die vier in Abbildung 2-3 dargestellten wesentlichen Schlüsselanforderungen zusammenfassen: Flexibilität, Schnelligkeit, Mobilität und Wirtschaftlichkeit.



Abbildung 2-3: Anforderungen an produzierende Unternehmen nach [DoTB01]

Flexibilität drückt gemäß der Definition von Pleschak [Ples88] die Fähigkeit aus, sich an veränderte Arbeitsaufgaben in Gestalt schnell wechselnder Erzeugnisse und Gebrauchseigenschaften, wechselnder Ressourcen, wechselnder Technologien und Organisationsformen, an wechselnden Informationsbedarf sowie an wechselnde Entscheidungen im Rahmen definierter Grenzen, dem so genannten Flexibilitätskorridor, anzupassen. Flexibilität muss bei der Gestaltung eines Fertigungssystems bereits berücksichtigt und implementiert werden und stellt eine Überdimensionierung einzelner Gestaltungsaspekte im Hinblick auf zukünftig zu erwartende Entwicklungen dar [DrWo04]. Diese über den kompletten Lebenszyklus vorgehaltene Überdimensionierung verursacht - ob genutzt oder nicht - teilweise erhebliche Investitionskosten [Blum06] und muss deshalb zielführend eingesetzt werden.

Zur Vermeidung zu breit angelegter Flexibilitätskorridore müssen Fertigungssysteme zusätzlich ein reaktives Eingreifen erlauben. Reaktive Systeme zeichnen sich durch eine nachhaltige, mehrdimensionale Veränderungsfähigkeit außerhalb vordefinierter Szenarien aus [RDHS99, CiHN02, DrWo04].

Zusammen beschreiben Reaktivität und Flexibilität ein Maß für die Fähigkeit von Unternehmen, sich an das turbulente Umfeld zu adaptieren: die Wandlungsfähigkeit [RDHS99]. Wandlungsfähigkeit kennzeichnet „das Potenzial einer Fabrik, durch definierte, systemimmanente Freiheitsgrade reaktiv oder proaktiv eine zielgerichtete Neu- und Rekonfiguration der Wandlungsobjekte und ihrer Beziehungen auf allen Fabrikstrukturebenen bei geringem Aufwand durchführen zu können“ [WiHG02]. Weitere Ausführungen zu Flexibilität, Reaktivität und Wandlungsfähigkeit sind in [Blum06] verfügbar.

Die Sicherstellung der Wandlungsfähigkeit eines Fertigungssystems ist Voraussetzung für die Kompensation von Nachfrageunsicherheiten, die sich wie folgt unterscheiden lassen [GoKö04]:

- Langfristig
 - Marktzyklen (oftmals konjunkturabhängig),
 - Marktverlagerungen (Auftauchen oder Verschwinden von Märkten),
 - Produktlebenszyklen (Schwankungen des Bedarfs über den Lebenszyklus des Produkts, Produktneuanläufe, Produktausläufe)
- Mittelfristig
 - Saisonale Trends (z.B. Volumenänderung, zyklische Veränderung des nachgefragten Variantenspektrums)
 - Kundenverhalten (z.B. Zunahme der nachgefragten Variantenvielfalt)
- Kurzfristig
 - Kundenverhalten (z.B. unregelmäßige Nachfrage, Stornierung von Aufträgen),
 - Unsicherheit des Liefertermins (z.B. durch unbekanntem Bestellzeitpunkt und Ordervolumen bei vereinbarter Gesamtstückzahl über Projektlaufzeit)

Schnelligkeit ist bei der Markteinführung neuer Produkte ebenso wichtig wie für die Sicherstellung auch der kurzfristigen Lieferfähigkeit bereits am Markt platzierter Produkte.

Unter *Mobilität* wird die Fähigkeit eines Unternehmens verstanden, Standortverlagerungen bei geringem Aufwand schnell und kostengünstig durchführen zu können.

Die *Wirtschaftlichkeitsanforderungen* bedeuten neben einer Reduktion der operativen Betriebskosten insbesondere die Minimierung von Investitionen und damit der Kapitalbindung.

Die genannten Schlüsselanforderungen lassen sich nicht scharf voneinander abgrenzen und bedingen sich teilweise wechselseitig. Darüber hinaus setzt deren Umsetzung nicht nur Anstrengungen in der in dieser Arbeit im Vordergrund stehenden Fabrik- und Fertigungsplanung voraus, sondern auch in der Entwicklung geeigneter Fertigungstechnologien. Grundlage hierfür ist die Einbindung weiterer Wissenschaftszweige in das Fertigungs- und Produktionsumfeld [WAQH99].

2.2.2 Rechnerunterstützung im Produktentstehungsprozess

Digitale Fabrik

Die Rechnerunterstützung im Rahmen des Produkt- und Fertigungssystementwicklungsprozesses sowie der Produktion ist sehr vielfältig. In der Produktentwicklung und der fertigungsbegleitenden Produktionsplanung ist die Unterstützung durch entsprechende Software bereits heute weit fortgeschritten. Bei der Produktentwicklung sind dies insbesondere 2D und 3D CAD-Systeme zur Unterstützung des Produktdesigns sowie EDM-/PDM-Systeme zur Produktdatenverwaltung. In der Produktion kommen ERP- und PPS-Systeme zum Einsatz, die die Erstellung des Produktionsprogramms unterstützen und unter anderem die Materialbereitstellung automatisieren. In der Fabrik- und Fertigungsplanung, die zwischen Produktentwicklung und der Produktion angesiedelt ist, ist die Rechnerunterstützung derzeit noch in der Entwicklungsphase. Abbildung 2-4 verdeutlicht diesen Umstand.

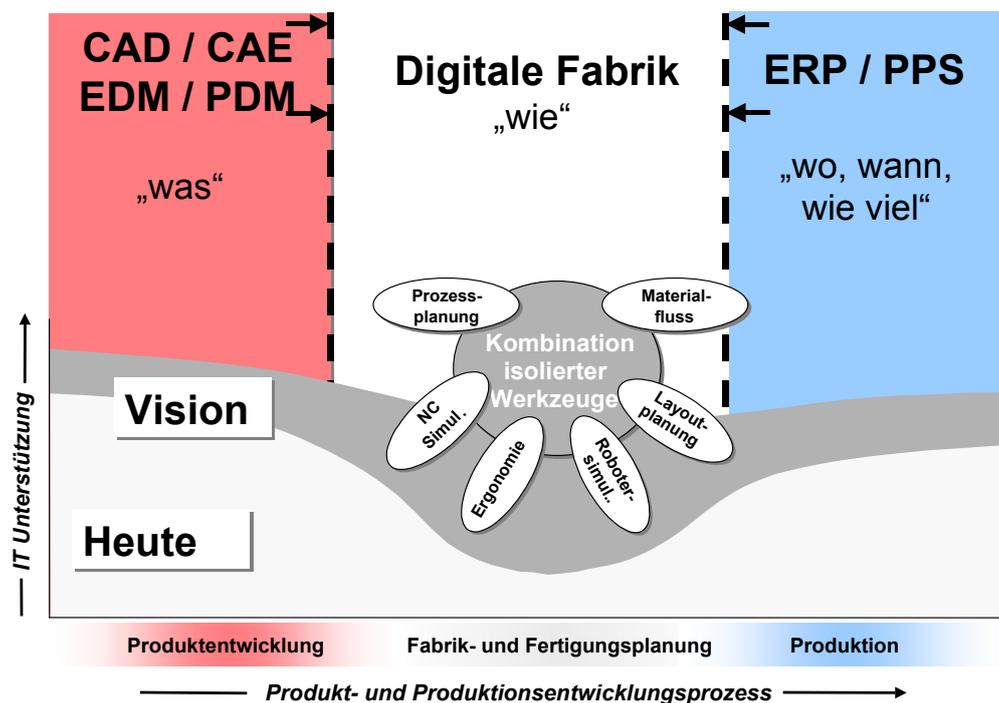


Abbildung 2-4: Rechnerunterstützung im Fertigungs- und Produktionsumfeld nach [BIZe05]

Die Rechnerunterstützung der Fertigungsplanung wird allgemein auch als Digitale Fabrik verstanden. Im Rahmen der VDI-Richtlinie 4499 „Digitale Fabrik“ wird diese wie folgt definiert [VDI4499]:

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen - unter anderem der Simulation und 3D-Visualisierung -, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.“

Das übergeordnete Ziel der Digitalen Fabrik ist die Realisierung von durchgängigen Entwicklungs- und Fertigungsplanungsprozessen sowie deren methodische und rechnerbasierte Unterstützung [ReKo02]. In der Literatur wird der Zweck der Digitalen Fabrik vielfach in der Erstellung einer realitätsnahen Abbildung des realen Fertigungssystems im Rechner gesehen [DoTB01, Schr03, GeRe04, Marc04].

An dieser Stelle ist eine differenzierende Betrachtung zwingend erforderlich. Die Digitale Fabrik ist kein reines Softwarethema, sondern vereint vielmehr die Rechnerunterstützung der Planung durch geeignete Software mit der konsequenten und durchgängigen Anwendung von Planungsmethoden. Die Umsetzung der Digitalen Fabrik hat folglich im Einklang mit der Einführung und Entwicklung von Planungsmethoden zu erfolgen, deren Umsetzung softwaretechnisch unterstützt werden muss [BIFZ06]. Lediglich etwa 20% des Fortschritts werden durch Softwarelösungen erreicht, 80% des Fortschritts werden durch veränderte Arbeitsabläufe und Denkweisen der Mitarbeiter bestimmt [ReKo02]. Der Mensch steht damit im Mittelpunkt der Einführung und Planung mit der Digitalen Fabrik [WaBl03].

Das softwareseitige Rückgrat der Digitalen Fabrik ist eine zentrale Datenbank. Dadurch wird eine redundanzfreie Datenhaltung ermöglicht. Diese Form der Datenhaltung leistet an sich bereits eine enorme Steigerung der Planungseffizienz durch den Wegfall der mehrfachen Beschaffung bereits im Unternehmen vorhandener Informationen. Die Digitale Fabrik ermöglicht außerdem einen erfolgreichen Wissenstransfer durch eine standardisierte und damit nachvollziehbare Planung, welche durch die zentrale Datenhaltung unterstützt wird. Planungslösungen lassen sich mit Hilfe der Digitalen Fabrik als Best-Practice-Lösungen entsprechender Problemstellungen wieder verwenden [WeBK03]. Die Planungsmethoden, welche im Rahmen der Planung mit der Digitalen Fabrik zum Einsatz kommen, werden zu großen Teilen von der Software unterstützt. Umgekehrt wird der Planer bei der konsequenten Methodenanwendung unterstützt.

Die mit der Digitalen Fabrik gewonnene Effizienz bei der Planung ermöglicht eine deutliche Verkürzung des Zeitraums zum Markteintritt (time-to-market), wodurch neue Produkte schnell an den Markt gebracht werden können. Die Kosten- und Terminrisiken durch Planungsänderungen im Rahmen der Produktlebenszyklusplanung werden dadurch

erheblich vermindert. Darüber hinaus werden die Tätigkeitsinhalte der Fertigungsplanung zu Gunsten der Planung im eigentlichen Sinne verschoben, was eine qualitative Verbesserung der Planungsergebnisse zur Folge hat. Dies wird durch das Ergebnis einer Umfrage [Marc06] zu Einsatz und Nutzungspotenzialen der Digitalen Fabrik bestätigt (vgl. Abbildung 2-5).

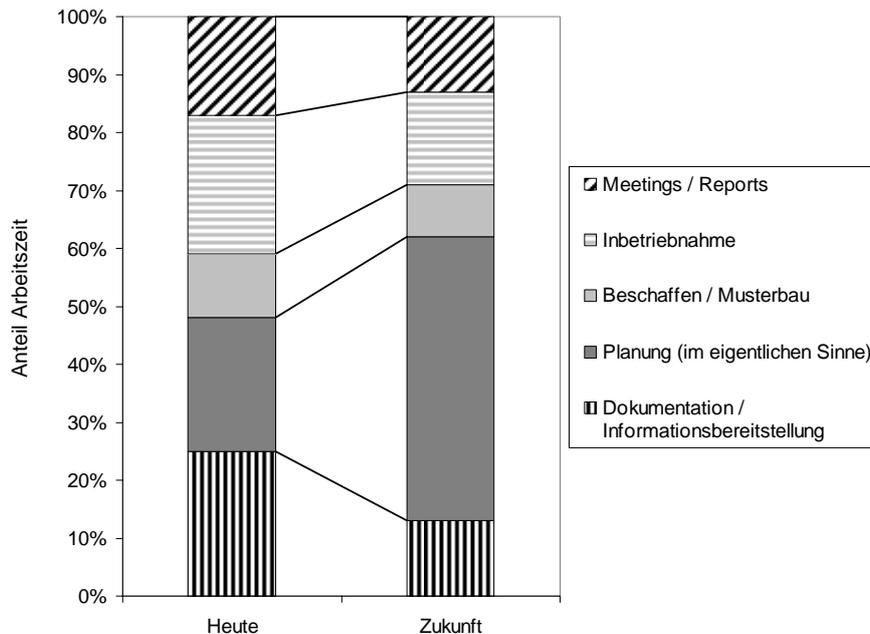


Abbildung 2-5: Veränderung der Tätigkeitsinhalte zu Gunsten der Planung nach [Marc06]

Die erfolgreiche Einführung und Anwendung der Digitalen Fabrik ist aus den genannten Gründen zunehmend als Wettbewerbsfaktor zu betrachten. Der Zeitgewinn durch die automatische Durchführung von Routinetätigkeiten führt darüber hinaus zur Steigerung der Planungsqualität. Die Planung in interdisziplinären Fertigungsplanungsteams sowie die äußerst wichtige enge Verzahnung von Fertigungsplanung und Inbetriebnahme wird durch die Digitale Fabrik erst ermöglicht.

Derzeit existieren im Wesentlichen zwei Softwarelösungen der Hersteller DELMIA und UGS, welche die Realisierung der Digitalen Fabrik ermöglichen. Diese können innerhalb bestimmter Grenzen an die spezifischen Anforderungen der Planungsvorgehensweise eines Unternehmens angepasst werden.

Die Einführung der Digitalen Fabrik ist mit erheblichen Aufwänden für die Softwareanpassung und deren organisatorische Einführung verbunden. Der erzielbare Nutzen ist jedoch schwer zu quantifizieren. Ein Ansatz zur Bewertung von Nutzen und Aufwand unter Be-

rücksichtigung objektiver und subjektiver Kriterien ist in [BCMS04, ZCSM05, ZMAS05] verfügbar.

Integrierte Fertigungsplanung mit der Digitalen Fabrik

Die integrierte Planung mit der Digitalen Fabrik beginnt mit der detaillierten Stückliste und der zugehörigen Produktvisualisierung. In dieser Planungsphase besteht eine besonders enge Verknüpfung zur Produktentwicklung. Die eigentlichen Fabrik- und Fertigungsplanungsaufgaben beginnen mit der Prozessplanung. Eine detaillierte Prozessplanung in frühen Phasen der Planung erlaubt die rechtzeitige Beeinflussung der Produktentwicklung und stellt die wirtschaftliche Herstellbarkeit des resultierenden Produktes sicher.

Neben der geeigneten Softwareunterstützung ist hierfür der Einsatz von Workshopmethoden erforderlich, welche von der Digitalen Fabrik unterstützt werden. Das Ergebnis der Prozessplanung ist der Prozessgraph, der die Herstell- oder Montageprozesse und deren Reihenfolge lösungsneutral beschreibt.

Der Prozessgraph ist der Ausgangspunkt bei der Entwicklung von statischen Fertigungssystemmodellen. Jedes zu analysierende Fertigungsszenario wird durch ein spezifisches Modell, das so genannte *Fertigungskonzept*, abgebildet.

Auf Basis dieser Modelle erfolgt die Logistikplanung, die Berechnung von Kapazitäten und Kosten der Fertigungsszenarien und die Prognose der Herstellkosten. Die Erstellung von 3D-Layouts wird zur verbesserten Visualisierung und zur Vermeidung von Fehlplanungen durchgeführt. Da die Digitale Fabrik eine große Anzahl an Planungsaufgaben unterstützt, muss der Einstiegspunkt in Abhängigkeit der Planungszielsetzungen erfolgen. Ein 3D-Layout kann beispielsweise auf Basis vorhergehender Planungsergebnisse erfolgen oder unabhängig davon erstellt werden.

Abbildung 2-6 zeigt eine Übersicht der Einstiegspunkte, Methoden und Planungsergebnisse der Digitalen Fabrik. Aufgrund des steigenden Detaillierungsgrades der Planungsdaten im Laufe eines Planungsprojektes sowie häufigen Änderungen durch veränderte Produkt- und Prozessanforderungen sind Iterationen erforderlich, welche durch den Einsatz der Digitalen Fabrik vereinfacht und sehr effizient durchgeführt werden können.

Wie in Abbildung 2-6 dargestellt, ist die Entwicklung und der Einsatz leistungsfähiger Schnittstellen erforderlich. Das zeigt auch das Ergebnis einer Unternehmensbefragung unter deutschen Automobilisten und bedeutenden Komponenten- und Anlagenliefer-

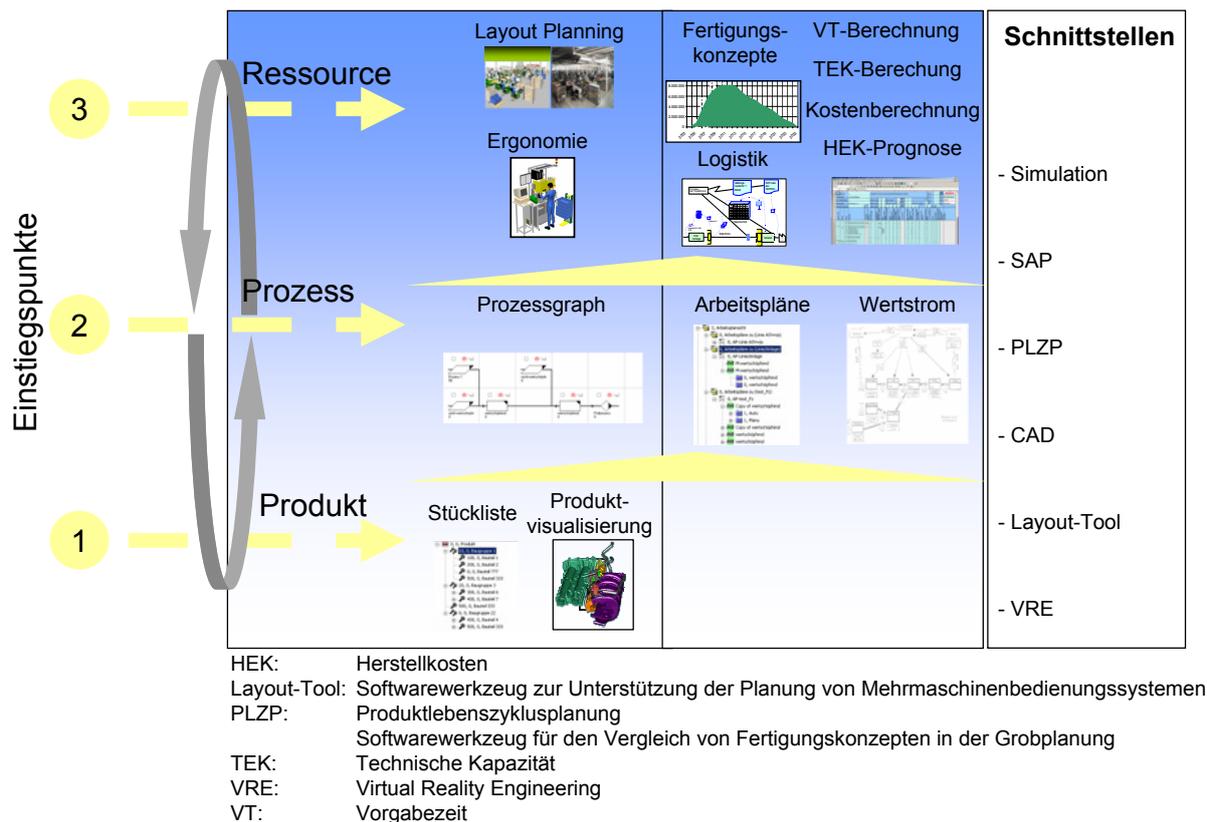


Abbildung 2-6: Methoden, Planungsergebnisse und benötigte Schnittstellen der Digitalen Fabrik

ranten [BIFZ06]. Gerade beim Thema Datenintegration werden die Grenzen der Digitalen Fabrik derzeit noch deutlich [Schö06]. Neben zahlreichen leistungsfähigen Softwaretools für Spezialaufgaben und umfangreichen Softwaresystemen ist die Anbindung der Simulation von zentraler Bedeutung. Deshalb wird ein Konzept zur Integration von Planungsdaten der Digitalen Fabrik in die Simulation in Kapitel 6 dieser Arbeit ausführlich dargestellt und softwaretechnisch umgesetzt.

2.2.3 Produktionssysteme zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme

Seit Beginn der Industrialisierung werden kontinuierlich neue Produktionssysteme entwickelt. Die historische Entwicklung dieser Produktionssysteme ist in [Spur95, Jürg03, DoHS06] ausführlich behandelt und in Abbildung 2-7 dargestellt.

Die handwerkliche Produktion war die zu Beginn der Industrialisierung vorherrschende Art der Produktion. Diese wurde durch die „tayloristische“ Fließbandarbeit abgelöst, d.h. die Zerlegung und Optimierung des Produktionsprozesses in kleine Einheiten. Die Einführung von NC-Maschinen führte zur so genannten technologieorientierten Produktion, welche durch Einführung der automatisierten Produktion weiterentwickelt wurde. Ein

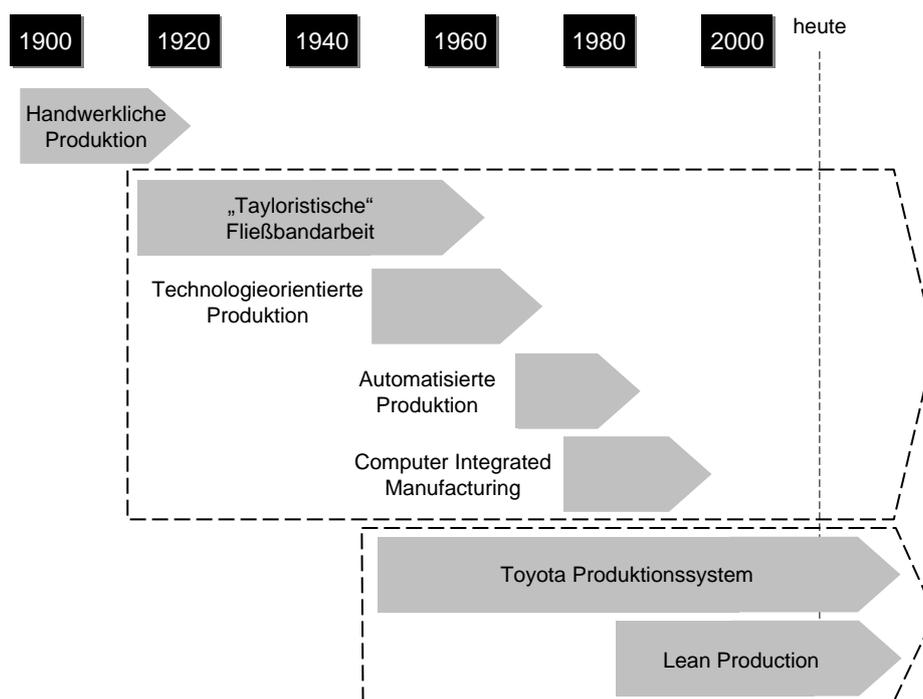


Abbildung 2-7: Entwicklung von Produktionssystemen nach [DoHS06]

erster Ansatz zur umfassenden Rechnerunterstützung von Fertigungs- und Produktionsplanung stellte das Konzept der *CIM (Computer Integrated Manufacturing)* dar, welches sich in der Praxis jedoch nicht durchsetzen konnte. Dies ist auf zu hohe Erwartungen und gleichzeitig zu wenig Durchhaltevermögen bei der Umsetzung seitens der Anwender zurückzuführen.

Eine hohe Produktvielfalt und fehlende finanzielle Mittel verhinderten die Massenproduktion nach westlichem Vorbild [WoJR90, Ohno93] in Japan nach dem Ende des zweiten Weltkrieges. Aus diesen Gründen entwickelte sich parallel zu den in der westlichen Industrie vorherrschenden Paradigmen das Toyota Produktionssystem [Like03]. Dieses kann in Form eines Hauses dargestellt werden, welches im Wesentlichen aus drei tragenden Säulen besteht (vgl. Abbildung 2-8). Im Zentrum stehen die Mitarbeiter aller hierarchischen Ebenen. Wesentlich ist die Einhaltung des Just-in-Time Prinzips in der Produktion unter Einbeziehung der Zulieferer. Eine weitere Säule stellt die autonome Automation dar. Darunter wird die Konzeption verstanden, dass Maschinen bei auftretenden Problemen automatisch anhalten und idealerweise die Fehlerursache selbstständig beheben. Die Basis aller drei Säulen sind der Standardisierungsprozess und der Prozess der ständigen Verbesserung.

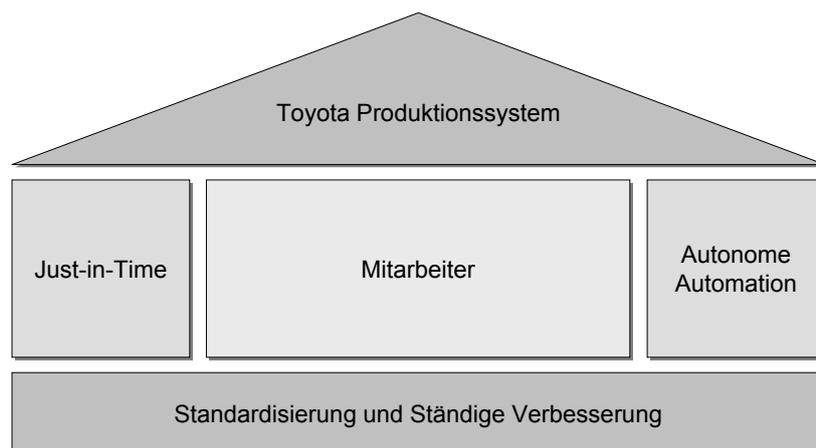


Abbildung 2-8: Toyota Produktionssystem nach [Haus03]

In der sogenannten IMVP-Studie (International Motor Vehicle Program) am Massachusetts Institute of Technology wird das Toyota Produktionssystem eingehend untersucht. Im Rahmen dieser Studie wird der Begriff „lean“ (schlank) in Abgrenzung zu „buffered“ (gepuffert) von John F. Krafcik geprägt [Kraf03]. Mit Puffern sind dabei sämtliche Reserven eines Fertigungssystems in Form von Lagern und zusätzlichen Arbeitskräften zu verstehen. Unter Einsatz dieser Reserven soll das Ziel einer hohen Auslastung hochautomatisierter Anlagen erreicht werden, was häufig den Materialfluss innerhalb eines Fertigungssystems unberücksichtigt lässt und Prozessmängel verdeckt.

Anhand von Abbildung 2-7 wird deutlich, dass Produktionssysteme laufend an sich ändernde Rand- und Rahmenbedingungen angepasst werden müssen. Die gesteigerte Marktsegmentierung im Westen, beginnend in den 80er Jahren, zeigte dabei die Stärken des Toyota Produktionssystems. Die in der Industrie weit verbreitete Entwicklung von Produktionssystemen zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme bedeutet damit nicht eine kategorische Abkehr von der Hochautomatisierung und den damit verbundenen Problemen, sondern primär die Anpassung der Fertigungssysteme an ein verändertes Marktumfeld (vgl. auch Abbildung 2-2).

Für die Einführung der schlanken Produktion ist eine konsequente Umsetzung und Anpassung relevanter Planungsmethoden unter Berücksichtigung und Abstimmung von humanzentrierten, organisatorischen und technologischen Aspekten im Rahmen des Produktentstehungsprozesses erforderlich. In der Literatur werden Produktionssysteme, die diese Anforderungen erfüllen, zum Teil auch als *Ganzheitliche Produktionssysteme* bezeichnet [FeNe02, Spat03]. Im speziellen Fall der Robert Bosch GmbH erfolgt die systematische Umsetzung der schlanken Produktion durch die Entwicklung und Einführung

eines verbindlichen Planungsleitfadens unter Vernetzung von Produkt- und Fertigungssystementwicklung, dem folgende acht Prinzipien hinterlegt sind:

- **Ziehprinzip:** Durch das auch als „Pull-Prinzip“ bekannte Ziehprinzip wird eine rein auftragsorientierte Produktionsplanung und -durchführung sichergestellt. Durch gleichzeitige Synchronisation von Fertigung und Logistik können Durchlaufzeiten und Bestände reduziert werden.
- **Prozessorientierung:** Statt Funktionen eines Prozesses isoliert zu optimieren, erfolgt mit der Prozessorientierung eine ganzheitliche Geschäftsprozessoptimierung vom Kundenabruf bis zur Auftragsbefreiung. Technologische Prozesse werden durch Standardisierung und ständige Verbesserung optimiert.
- **Fehlervermeidung:** Ziel des Prinzips der Fehlervermeidung ist die Erreichung von „Null-Fehler“. Die Fehlervermeidung geht dabei über das Ziel der Fehlerentdeckung hinaus und erfordert deshalb die Optimierung von Fertigungsprozessen.
- **Flexibilität:** Unter Flexibilität wird an dieser Stelle die einfache und schnelle Anpassung an aktuelle Kundenbedarfe verstanden. Dies beinhaltet sowohl die Arbeitsorganisation als auch Fertigungseinrichtungen (Maschinen und Anlagen). Daraus ergibt sich die Anforderung der flexiblen Einsetzbarkeit von Mitarbeitern und die Beschaffung wiederverwendbarer, am Produktionslebenszyklus ausgerichteter und schnell zu rüstender Maschinen.
- **Standardisierung:** Erprobte und bewährte Prozesse, Planungsmethoden und Fertigungseinrichtungen werden standardisiert. Standards sind nicht statisch und werden durch den Prozess der ständigen Verbesserung kontinuierlich weiterentwickelt. Standardisierung ist grundlegende Voraussetzung für beherrschte Prozesse und Flexibilität. Ein elementarer Teil der Standardisierung ist auch die einheitliche Berechnung wichtiger Kennzahlen von Fertigungssystemen.
- **Ständige Verbesserung:** Erreichte Standards werden durch ständige Verbesserung kontinuierlich weiter entwickelt und verbessert.
- **Transparenz:** Transparenz ist Voraussetzung für ständige Verbesserung und Optimierung. Geschäftsprozesse und Fertigungsabläufe sind deshalb weitgehend selbst-erklärend zu gestalten. Transparenz bedeutet auch, dass Aufgaben und Ziele für die Mitarbeiter klar und offen kommuniziert werden.
- **Eigenverantwortung:** Selbstorganisierte Arbeitsgruppen stärken die Eigenverantwortung der Mitarbeiter. Deren Kreativität und Kompetenz kann somit gleichermaßen genutzt und gefördert werden, was zusätzlich die Mitarbeitermotivation erhöht.

Die konsequente Verankerung und zeitliche Einordnung von Planungsmethoden im Produktentstehungsprozess bzw. im Planungsleitfaden führt zur systematischen Entwicklung schlanker Fertigungssysteme. Die Diskussion der Planungsmethoden ist nicht Teil dieser Arbeit. Der Erfolg bei der Umsetzung des Planungsleitfadens hängt entscheidend von der Mitarbeiterkultur ab und muss deshalb auch an diese angepasst werden. Das in diesem Zusammenhang erforderliche humanzentrierte Management wird in [Reis92] diskutiert.

Die in Kapitel 2.2.2 vorgestellte Digitale Fabrik widerspricht nicht den Prinzipien des Produktionssystems zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme. Vielmehr wird durch die konsequente Anwendung der Digitalen Fabrik die Integration von Einzelmethoden zu einer softwareunterstützten Planungsmethodik ermöglicht, die im Produktentstehungsprozess verankert ist [BIKW04]. Die softwareunterstützte Planungsmethodik muss an die Anforderungen der Gestaltung schlanker Fertigungssysteme angepasst werden.

2.3 Analyse und Modellierung von Fertigungssystemen

Analyse und Modellierung von Systemen sind sehr eng miteinander verknüpft und erlauben deshalb keine vollständig getrennte Betrachtung. Ein aussagefähiges Modell ist die Grundlage jeder Systemanalyse. Der Anspruch dieser Arbeit ist die Unterstützung einer zielführenden Analyse, was eine problemangepasste Modellierung voraussetzt. Dieser Abschnitt geht zunächst detailliert auf die Systemanalyse ein. Relevante Methoden für die Modellierung von Fertigungssystemen werden anschließend betrachtet und bewertet.

2.3.1 Analyse von Fertigungssystemen

Bevor auf die Analyse von Fertigungssystemen im besonderen eingegangen wird, ist die allgemeine Definition des Begriffes *Analyse* notwendig. Unter dem aus dem Griechischen kommenden Begriff der Analyse wird die systematische Untersuchung eines Gegenstandes oder Sachverhaltes hinsichtlich aller einzelnen Komponenten oder Faktoren, die ihn bestimmen, verstanden [BaWe00]. Ausführliche allgemeine Grundlagen der Systemanalyse sind in [DaHu02] verfügbar. Abbildung 2-9 verdeutlicht die im Folgenden verwendeten Grundbegriffe der Systemanalyse.

Im speziellen Fall der modellbasierten Fertigungssystemanalyse sind folgende Schritte erforderlich:

1. Festlegen der Systemgrenzen zur Unterscheidung von System, Umsystem und Umwelt

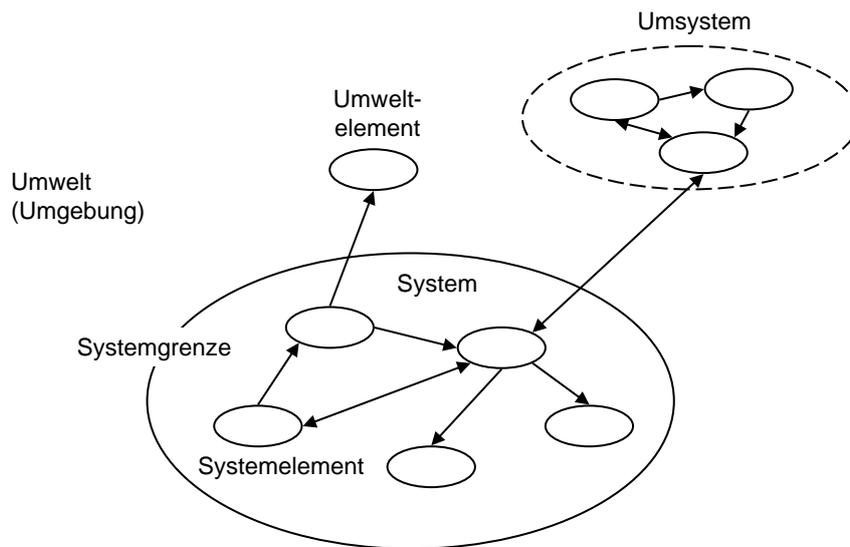


Abbildung 2-9: Grundbegriffe der Systemanalyse nach [DaHu02]

2. Identifikation der Systemelemente, die für die Fragestellung als relevant erachtet werden
3. Feststellen der für die betrachtete Fragestellung wesentlichen Beziehungen zwischen den Systemelementen
4. Entwicklung eines Systemabbildes (Modells) auf Basis der Schritte 1-3
5. Validierung und Verifikation des Modells
6. Analyse des Modells

Durch die Festlegung der Systemgrenzen in Schritt 1 wird der Modellierungsumfang festgelegt. Die Einflussgrößen des Systems werden durch Festlegung der Systemgrenze in endogen und exogen differenziert.

Entscheidend für die Aussagefähigkeit des resultierenden Modells ist es, dass alle relevanten Einflussgrößen endogenisiert werden. Beispielsweise ist die Entscheidung, ob logistische Einflüsse in Betracht gezogen werden müssen, von zentraler Bedeutung.

Jedoch ist durch Festlegung des Modellierungsumfanges der damit verbundene Modellierungsaufwand nicht festgelegt. Dieser ist abhängig vom beabsichtigten Detaillierungsgrad und der verwendeten Modellierungsmethode (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Die dem Analyseproblem zugrunde liegende Fragestellung legt fest, welche Aspekte des Fertigungssystems betrachtet und welche Systemelemente und Beziehungen für diese Betrachtung berücksichtigt werden müssen (Schritt 2 und 3). Es gilt dabei das Prinzip „so einfach wie möglich, so genau wie nötig“ einzuhalten.

Im vierten Schritt erfolgt die Modellentwicklung. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen *Makro-Modellen*, die die Erfassung wesentlicher Zusammenhänge lediglich aufgrund von Ein-/Ausgangsbetrachtungen ermöglichen (auch als Black-Box-Modelle bezeichnet) und *Mikro-Modellen*, die die Systemzusammenhänge detailliert beschreiben. Fertigungssysteme werden meist durch Kombination von Mikro- und Makro-Modellierung erstellt.

Die modellbasierte Analyse hat immer das Modell als Betrachtungsgegenstand. Korrespondiert das Systemverhalten aufgrund falscher Modellierung nicht mit dem Modellverhalten, sind die bei der Analyse gewonnenen Erkenntnisse fraglich. Das Verhalten des realen Systems und des zugehörigen Modells sind deshalb immer kritisch und voneinander getrennt zu betrachten.

Deshalb erfolgt in Schritt 5 die *Validierung* und die *Verifikation* des Modells. Bei der Validierung wird zunächst reflektiert, ob die vorangehenden Schritte der modellbasierten Systemanalyse korrekt durchgeführt sind. Die zentrale Frage der Validierung ist: „Ist das gewählte Modell das richtige?“. Bei der Verifikation erfolgt die Prüfung der Richtigkeit der verwendeten Modellparameter, der Modellstruktur und der Implementierung. Die zentrale Frage bei der Verifikation ist daher: „Ist das Modell richtig?“. Validierung und Verifikation sind von entscheidender Bedeutung für die Aussagefähigkeit des Modells und den Wert der gewonnenen Erkenntnisse der Systemanalyse. Die Verifikation lässt sich durch Korrektheitsprüfungen sehr leicht realisieren. Für die Validierung stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung, welche situationsabhängig und gemeinsam eingesetzt werden sollten. Verifikation und Validierung lassen sich nicht streng voneinander trennen, da häufig Erkenntnisse, welche bei der Validierung gewonnen werden, auch zur Verifikation des Modells beitragen. In Abbildung 2-10 werden Methoden zur Validierung und Verifikation vorgestellt und klassifiziert. In Abhängigkeit der im Rahmen der Validierung und Verifikation gewonnenen Erkenntnisse werden die Schritte 1-4 während einer Fertigungssystemanalyse meist mehrfach in einem iterativen Prozess durchlaufen. Weitergehende Details zu Validierung und Verifikation sind in [Bal98, Bal03, Sarg03] verfügbar.

Im sechsten Schritt erfolgt die Analyse des Modells entsprechend der im nächsten Abschnitt beschriebenen Zielsetzung des Analyseprozesses.

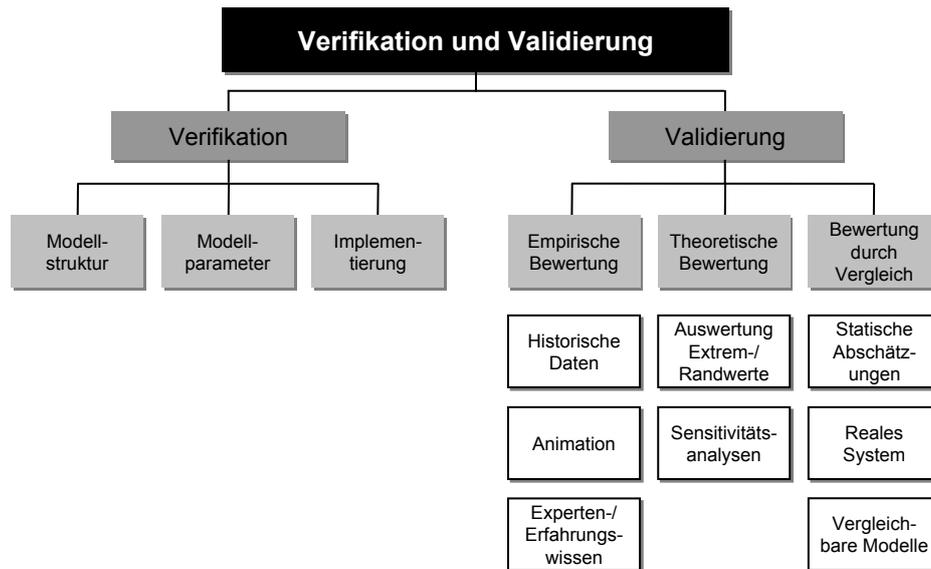


Abbildung 2-10: Klassifizierung von Methoden der Validierung und Verifikation

Zielsetzung von Analyseprozessen

Eng verknüpft mit der Fragestellung eines Analyseproblems ist dessen Zielsetzung. Im Gegensatz zur Fragestellung beeinflusst die Zielsetzung jedoch nicht die Modellerstellung. Grundsätzlich werden zwei wesentliche Zielsetzungen von Analyseprozessen unterschieden. Diese sind:

1. Die mathematisch/heuristische Extremwertbildung einer Zielfunktion (Optimierung) bzw. im Fall der mehrkriteriellen Optimierung mehrerer Zielfunktionen
2. Die Szenarioanalyse für die Betrachtung alternativer Konzepte. Der Abgleich von Soll- und Ist-Werten erfolgt hier durch den Fertigungsplaner.

Bei der mathematisch/heuristischen Extremwertbildung erfolgt die Optimierung der Systemparameter unter Berücksichtigung vorgegebener Restriktionen. Es existieren zahlreiche erprobte Ansätze für die Optimierung. Diese lassen sich in folgende Klassen einteilen:

- Gradientenbasierte Verfahren
- Evolutionäre Algorithmen (Genetische Algorithmen, Algorithmen der Evolutionsstrategie)
- Mathematische Programmierung
- Statistische Suchverfahren

Die Auswahl eines geeigneten Optimierungsalgorithmus gestaltet sich oft schwierig, da die Algorithmen häufig problemspezifisch ausgewählt und parametrisiert werden müssen. Die Konvergenz der Algorithmen sowie das Auffinden globaler Optima kann bei nicht-linearen Zielfunktionen nicht sichergestellt werden. Außerdem handelt es sich bei Werkzeugen zur Optimierung in der Regel um Spezialistentools [FACG00], die einen Einsatz in der Praxis erschweren. Die Optimierung erfordert die Festlegung einer geeigneten Zielfunktion oder die Gewichtung verschiedener Kriterien, die oft subjektiv erfolgt. Die dargestellten Rand- und Rahmenbedingungen erfordern die dynamische Anpassung der Fertigungssysteme und damit auch die Anpassung der Zielsysteme. Klassische Optimierungsverfahren für komplexe Systeme, wie beispielsweise evolutionäre Algorithmen [BeSc02], erfüllen die Forderung dynamischer Optimierungskriterien nicht [BIWK98]. Da eine Optimierung sehr viele Iterationen erfordert, ist darüber hinaus auch eine sehr schnelle Auswertung der Optimierungskriterien notwendig.

Die Szenarioanalyse zielt auf die Bewertung und den Vergleich einer begrenzten Anzahl vordefinierter Szenarien ab. Für die Entwicklung von Szenarien stehen zahlreiche Methoden zur Verfügung. Diese sind in [GaFS96] ausführlich beschrieben und diskutiert. Entscheidend ist jedoch, dass die Entwicklung von Szenarien nicht automatisiert werden kann.

Bei der Fabrik- und Fertigungsplanung kann die Optimierung insbesondere unter Anwendung der Modellierungsmethode der Simulation aufgrund eines ungünstigen Aufwand-/Nutzenverhältnisses nicht eingesetzt werden. Letztlich muss berücksichtigt werden, dass die Bedeutung eines mathematischen Optimums in der Fabrik- und Fertigungsplanung nicht zu hoch einzustufen ist [BiSp03]. Im Rahmen der fertigungsbegleitenden Produktionsplanung finden Optimierungsansätze jedoch bereits Anwendung. Da diese beispielsweise für die häufige Erstellung von optimalen Produktionsprogrammen eingesetzt werden, treffen die genannten Nachteile der Optimierung hier überwiegend nicht zu.

Aufgrund determinierter technischer Rahmenbedingungen und räumlicher Restriktionen in der Fabrik- und Fertigungsplanung ist die Bewertung einer dadurch stark eingeschränkten Anzahl an Szenarien (z.B. vollautomatisierte oder manuelle Fertigungskonzepte) die deutlich zielführendere Variante. Auch besteht die Möglichkeit der Entwicklung von Alternativszenarien basierend auf den Ergebnissen der Analyse des Ist-Prozesses.

Modellbasierter Analyseprozess als Regelkreis

Der modellbasierte Analyseprozess kann in Analogie zu einem Regelkreis aufgefasst werden. In Abbildung 2-11 ist der Analyse-Regelkreis schematisch dargestellt. Dieser besteht aus folgenden Elementen:

- **Regelstrecke:** Das Modell entspricht der Regelstrecke und ist Betrachtungsgegenstand der Analyse. Es liefert detaillierte Aussagen zu interessierenden Leistungsgrößen des Systems. Diese werden als Regelgrößen bezeichnet.
- **Regler:** Der Regler nimmt die Anpassung der Abweichung zwischen den Regelgrößen und den gewünschten Leistungsgrößen (Führungsgrößen) vor. In Abhängigkeit der Zielsetzung der Analyse wird zwischen der Optimierung durch einen entsprechenden Algorithmus und der einfacheren Auswahl eines Szenarios unterschieden (vgl. vorhergehenden Abschnitt). Der Regler liefert Sollgrößen, welche in der nächsten Iteration zusammen mit Störgrößen durch nicht bekannte Umwelteinflüsse und Modellungenauigkeiten zu neuen Regelgrößen führen.

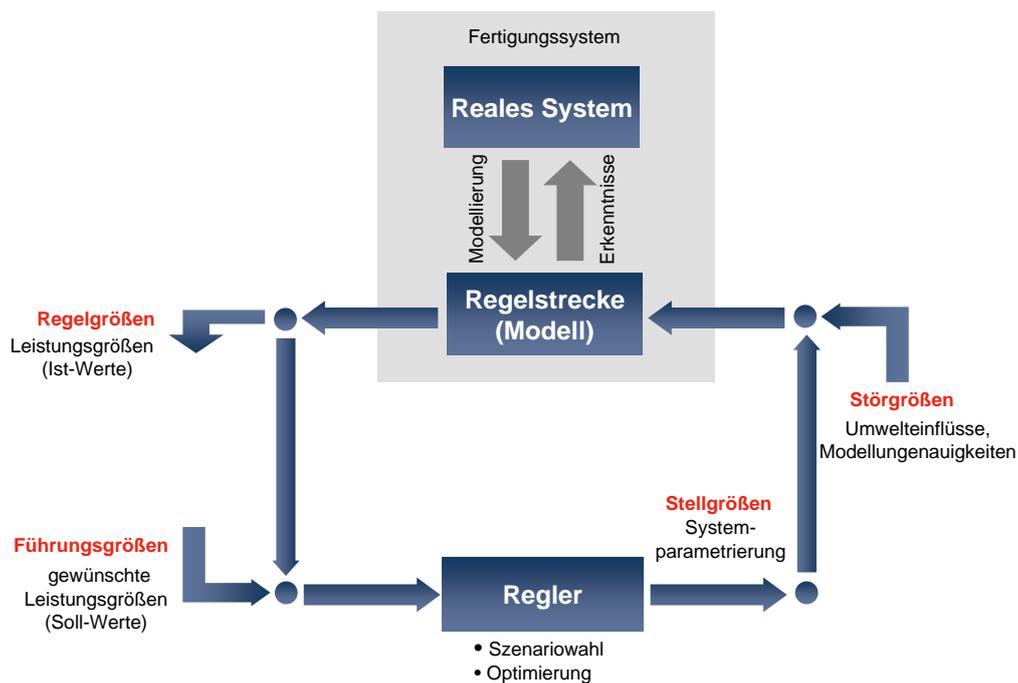


Abbildung 2-11: Modellbasierter Analyseprozess als Regelkreis

Die Regelkreisanalogie macht deutlich, dass der Analyseprozess iterativ durchlaufen werden und nach jedem Iterationsschritt ein Soll/Ist-Abgleich erfolgen muss, welcher die nächste zu analysierende Parameterkonfiguration festlegt. Außerdem wird deutlich, dass Szenarien nicht am realen System, sondern am Modell untersucht werden.

Der Analyseprozess liefert Erkenntnisse in Form einer zielführenden Parameterkonfiguration. Diese Parameterkonfiguration wird in einem weiteren Schritt auf das reale System übertragen.

2.3.2 Modellierung von Fertigungssystemen

Ein Modell ist eine Abbildung oder Darstellung eines Systems, welches das reale System oder ein zu verwirklichendes System (denkbare oder zukünftige Realität) möglichst gut im interessierenden Sachverhalt abbildet [Oert77]. Modelle entstehen durch die abstrahierende und reduzierende Abbildung realer Systeme und dienen immer einem Zweck, beispielsweise dem Entwurf einer Regelung zur Stabilisierung oder Verbesserung des Systemverhaltens, oder wie in dieser Arbeit der Analyse und Prognose des Systemverhaltens.

Wie aus Abbildung 2-11 ersichtlich, ist ein Modell an sich kein Lösungs- oder Optimierungsverfahren. Es ist im Anwendungsfall lediglich, neben einem bestimmten (meist heuristischen) Lösungsverfahren, Bestandteil eines Lösungsweges [Koxh67]. Untersuchungsaspekte bzw. Fragestellungen werden durch eine 1:n-Abbildung in den Eingangsparametern eines detaillierten Modells abgebildet [Davi00].

Ein Fertigungssystem ist ein sehr komplexes Gebilde. Komplexität bedeutet aber mehr als nur Kompliziertheit. Ein System ist kompliziert, wenn es groß und unübersichtlich, insgesamt jedoch durch statische Betrachtung vollständig analysiert werden kann. Komplexe Systeme ändern ihren Zustand ständig.

Komplexität wird nach [UIPr88] definiert als die *Fähigkeit eines Systems, in einer gegebenen Zeitspanne eine große Zahl von verschiedenen Zuständen annehmen zu können*. Kompliziertheit und Komplexität lassen sich nach [UIPr88] zusammenfassend wie folgt voneinander abgrenzen:

- Kompliziertheit = Art der Zusammensetzung
 - ist abhängig von:
 - * Anzahl + Verschiedenheit der Elemente
 - * Anzahl + Verschiedenheit der Beziehungen zwischen den Elementen

- Komplexität = Veränderlichkeit im Zeitablauf
 - ist abhängig von:
 - * Vielfalt der Verhaltensmöglichkeiten der Elemente
 - * Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe zwischen den Elementen

Abbildung 2-12 verdeutlicht die Zusammenhänge zwischen Kompliziertheit und Komplexität.

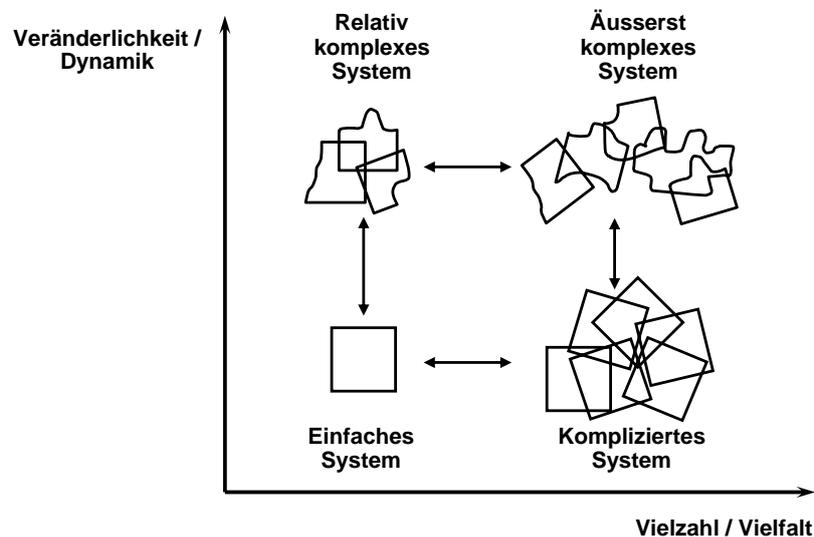


Abbildung 2-12: Zusammenhänge zwischen Kompliziertheit und Komplexität. Darstellung nach [UIPr88].

Die hohe Komplexität von Fertigungssystemen, welche sich insbesondere durch die Dynamik ergibt, lässt sich mit statischen Abschätzungen bzw. Berechnungen bestenfalls näherungsweise beschreiben und abbilden. Es können jedoch bei keiner Modellierungsmethode sämtliche Komponenten oder Faktoren sowie deren Beziehungen abgebildet werden. Vielmehr bestimmt das Analyseziel neben der Modellierungsmethode insbesondere den zu verwendenden Detaillierungsgrad und damit die Komponenten, Faktoren und deren Beziehungen, die es zu berücksichtigen gilt. Aus diesen Gründen müssen die in Abschnitt 2.3.1 dargestellten Schritte der Systemanalyse zwingend eingehalten werden.

Dieser Abschnitt geht zunächst auf die Grundbegriffe der Modellierung ein. Basierend darauf werden für die Modellierung von Fertigungssystemen relevante Methoden vorgestellt und diskutiert.

Grundbegriffe der Modellierung

Sind bei einem System zu jedem Zeitpunkt $t = t_1$ alle Ausgangssignale nur von den augenblicklichen Werten der Eingangssignale zu demselben Zeitpunkt abhängig, so handelt es sich um ein statisches System. Andernfalls handelt es sich um ein dynamisches System: Die Ausgangssignale hängen dann auch von den Auswirkungen der Vergangenheit $t < t_1$ der Eingangssignale ab [Wehl01].

Darüber hinaus muss zwischen deterministischen und stochastischen Systemen unterschieden werden. Deterministische Systeme lassen sich in ihrem Verhalten exakt vorhersagen, in stochastischen Systemen können die Systemgrößen zufallsbedingt variieren. Beispiele zufallsbehafteter Größen sind Störungen, Aufträge aus dem Markt und Leistungen der Arbeitskräfte [KoGr95].

Systeme lassen sich in die folgenden Klassen einordnen:

- **Kontinuierliche Systeme** haben kontinuierlich-wertige Ein-, Ausgangs-, und Zustandsgrößen
- **Ereignisdiskrete Systeme** haben diskret-wertige Ein-, Ausgangs- und Zustandsgrößen
- **Hybride Systeme** haben sowohl kontinuierlich-wertige als auch diskret-wertige Ein-, Ausgangs- und Zustandsgrößen

Die ereignisdiskrete Systembeschreibung ist meist das Ergebnis einer höher aggregierten oder abstrakteren Betrachtungsweise. Die Wahl der Betrachtungsweise ist in der Regel durch den zu modellierenden Prozess weitgehend vorgegeben. Abbildung 2-13 zeigt die hierarchische Einstufung von kontinuierlichen, hybriden und ereignisdiskreten Systemen bezüglich Aggregation und Abstraktion.

Kontinuierliche Systeme interagieren hauptsächlich mit der Natur und lassen sich deshalb unter Verwendung physikalischer Gesetzmäßigkeiten, beispielsweise dem Gesetz von Newton, modellieren. Ereignisdiskrete Systeme interagieren hauptsächlich mit Menschen [HoCa91]. Deshalb ist die Abbildung von Fertigungssystemen in ereignisdiskreten Modellen am geeignetsten. Im folgenden Abschnitt werden Methoden für die Modellierung ereignisdiskreter Systeme vorgestellt.

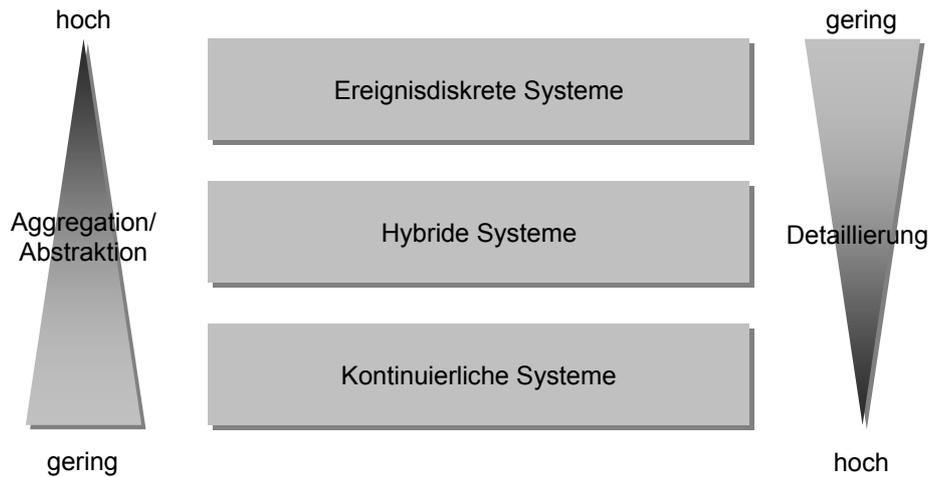


Abbildung 2-13: Modellhierarchie von kontinuierlichen, hybriden und ereignisdiskreten Systemen

Modellierung ereignisdiskreter Systeme

In Abhängigkeit des zu lösenden Analyseproblems lassen sich ereignisdiskrete Systeme unter Anwendung zahlreicher Methoden modellieren. Dazu zählen [Schl88]:

- Differentialrechnung
- Zuverlässigkeitsrechnung
- problemspezifische Berechnungsverfahren
- Graphentheorie
- Petri-Netze
- Warteschlangenmodelle
- Simulation

Differentialrechnung

Die Differentialrechnung eignet sich insbesondere für die Abbildung kontinuierlicher Systeme. Differentialgleichungen kommen aber auch für die Modellierung von Materialströmen zum Einsatz und eignen sich zum Beispiel für die Abbildung einfacher Systeme und Lieferketten (Supply Chains) unter Verwendung von Konzepten der Gasdynamik und der Verkehrstheorie [Armb04]. Die Modellierung mit Differentialgleichungen kommt insbesondere für die Implementierung von Produktionssteuerungsstrategien zum Einsatz [DaWJ04, PrDu96, SFBj05].

Zahlreiche Vereinfachungen und einschränkende Annahmen bei der Modellierung mit Differentialgleichungen erlauben deren Einsatz im Rahmen dieser Arbeit nicht.

Zuverlässigkeitsrechnung

Bei der Zuverlässigkeitsrechnung erfolgt die Modellierung mit so genannten Markov-Ketten. Für die Modellierung mittels Markov-Ketten werden für jedes Systemelement zwei Wahrscheinlichkeiten benötigt. Das System hat definierte, diskrete Zustände, in dem es sich mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, der *Zustandswahrscheinlichkeit* befindet. Mit der definierten *Übergangswahrscheinlichkeit* geht das System in einen anderen Zustand über. Eine Folge von Ereignissen (Zustandswechseln) bildet eine Markov-Kette, wenn jeweils der neue Zustand nur vom alten Zustand und von den Übergangswahrscheinlichkeiten abhängt, nicht jedoch von noch älteren Zuständen [Wehl01]. Der prinzipielle Ansatz der Markov-Ketten wird in [Schl88] anhand eines Beispiels detailliert erläutert.

In der Praxis ist der Einsatz von Markov-Modellen nur wenig verbreitet. Dies ist auf eine sehr aufwändige Modellierung für komplexe Systeme sowie auf mangelndes Datenmaterial zur Bestimmung der für diese Modellierungsmethode benötigten Wahrscheinlichkeiten zurückzuführen.

Problemspezifische Berechnungsverfahren

Neben Verfahren, welche generell einsetzbar sind, gibt es zahlreiche problemspezifische Berechnungsverfahren, die nur für bestimmte Systemstrukturen gültig sind, beispielsweise für die Pufferoptimierung von verketteten Fertigungssystemen kettenförmiger Struktur [ReJa81]. Solche Ansätze erfordern eine problemspezifische Entwicklung und finden daher überwiegend für reine Forschungszwecke Anwendung.

Graphentheorie

Mit der Graphentheorie lassen sich beispielsweise Fragen nach den kürzesten Wegen zwischen Arbeitsplätzen beantworten [Schl88]. Auf einen weit verbreiteten Repräsentanten von Graphenmodellen, die Petri-Netze, geht der folgende Abschnitt ausführlich ein.

Petri-Netze

Petri-Netze, die auch als *Stellen-Transitionen-Netze* bzw. *Place-Transition-Nets* (PTN) bezeichnet werden, sind eine Modellierungsmethode zur Analyse von Abläufen mit nebenläufigen Prozessen und nicht-deterministischen Vorgängen, welche 1962 von C.A. Petri [Petr62] entwickelt wurde.

Die Analyse von Petrinetzmodellen wird durch Austausch so genannter *Marken* (*Tokens*) zwischen den mit *Transitionen* verbundenen *Stellen* des Modells durchgeführt. Transi-

tionen werden dann ausgeführt, wenn alle zugehörigen Eingangsstellen mit Marken belegt sind und können darüber hinaus zeitbasiert sein, d.h. nach korrekter Belegung der Eingangsstellen wird eine definierte Zeit vor Ausführung der Transition verzögert. Bei Ausführung der Transition werden von jeder Eingangsstelle Marken entfernt und allen Ausgangsstellen Marken hinzugefügt. Das Synchronisieren nebenläufiger Prozesse wird erzielt, indem ausgewählte Ereignisse erst eintreten, wenn entsprechende Eingangsbedingungen vorliegen [FrRe88]. Abbildung 2-14 zeigt die Bausteine von Petri-Netzen anhand eines einfachen Beispiels.

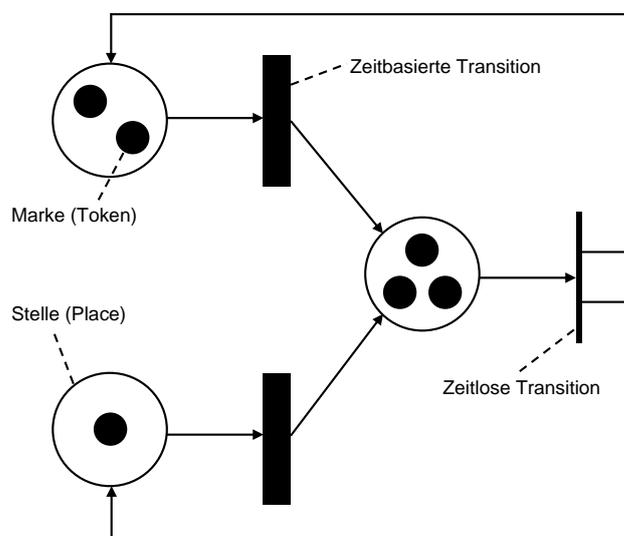


Abbildung 2-14: Bausteine von Petri-Netzen

Petri-Netze wurden in den letzten drei Jahrzehnten beständig weiterentwickelt. Heute werden folgende Petri-Netze unterschieden [BrPV93]:

- **Gewöhnliche Petri-Netze:** Ein gewöhnliches Petri-Netz ist ein 5-Tupel

$$PN = (P, T, E, A, \mu)$$

bestehend aus der Menge der Stellen P , der Menge der Transitionen T , einer Eingangsfunktion E (dargestellt als gerichtete Kanten von Stellen zu Transitionen), einer Ausgangsfunktion A (dargestellt als gerichtete Kanten von Transitionen zu Stellen) und der Markierung μ (dargestellt als Punkte in den Stellen, um den Zustand des Systems zu repräsentieren).

- **Zeitbasierte Petri-Netze:** In zeitbasierten Petri-Netzen ist eine Ausführungszeit t mit jeder Transition verknüpft. Wenn eine Transition ihre Ausführung beginnt,

dauert es t Zeiteinheiten ihre Ausführung zu beenden. Genauer werden für das Ausführen einer Transition, was auch als das „Feuern“ einer Transition bezeichnet wird, drei Schritte benötigt:

- Auslösen der Transition, wodurch alle Marken der Eingangsstellen entfernt werden
- Verzögerung um t Zeiteinheiten
- Abschließen der Transition durch Erzeugung neuer Marken in den Ausgangsstellen

Formell ist ein zeitbasiertes Petri-Netz (Timed Petri-Net (TPN)) ein 6-Tupel $TPN = (P, T, E, A, \mu, \tau)$ oder ein Paar $TPN = (PN, \tau)$. Wenn $\tau_i(t) = 0$ ist, handelt es sich um eine gewöhnliche Transition. Ein zeitbasiertes Petri-Netz, bei dem alle $\tau_i(t) = 0$ sind, ist ein gewöhnliches Petri-Netz.

- **Farbige Petri-Netze:** Ein farbiges Petri-Netz (Coloured Petri-Net (CPN)) ist die Verallgemeinerung eines gewöhnlichen Petri-Netzes. In einem farbigen Petri-Netz wird jeder Marke eine Farbe zugewiesen, die diese eindeutig identifizierbar macht. Eine Farbmenge wird jeder Stelle zugewiesen, um die Marken festzulegen, die sich an der betrachteten Stelle befinden können. Außerdem wird eine „Farbfunktion“ festgelegt, um Farbtransformationen während des Feuerns einer Transition beschreiben zu können.
- **Zeitbasierte farbige Petri-Netze:** Um komplexe Systeme untersuchen zu können, werden zeitbasierte und farbige Petri-Netze kombiniert. Das Ergebnis sind zeitbasierte farbige Petri-Netze, die die Vorteile von zeitbasierten und farbigen Petri-Netzen vereinen.

Der Einsatz von Petri-Netzen auf ein spezielles Montagesystem ist in [PeNK96] dargestellt. Eine weitergehende Einführung in die Petri-Netz-Theorie sowie deren Anwendung im Qualitätsmanagement befindet sich in [Piep98].

Gewöhnliche Petri-Netze haben den Vorteil der mathematischen Überprüfbarkeit auf mögliche Kollisionen und Endlosschleifen im modellierten Netzwerk. Diese analytischen Verfahren zur Untersuchung von Netz-Eigenschaften mit algebraischen und graphentheoretischen Methoden liefern zum Teil nur notwendige Bedingungen und sind darüber hinaus sehr rechenaufwändig [Wehl01]. Für etwas umfangreichere Systeme werden Petri-Netz-Modelle schnell unübersichtlich [Bolt89].

Die Vorteile der analytischen Verfahren können auf zeitbasierte Petri-Netze nicht übertragen werden. Außerdem gibt es derzeit keine Software zur einfachen Simulationsmodell-erstellung mittels Petri-Netzen, die auch die Möglichkeit der Objektorientierung bietet, wie sie heute bei vielen kommerziellen Simulationssoftwaretools bereits Standard ist. Eine bausteinorientierte, grafische Modellierung durch die Erstellung von Bausteinbibliotheken ist somit nicht möglich. Damit ist die Modellierungsflexibilität mittels Petri-Netzen deutlich geringer als unter Verwendung von ereignisdiskreten Simulationstools.

Die genannten Nachteile schränken die Einsetzbarkeit von Petri-Netzen als Modellierungs- und Analysewerkzeug für die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen stark ein. Im Rahmen dieser Arbeit werden Petri-Netze für die Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen deshalb nicht weiter betrachtet.

Warteschlangenmodelle

Warteschlangenmodelle, auch als warteschlangenbasierte Ansätze oder warteschlangenbasierte Verfahren bezeichnet, fanden ursprünglich im Bereich der Modellierung und Leistungsbewertung von Computersystemen Anwendung [Lave83, Bolt89] und lassen sich auf Fertigungssysteme übertragen. In diesem Abschnitt wird eine Übersicht über wesentliche Grundlagen von Warteschlangenmodellen gegeben.

Die Grundbausteine eines Warteschlangenmodells sind so genannte Wartesysteme. Ein elementares Wartesystem besteht aus einer Warteschlange sowie einer oder mehrerer identischer Bedieneinheiten, in denen Produkte bearbeitet werden (Abbildung 2-15). Der zeitliche Abstand zweier Aufträge wird als *Zwischenankunftszeit* bezeichnet. Für den Bedienprozess ist eine definierte *Bedienzeit* erforderlich. Beide Zeiten sind Zufallsgrößen und werden durch die Angabe stochastischer Verteilungen festgelegt. In [Bolt89] sind wichtige Verteilungsfunktionen aufgeführt.

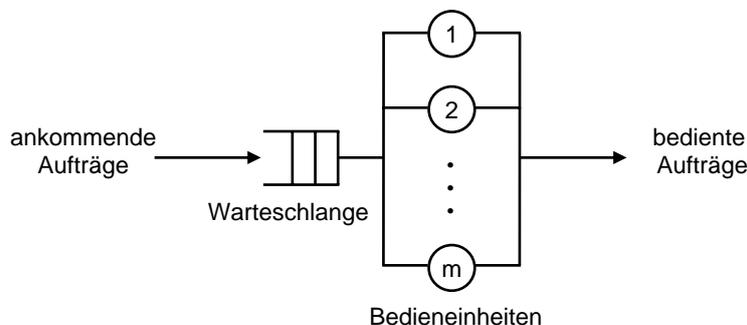


Abbildung 2-15: Bedienstation mit m Bedieneinheiten [Bolt89]

Eine Übersicht verschiedener Warteschlangenmodelle ist in [Lore84] verfügbar. Daraus ergibt sich die Einteilung der Modelle in die folgenden drei Klassen:

- Abschätzungslösungen
- Analytische, exakte Lösungen
- Näherungslösungen

Abschätzungslösungen liefern lediglich Schätzwerte für die oberen und unteren Grenzen der interessierenden Leistungsgrößen. Analytische Lösungen liefern exakte Werte und können sehr schnell ausgewertet werden. Mit Näherungslösungen lassen sich den tatsächlichen Werten angenäherte Lösungen finden. Diese kommen immer dann zum Einsatz, wenn keine analytischen Lösungen existieren. Für reale Fertigungssysteme trifft dies in der Regel immer zu.

Ein Fertigungssystem kann als ein Netz von Wartesystemen (Warteschlangennetz) modelliert werden. Die einzelnen Wartesysteme werden als Knoten des Warteschlangennetzes bezeichnet. Die Modellierung von Fertigungssystemen mit Warteschlangenmodellen wird in [AsSt93] ausführlich dargestellt. Die Fertigungssysteme, die im Rahmen dieser Arbeit mit Warteschlangenmodellen abgebildet werden, haben die in Abbildung 2-16 gezeigte einfache lineare oder konvergente Struktur.

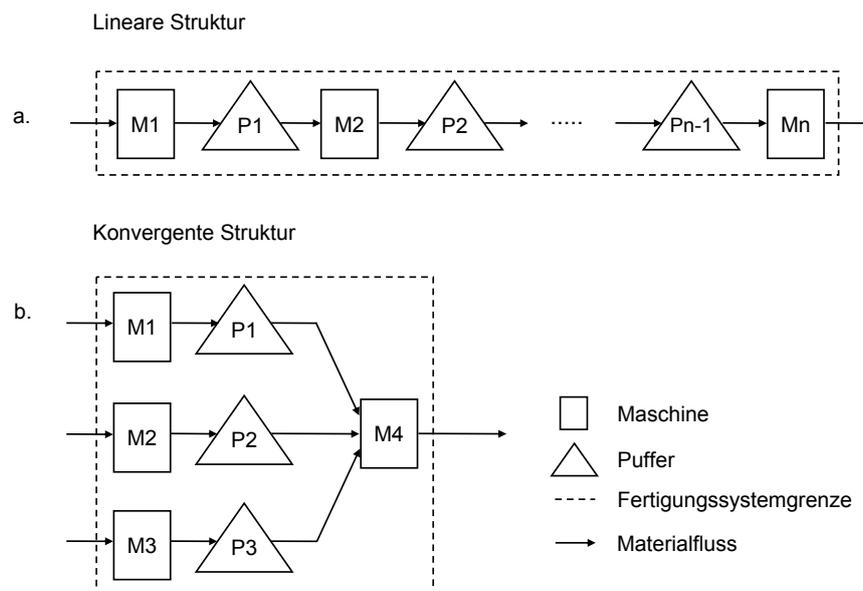


Abbildung 2-16: Mit Warteschlangenmodellen abbildbare lineare (a.) und konvergente (b.) Fertigungssystemstrukturen.

Die Modellierung und Analyse realer Fertigungssysteme mit Warteschlangenmodellen setzt die Kombination exakter Lösungen mit Näherungslösungen voraus. Da der Rechenaufwand für exakte Lösungen mit der Maschinenanzahl stark wächst, eignen sich diese nur für sehr kurze, für reale Planungsaufgaben nicht relevante, Fertigungslinien von zwei bis drei Maschinen. Exakte Lösungen dienen deshalb in erster Linie [DaGe92]

- als Grundlage für qualitative Aussagen und
- durch die Möglichkeit der schnellen Auswertung als Basis für den für größere Systeme notwendigen so genannten Dekompositionsansatz, der die Basis der meisten Näherungslösungen darstellt.

Es werden zahlreiche Algorithmen zur exakten Analyse unterschieden, abhängig davon, ob Puffer zwischen Maschinen vorgesehen sind, Störungen zwischen zwei durch einen Puffer entkoppelte Maschinen berücksichtigt werden, oder ob von Störungsfreiheit ausgegangen werden kann. Diese Algorithmen sind in [DaGe92] ausführlich dargestellt.

Aufgrund der Notwendigkeit der Modellierung größerer Fertigungssysteme werden Näherungslösungen verwendet, die auf dem bereits erwähnten Dekompositionsansatz basieren. Der Dekompositionsansatz besteht aus den folgenden drei Schritten [DaGe92]:

1. Zerlegung des Systems in analytisch lösbare Subsysteme
2. Herleitung eines Gleichungssystems zur Bestimmung der unbekannt Parameter jedes Subsystems
3. Entwicklung eines iterativen Algorithmus zum Lösen dieses Gleichungssystems

Der grundlegende Ansatz der Dekomposition besteht darin, das Gesamtsystem so in Subsysteme zweier durch einen Puffer entkoppelte Maschinen zu zerlegen, dass das Gesamtverhalten aller Linienelemente, die den im Subsystem betrachteten Maschinen vor- bzw. nachgelagert sind, durch das Subsystem approximiert wird. Am in Abbildung 2-17 gezeigten Beispiel bedeutet das konkret, dass beispielsweise Maschine $M_v(3, 4)$ die vorgelagerte Gesamtlinie in aggregierter Form abbildet, $M_n(3, 4)$ entsprechend den Teil der Linie repräsentiert, der dem Puffer 3 nachgelagert ist. Die Maschinen M_v bzw. M_n werden aus diesem Grunde auch als *äquivalente Maschinen*, *Pseudo-Maschinen* oder *virtuelle Maschinen* bezeichnet.

Es existieren zahlreiche Ansätze der Dekomposition. In [DaGe92] befindet sich eine Übersicht über diese Ansätze, eine Bewertung alternativer Algorithmen sowie zahlreiche Hinweise auf diese Problematik vertiefende Literatur. Ein weiterer Dekompositionsansatz ist

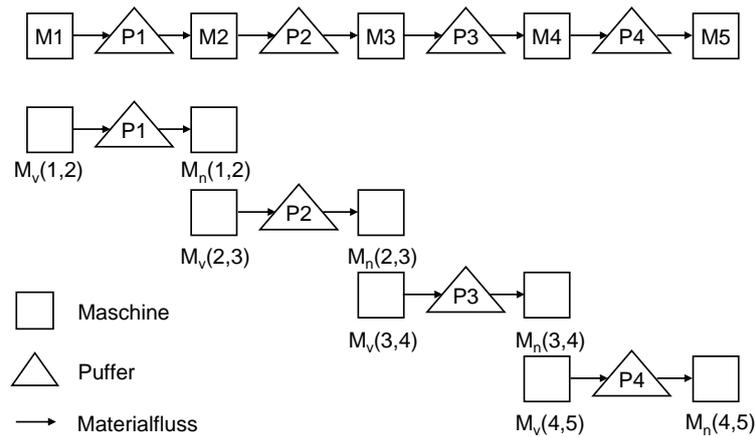


Abbildung 2-17: Dekomposition eines Fertigungssystems in Subsysteme bestehend aus zwei durch einen Puffer entkoppelte Maschinen. Darstellung nach [DaGe92].

in [CoTo05] verfügbar. Papadopoulos und Heavey [PaHe96] geben eine Übersicht über interessante Literaturquellen zur Dekomposition und zur Modellierung mit Warteschlangenmodellen.

Das bei Einsatz des Dekompositionsansatzes in Schritt 2 benötigte Gleichungssystem zur Bestimmung der unbekannt Parameter eines Subsystems kann allgemein in der Form

$$\mathbf{x} = F(\mathbf{x}) \quad (2.1)$$

geschrieben werden, wobei x den Vektor der unbekannt Parameter bezeichnet. Der im dritten Schritt der Dekomposition erforderliche iterative Algorithmus lässt sich allgemein als

$$\mathbf{x}^{(j)} = F(\mathbf{x}^{(j-1)}) \quad (2.2)$$

formulieren, wobei $\mathbf{x}^{(j)}$ die Schätzung des Parametervektors x des j -ten Iterationsschrittes der Prozedur bezeichnet.

In der Literatur werden Warteschlangenmodelle häufig verwendet um zu generellen Aussagen über Fertigungssysteme zu gelangen. Die Exponentialverteilung wird diesen Modellen dabei häufig zugrunde gelegt, da diese aufgrund bestimmter Eigenschaften (Markov- und Poisson-Eigenschaft, vgl. [Bolt89]) vergleichsweise einfach verwendet werden kann. Simulationsuntersuchungen eines Modells mit der in Abbildung 2-15 dargestellten Struktur haben gezeigt, dass die Wahl dieser Verteilungsfunktion sehr kritisch hinterfragt werden muss. Aufgrund der großen Varianz, die die Exponentialverteilung impliziert, ist die ermittelte Durchlaufzeit mit steigendem Auslastungsgrad unter Annahme exponentialverteilt

ter Zwischenankunfts- oder Bedienzeiten deutlich höher als unter Annahme allgemeiner Verteilungsfunktionen (Abbildung 2-18; vgl. Anhang A.1 für die hier verwendete Kurzschreibweise nach Kendall).

Weitere Untersuchungen zu Verteilungsfunktionen von Bearbeitungszeiten finden sich in [KnSu86]. Eine empirische Untersuchung zu Annahmen von Exponentialverteilungen in Fertigungssystemen befindet sich in [Inma99]. In [BuSh93] wird berichtet, dass die Exponentialverteilung zwar die Verteilung der Zwischenankunftszeit, nicht jedoch die der Bedienzeit gut annähert. Die Kenntnis über die bei der Modellierung und Analyse mit warteschlangenbasierten Verfahren angenommenen stochastischen Verteilungen und deren bewusste und problemangepasste Wahl ist damit entscheidend für die erfolgreiche Anwendung dieser Modellierungsmethode.

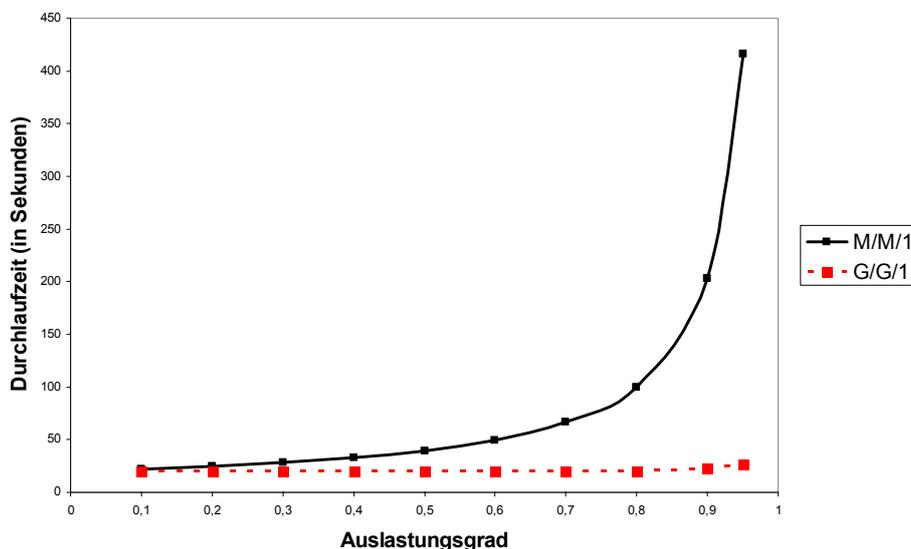


Abbildung 2-18: Betrachtung der Durchlaufzeit in Abhängigkeit der Belegung eines Fertigungssystems mit der Struktur eines elementaren Wartesystems unter Annahme unterschiedlicher stochastischer Verteilungsfunktionen

Neben der im nächsten Abschnitt detailliert beschriebenen Simulation sind warteschlangenbasierte Verfahren ein interessanter Ansatz für die Modellierung von ereignisdiskreten Systemen. Ist der notwendige mathematische Unterbau vorhanden, sind sowohl Modellierung als auch Ergebnisberechnung, verglichen mit der Simulation, in deutlich kürzerer Zeit durchführbar [BIFr06].

Eine Möglichkeit des Einsatzes von Warteschlangenmodellen für die Optimierung von Produktionssteuerungsverfahren ist in [Gste98] dargestellt. Ein Vergleich von Simulationsmodellen mit Warteschlangenmodellen wird in [ScHR02] mit dem Ergebnis durchge-

führt, dass zur detaillierten Analyse, insbesondere unter Berücksichtigung der Dynamik in Fertigungssystemen, die Simulation auf absehbare Zeit unersetzbar bleibt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird in Kapitel 4 auf die Möglichkeit des Einsatzes von Warteschlangenmodellen in der Fertigungsplanung alternativ und ergänzend zur Materialflusssimulation eingegangen.

Simulation

Der Begriff *Simulation* wird für viele Aufgabengebiete verwendet. Allgemein wird unter Simulation die Nachahmung technischer Vorgänge oder die Nachbildung realistischer Vorgänge mit Hilfe eines Computers verstanden [BaWe00].

In der Mathematik ist von Monte Carlo Simulationen für verschiedenste Einsatzmöglichkeiten die Rede [Rubi81, Fish96]. Bei Monte Carlo Simulationen erfolgt die Auswertung von Gleichungen unter Anwendung stochastischer Eingangsgrößen. Monte Carlo Simulationen stellen damit eine Erweiterung von einfachen statischen Berechnungen mit deterministischen Eingangsgrößen dar [Thir04, Seil04] und können in vielen Anwendungsfeldern zu erheblichen Verbesserungen von Planungsergebnissen beitragen [Luca00, VDI4008]. Bei der oben beschriebenen Differentialrechnung wird das numerische Lösen eines Differentialgleichungssystems unter Berücksichtigung unterschiedlicher Parametrierungen als Simulation bezeichnet.

In der Fabrik- und Fertigungsplanung gibt es mehrere Einsatzgebiete für Simulationstechniken. Wie in Abbildung 2-19 dargestellt, reichen diese von Geschäftsprozesssimulationen zur Unterstützung von strategischen Entscheidungen bis hin zu Maschinensimulationen für Kollisionsuntersuchungen oder Funktionsprüfungen. Die Modellaggregation nimmt dabei von der Geschäftsprozesssimulation zur Maschinensimulation kontinuierlich ab. Im gleichen Maße steigert sich der Detaillierungsgrad. Eine Möglichkeit der Kombination verschiedenartiger Simulationsmethoden ist in [CCKV02] vorgestellt.

Zahlreiche der in Abbildung 2-19 genannten Simulationsmethoden werden in [Wutt00] und in den darin zitierten Arbeiten ausführlich beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Simulation auf Linienebene betrachtet. Die Simulation auf dieser Ebene wird auch als *Materialflusssimulation* oder *Ablaufsimulation* bezeichnet, womit der Fluss von Erzeugnisrohstoffen und Erzeugnissen sowie den damit verbundenen Informationsflüssen in Fertigungssystemen gemeint ist. Es handelt sich damit um die ereignisdiskrete Simulation. Bei dieser Simulation werden ausgehend von einem Anfangszeitpunkt t_0 mit

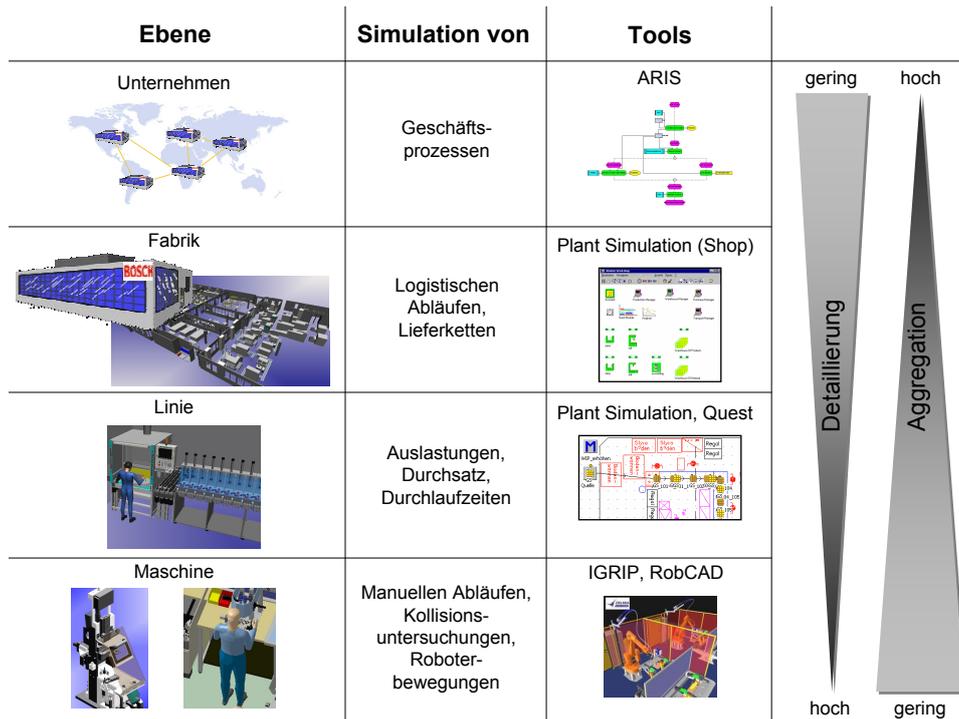


Abbildung 2-19: Arten der Simulation im fertigungstechnischen Umfeld

den zugehörigen Anfangszuständen und Anfangszustandsdauern die Folgeereignisse durch Ausführung der Übergänge zwischen den Zuständen aus den Regeln zur Bestimmung der Folgeereignisse ermittelt. Aus den einzelnen Zustandsdauern werden die zeitlichen Anteile der Zustände an der gesamten Simulationsdauer und damit die charakteristischen Kennwerte ermittelt [Wale91]. In dieser Arbeit wird unter *Simulation* einheitlich die *Materialflusssimulation* verstanden.

Die Simulation ist die flexibelste aller für ereignisdiskrete Systeme zur Verfügung stehenden Modellierungstechniken, die gleichzeitig den höchsten Detaillierungsgrad ermöglicht. Deshalb ist die Simulation die wichtigste praxisorientierte Methode. Die Simulation lässt sich auf beliebigen Detaillierungsgraden durchführen, die in Abhängigkeit von der zugrunde liegenden Fragestellung gewählt werden müssen. Moderne Simulationssysteme ermöglichen eine hierarchische Modellerstellung, bei der Simulationselemente stufenweise ausdetailliert werden können.

In Abbildung 2-20 sind zahlreiche mögliche Anwendungsgebiete der Simulation dargestellt, welche in [Wutt00] näher beschrieben werden. Aus dieser Abbildung wird deutlich, dass die Simulation insbesondere in der Anlagenplanung eingesetzt wird.

Neben dem Einsatz bei der Planung kann die Simulation auch auf taktischen und operativen Ebenen eines Unternehmens zur Anwendung kommen. Ein großes Anwendungsgebiet ist die fertigungsbegleitende Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Die Simulation unterstützt hier zum einen die Produktionsprogrammplanung sowie die Produktionssteuerung (Auftragsveranlassung und Auftragsüberwachung). Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist die Fertigungs- bzw. Arbeitsvorbereitung. Diese beinhaltet nach [AWF68, Ever97] die Arbeitsplanung, welche alle einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen umfasst, sowie die Arbeitssteuerung, welche alle Maßnahmen umfasst, die für die Auftragsabwicklung erforderlich sind.

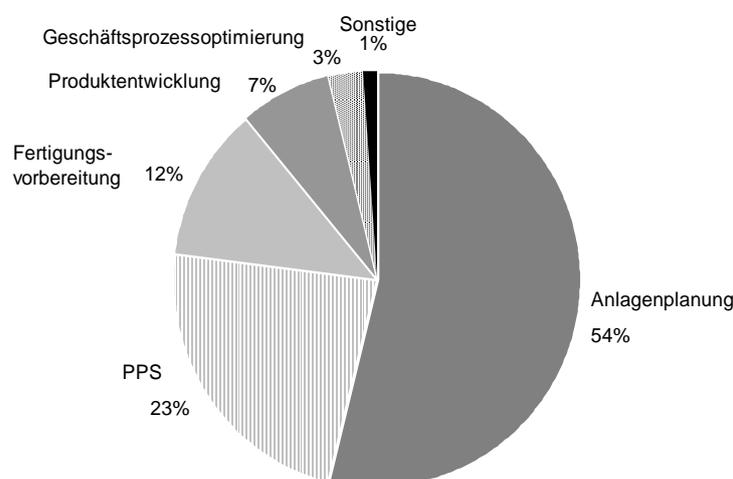


Abbildung 2-20: Anwendungsgebiete der Simulation nach [ReFe97]

Für den erfolgreichen Einsatz der Simulation ist das Verständnis der grundlegenden Funktionsweise eines Simulationsprogramms sowie die Kenntnis verwandter Themen unerlässlich. Umfassende Erläuterungen zu allen die Simulation betreffenden Themen sind in [Bank98, LaKe00, Fish01, BCNN01] ausführlich dargestellt. Das Verständnis für die Wichtigkeit der Implementierung einer Simulationssoftware wird in [ScBr03] anhand zahlreicher Beispiele dargestellt. Auf die Simulationsmodellkonzeption und deren softwaretechnische Implementierung wird im Folgenden nicht weiter eingegangen.

Entscheidend für die im Rahmen dieser Arbeit angestrebte zielführende Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen unter Entwicklung von innovativen Einsatzmöglichkeiten der Simulation und verwandten Methoden ist die Darstellung des Ablaufs einer Simulationsstudie, eine Diskussion genereller Einsatzmöglichkeiten und des Nutzens der Simulation sowie deren Vor- und Nachteile.

Beispiele für typische Aufgabenstellungen (siehe [ArWe04]) und erfolgreich durchgeführte Simulationsuntersuchungen (siehe beispielsweise [Gute01]) existieren zur Genüge.

Das grundsätzliche Vorgehen einer Simulationsuntersuchung gliedert sich in folgende Phasen [Wutt00]:

- **Definition der Problemstellung:** Eine eindeutig formulierte Problemstellung stellt bereits einen Wert an sich dar, weil sie die Einigung aller beteiligten Projektpartner bezüglich der zu beantwortenden Fragestellung voraussetzt und dokumentiert.
- **Datenbeschaffung:** Nach Abschluss der Datenbeschaffung für die Simulationsstudie stehen bereinigte und aggregierte Daten zur Verfügung. Daraus lassen sich schon erste Erkenntnisse über das betrachtete System ableiten.
- **Modellaufbau:** Die Implementierung des Simulationsmodells erfolgt entsprechend der zugrunde liegenden Fragestellung. Ein integraler Bestandteil des Modellaufbaus ist die in Abschnitt 2.3.1 diskutierte Verifikation und Validierung.
- **Experimente:** Ein entsprechend der Fragestellung mit Methoden des DoE (Design of Experiments) aufgestellter Versuchsplan erlaubt eine effiziente und effektive Durchführung der Experimente zur Aufnahme der Ergebnisgrößen.
- **Interpretation:** Die in der Problemstellung konkret formulierten Fragen können erst nach einer Interpretation aller Simulationsergebnisse vollständig beantwortet werden.

Die Entwicklung von Aufwand und Nutzen über diesen Phasen ist in Abbildung 2-21 dargestellt. Daraus wird deutlich, dass der Nutzen einer Simulationsstudie nicht nur in den eigentlichen Ergebnissen beziehungsweise deren Interpretation liegt, sondern im Projektverlauf über die einzelnen Phasen durch detaillierte Analyse des Fertigungssystems und Bearbeitung relevanter Planungsdaten kumuliert wird. Die Simulation kann deshalb auch als ein „Denkverstärker“ erachtet werden, der erst durch Interaktion mit dem Benutzer die brauchbare oder die „beste“ Lösung finden kann [KoGr95]. Die dargestellte Aufteilung des Gesamtaufwandes ist repräsentativ für alle Simulationsuntersuchungen. Speziell hervorzuheben ist der Anteil am Gesamtaufwand von über 40% für Modellaufbau und Experimentdurchführung.

Der insgesamt erzielbare Nutzen durch Einsatz der Simulation ist oft schwer quantifizierbar und stark projektabhängig [GMSW03]. Nach [Wilk05] liegen die erzielbaren Einsparungen durch den Simulationseinsatz um den Faktor sechs über deren Kosten. In [West03]

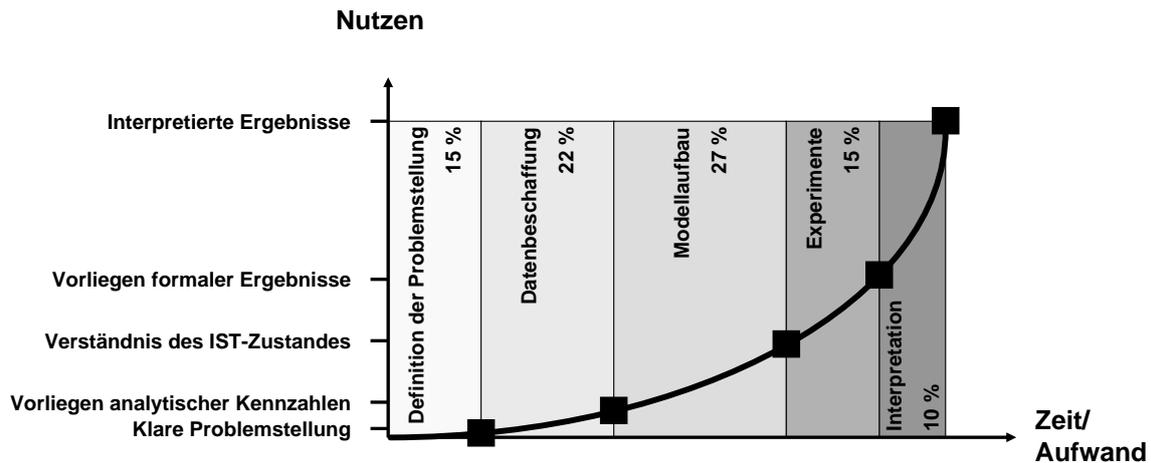


Abbildung 2-21: Entwicklung von Aufwand und Nutzen bei einer Simulationsstudie nach [Wutt00]

erfolgt eine Klassifizierung der Anwendungsgebiete der Simulation und eine Darstellung des damit verbundenen Nutzenpotenzials. Weitere Bewertungskriterien zur Quantifizierung des Nutzens werden in [Gang03] diskutiert.

Neben dem quantifizierbaren Nutzen muss zusätzlich der erweiterte Nutzen der Simulation berücksichtigt werden, da der Simulationsexperte häufig detaillierte Fragen zum System stellen muss, die von den Planern aufgrund fehlender Primärdaten nicht direkt beantwortet werden können [Coll02]. Dies machte eine intensive Untersuchung und Beobachtung des realen Systems erforderlich und führt unter Umständen bereits zur Aufdeckung von Verbesserungspotenzialen.

Die Anwendung der Simulation als dynamische Bewertungsmethode ist generell immer dann von besonderem Nutzen, wenn die Fragestellung gar nicht oder nicht mit ausreichender Genauigkeit mit statischen oder anderen Methoden, bei denen wesentliche Details unberücksichtigt bleiben, beantwortet werden kann. Dies ist in der Feinplanung komplexer Fertigungssysteme meist der Fall.

Ein wichtiges Anwendungskriterium ist dann erfüllt, wenn das Verhalten eines Gesamtsystems von übergreifenden, komplexen Wirkzusammenhängen einzelner Teilsysteme, deren Eigenschaften bekannt sind, bestimmt wird [Günz93]. Weitere allgemeine Kriterien für den Einsatz der Simulation sind [VDI3633a]:

- Das zeitliche Ablaufverhalten eines Systems steht im Mittelpunkt des Interesses.
- Das Experimentieren am realen System ist nicht möglich oder zu kostenintensiv.

- Das zu untersuchende System ist zumindest in einem Teilaspekt neu, so dass nicht aus der Erfahrung hinreichend sicher auf das Verhalten des Systems geschlossen werden kann.

Obwohl die Simulation bei Vorliegen der genannten Kriterien meist ohne Alternative bleibt, ist deren Einsatz in der Praxis als unzureichend einzustufen. Dies kann auf vier wesentliche Defizite beim Simulationseinsatz zurückgeführt werden [Coll02]:

- Hohe Komplexität der Werkzeuge
- Projektmanagement, -durchführung und Unternehmensumfeld
- Mangelnde Integration in den Planungsprozess
- Enormer Datenbedarf

Der Entscheidung über den Einsatz der Simulation geht stets eine Kosten-/Nutzenanalyse unter Berücksichtigung der vorgenannten Kriterien voran.

Die Kosten der Simulation entstehen durch Aufwendungen für Personal sowie für Hard- und Software. Da die Simulation aufgrund der hohen Komplexität der Werkzeuge Expertenwissen verlangt, eignet sie sich nur bedingt für den Einsatz in der kooperativen Fertigungsplanung, d.h. der Planung in Form von Workshops, mit denen der Umfeld-dynamik durch eine örtlich und zeitlich gebündelte Planungs- und Entscheidungskraft entgegen getreten werden kann [WiHG02]. Der Aufwand für die eigentliche Simulation erhöht sich damit zusätzlich durch den notwendigen Abstimmungsaufwand mit Simulationsexperten und durch Einführung eines geeigneten Projektmanagements.

Neben hohen Aufwänden bei Simulationsstudien ist auch deren Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess entscheidend. Oft werden Simulationsstudien zu spät in Auftrag gegeben [KoGr95]. Die Wirksamkeit der Simulation steigt durch den Einsatz in frühen Entwicklungsphasen eines Fertigungssystems, da in diesen ein großer Einfluss auf die Kosten besteht und Änderungskosten gleichzeitig gering sind (vgl. Abbildung 2-22).

Obwohl die Simulation einige Nachteile und Defizite insbesondere hinsichtlich des erforderlichen Aufwandes mit sich bringt, handelt es sich aufgrund der hohen Flexibilität hinsichtlich Einsatzgebieten und Detaillierungsgrad der Modelle um eine sehr wichtige Modellierungs- und Analyse-methode. Aufgrund neuer Möglichkeiten, welche sich durch die in Abschnitt 2.2 erläuterten veränderten Rand- und Rahmenbedingungen der Fabrik-

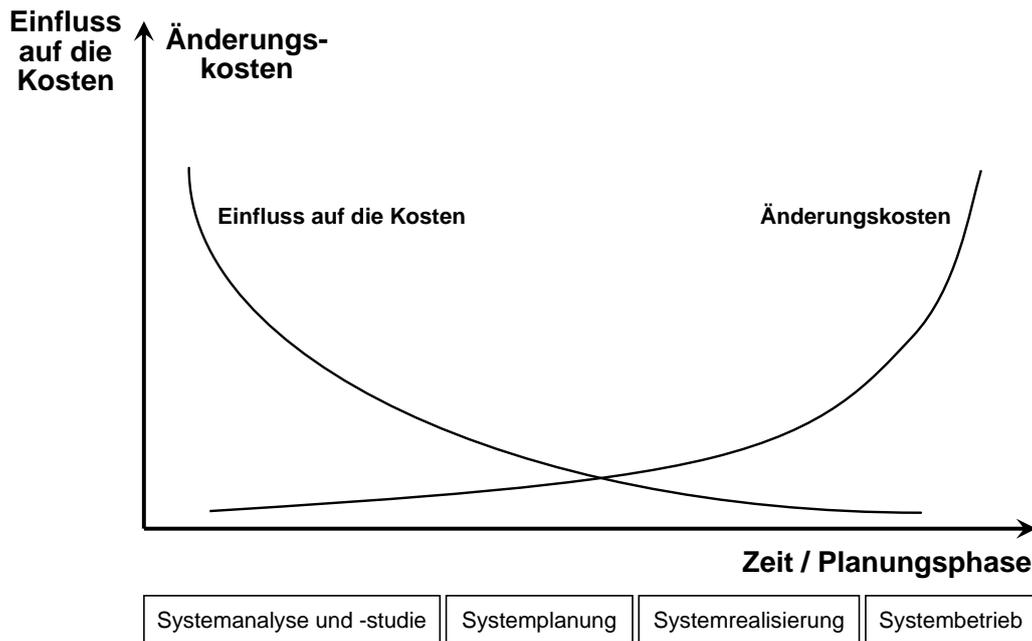


Abbildung 2-22: Einfluss der Simulation auf die Kosten und Änderungskosten in den einzelnen Entwicklungsphasen eines Fertigungssystems. Darstellung nach [KoGr95].

und Fertigungsplanung ergeben, wird im Rahmen dieser Arbeit eine zielführende Modellierung und Analyse erarbeitet, welche die diskutierten Nachteile und Defizite deutlich verringern.

2.4 Zusammenfassung und Fazit

Neue Rand- und Rahmenbedingungen der Fabrik- und Fertigungsplanung ergeben sich durch das Marktumfeld, die Rechnerunterstützung durch die Digitale Fabrik und die Entwicklung von Produktionssystemen zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme. Diese Rand- und Rahmenbedingungen sind wesentlicher Inhalt dieses Kapitels. Sie unterstützen und ermöglichen eine zielführende Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen.

Basierend auf der in Abschnitt 2.3.1 diskutierten Systemanalyse wird deutlich, dass die Anforderungen des Analyseproblems zunächst konzeptionell das erforderliche Modell und damit auch die zu verwendende Modellierungsmethode festlegen. Für die Modellierung von Fertigungssystemen eignet sich unter bestimmten Einschränkungen, neben der zuletzt betrachteten Simulation, insbesondere die Modellierung unter Anwendung von Warteschlangenmodellen. Die diskutierten Defizite und Nachteile der Simulation machen darüber hinaus deutlich, dass eine zielführende Modellierung und Analyse erforderlich ist.

Im folgenden Kapitel werden die in Kapitel 1 skizzierten Ansätze zur vereinfachten Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen durch ein geeignetes Portfolio klassifiziert. Dieses ist die Grundlage der Entwicklung einer Heuristik zur Auswahl zielführender Methoden für die Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen. Dabei wird das erforderliche Vorgehen festgelegt und der Entwicklungsbedarf identifiziert. Dies geschieht unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.2 dargestellten Rand- und Rahmenbedingungen sowie der spezifischen Einsatzgebiete der in diesem Kapitel vorgestellten Modellierungs- und Analysemethoden für Fertigungssysteme.

3 Heuristik zur Auswahl zielführender Methoden für die Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen

3.1 Einführung

Ausgangspunkt jeder Analyse ist ein konkretes Problem, welches durch drei wesentliche Komponenten gekennzeichnet ist [Dörn76]:

1. Unerwünschter Anfangszustand (Ist-Zustand) s_α
2. Erwünschter Endzustand (Soll-Zustand) s_ω
3. Barriere, die die Transformation von s_α in s_ω im Moment verhindert.

Abbildung 3-1 verdeutlicht den Zusammenhang dieser Problemkomponenten. Unter den für die Transformation benötigten Operatoren werden im Rahmen dieser Arbeit Methoden und Werkzeuge für die Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen verstanden.

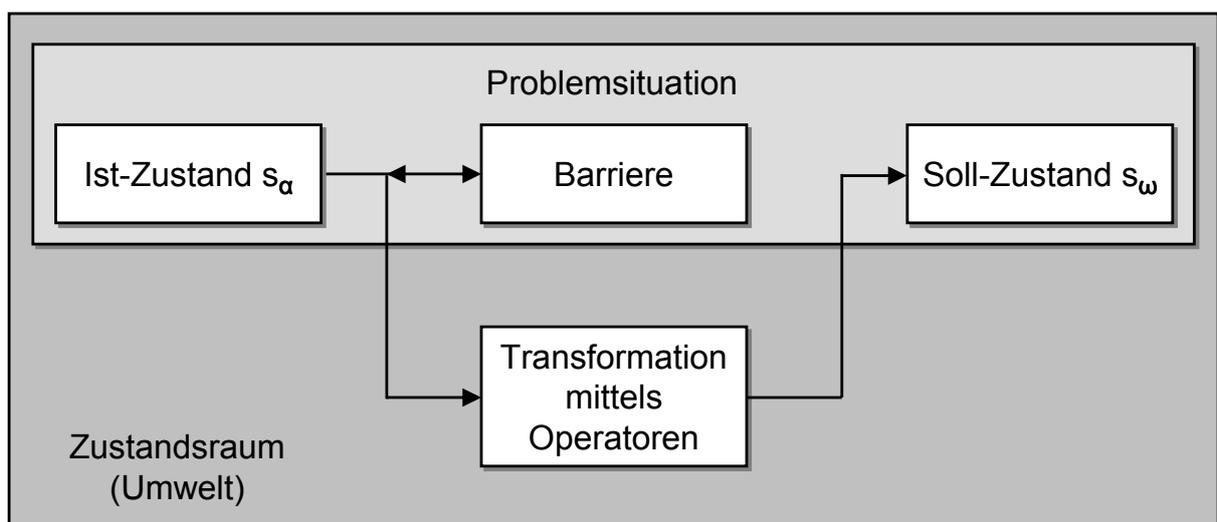


Abbildung 3-1: Definition eines Problemes nach [Müll94]

Es ist sinnvoll, Probleme von Aufgaben abzugrenzen. Dabei wird auf die häufig zitierte Definition von Dörner zurückgegriffen [Dörn76]: „Aufgaben sind geistige Anforderungen,

für deren Bewältigung Methoden bekannt sind. Aufgaben erfordern nur reproduktives Denken, beim Problemlösen muss etwas Neues geschaffen werden.“ Bei einer Aufgabe ist die in Abbildung 3-1 dargestellte Barriere also nicht vorhanden.

Die im vorangehenden Kapitel beschriebenen Modellierungs- und Analysemethoden unterscheiden sich im Wesentlichen durch die mögliche Modellierungsgenauigkeit, ihren Einsatzbereich und den mit den Methoden verbundenen Aufwand. In diesem Abschnitt wird eine Heuristik zur Unterstützung der Auswahl zielführender Methoden für die Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen entwickelt, welche die Transformation eines Analyseproblems in eine Analyseaufgabe unterstützt. Die zur Lösung der Analyseprobleme fehlenden Methoden und Werkzeuge werden in diesem Kapitel identifiziert und im Rahmen dieser Arbeit entwickelt.

3.2 Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio

Bei eingehender Betrachtung zahlreicher Analyseprobleme fällt auf, dass diese sich in erster Linie durch den für die Modellerstellung erforderlichen Detaillierungsgrad und die zu beobachtende Untersuchungshäufigkeit der zugrunde liegenden Fragestellung unterscheiden.

Wie in Kapitel 2.3.1 dargestellt, wird der Detaillierungsgrad durch die für eine Fragestellung zu berücksichtigenden Komponenten und Faktoren sowie deren Beziehungen festgelegt.

Dagegen fällt die Festlegung einer Untersuchungshäufigkeit deutlich schwerer. Diese kann in erster Linie auf Basis von Erfahrungswissen retrospektiv bestimmt werden. Bei Einführung neuer Produktionsmethoden oder Fertigungssysteme lässt sich die zu erwartende Untersuchungshäufigkeit bestimmter Fragestellungen auch antizipativ abschätzen.

Aufgrund der Schwierigkeit einer stark differenzierten Betrachtung sowohl des Detaillierungsgrades als auch der Untersuchungshäufigkeit werden diese qualitativ auf den Stufen *hoch* und *gering* unterschieden. Daraus ergeben sich vier Quadranten im so genannten *Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio*, in welchem die Zuordnung von geeigneten Analysemethoden entsprechend der beiden Kriterien erfolgt (vgl. Abbildung 3-2). Die Quadranten des Portfolios werden in der Folge detailliert beschrieben.

Detaillierungsgrad	hoch	Teilautomatischer Simulationsmodellbau <ul style="list-style-type: none"> • Datenexport aus Planungswerkzeug • Schnittstelle zum Simulationswerkzeug 	Simulationsmodellbau <ul style="list-style-type: none"> • Modellmehrfachnutzung • Generische Simulationslösungen 	
	gering	Alternative Methoden und Werkzeuge <ul style="list-style-type: none"> • Statische Abschätzungen • Warteschlangenmodelle 	Simulationsbasierte Kennfelder	
		gering	Untersuchungshäufigkeit	hoch

Abbildung 3-2: Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio

3.2.1 Simulationsmodellbau

Erfordert die Fragestellung eines Analyseproblems eine detaillierte Betrachtung des zugrunde liegenden Fertigungssystems, ist die Erstellung eines detaillierten Simulationsmodells erforderlich. Dafür ist in der Regel die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellte Vorgehensweise notwendig, welche im Folgenden auch als traditionelle Vorgehensweise einer Simulationsuntersuchung bezeichnet wird. In [Wutt00] werden basierend auf dieser Methoden und Werkzeuge zur Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen entwickelt, ausführlich diskutiert und beschrieben. Die Modellmehrfachnutzung wird deshalb an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

Alternativ zur traditionellen Vorgehensweise einer Simulationsuntersuchung und der damit verbundenen Möglichkeit der Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen bietet sich die so genannte *generische Simulation* an. Bei der generischen Simulation werden die Parameter eines Fertigungssystems für den Simulationsmodellbau in einer Datenbank abgelegt. Dies erlaubt einen schnellen Modellaufbau und eine schnelle Adaptierung des Modells bei Parameteränderungen des Realsystems. Das Fertigungssystem muss strukturell jedoch immer gleichartig aufgebaut sein.

Bei der generischen Simulation werden folgende Fälle unterschieden:

- In **Fall I** erfolgt der Einsatz basierend auf Online-Daten eines *Enterprise Resource Planning (ERP)*-Systems produktionsbegleitend im operativen Umfeld. Abbildung 3-3 zeigt den prinzipiellen Aufbau der generischen Simulation für diesen Fall. Der Modellaufbau geschieht auf Basis einer Simulationsdatenbank, welche durch

Kopieren der Online-Datenbank erzeugt wird. Dies ist erforderlich, um verschiedene Szenarien untersuchen und vergleichen zu können, ohne dabei die Online-Daten ändern oder Modifikationen direkt am Simulationsmodell durchführen zu müssen. Der automatische Modellaufbau, basierend auf in einer Produktionsdatenbank gespeicherten Daten einer realen Fertigung zur schnellen Bewertung von Produktionsstrategien im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS), ist in [ReSe02] verfügbar.

- In **Fall II** erfolgt die Untersuchung ohne Verwendung von Online-Daten einer bestehenden Fertigung. Dieser Fall ist dann von Interesse, wenn häufig gleiche Fragestellungen bei identischen Fertigungssystemstrukturen auftauchen. Der Aufbau entspricht dem in Abbildung 3-3 gezeigten Aufbau ohne Berücksichtigung der Online-Datenbank und den damit verbundenen Computersystemen. Jede Fragestellung, die ein strukturell andersartiges Simulationsmodell benötigt, macht eine spezifische Lösung oder Adaptierung einer bestehenden Lösung erforderlich. Diese spezifischen Lösungen werden auch als *generische Simulationslösungen* bezeichnet.

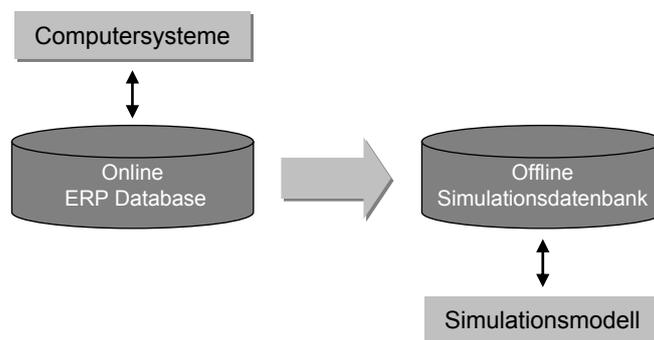


Abbildung 3-3: Prinzipieller Aufbau der generischen Simulation nach [RaBo01]

Der einmalige Aufwand für den Aufbau einer generischen Simulationslösung ist höher als der für eine traditionelle Simulation benötigte Aufwand. Durch häufigen Einsatz der generischen Simulationslösung amortisiert sich dieser Initialaufwand in der Regel sehr schnell. Für Fall I, in dem die generische Simulation operativ und dadurch sehr häufig eingesetzt wird, verringert sich der Aufwand der Simulationsmodellwartung gegenüber der traditionellen Vorgehensweise besonders deutlich, da die Simulationsdaten automatisch mit der ERP-Datenbank aktualisiert werden [RaBo01]. Lediglich strukturelle Änderungen des Fertigungssystems erfordern aufwändigere Modifikationen der generischen Simulationslösung, diese kommen in der Praxis jedoch vergleichsweise selten vor. Darüber hinaus sind folgende Vorzüge der generischen Simulation zu nennen [RiMä01]:

- Die Parametrierung durch die Simulationsdatenbank erweitert den Simulationseinsatz auf Anwender, die den Umgang mit Simulationswerkzeugen nicht kennen.
- Die Simulation erfordert eine hohe Datenqualität und macht so ein leichtes und frühes Aufdecken von Ungenauigkeiten der Planungsdaten möglich. Die hohe Datenqualität wird durch die Datenbankkopplung sichergestellt.
- Der Vergleich der Simulationsergebnisdaten mit den realen Produktionsdaten erhöht die Planungsqualität.
- Das Speichern der Daten in einer Datenbank ist Grundlage für Plausibilitätsüberprüfungen vor der Simulationsmodellerstellung.

Die generische Simulation hat derzeit einen Reifegrad erreicht, der eine direkte Umsetzung des Konzeptes ermöglicht. Diese Umsetzung sowie die erforderliche Softwarearchitektur sind in [HaMP04] ausführlich dargestellt und werden deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vertieft.

3.2.2 Teilautomatischer Simulationsmodelleraufbau

Bei Fragestellungen, die in der Planungspraxis nur selten auftauchen, ist der Aufbau eines generischen Simulationsmodells aufgrund des hohen Initialaufwandes nicht zielführend. Wird dennoch eine detaillierte Modellbildung und damit der Einsatz der Simulation benötigt, muss der Aufwand für den Modellaufbau reduziert werden.

Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, ist die Planung mit der Digitalen Fabrik eine wichtige Randbedingung der heutigen Fabrik- und Fertigungsplanung. Hierbei werden Planungsdaten in einer redundanzfreien Datenbank zentral gespeichert (vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Realisierung eines geeigneten Exports simulationsrelevanter Planungsdaten unterstützt den manuellen oder teilautomatischen Simulationsmodelleraufbau und dient als Basis für einen automatischen Simulationsmodelleraufbau.

Die Hauptschwierigkeit für einen automatischen Simulationsmodelleraufbau ist weniger die datentechnische Realisierung einer geeigneten Schnittstelle, sondern vielmehr der geringere Detaillierungsgrad der statischen Modelle der Digitalen Fabrik gegenüber dem für ein Simulationsmodell erforderlichen Detaillierungsgrad. Deshalb ist die Entwicklung eines geeigneten Schnittstellenkonzeptes erforderlich, welches im Kern darauf basiert, so genannte Modellierungsfälle auf eine begrenzte Anzahl zu beschränken.

Bei Anwendung des teilautomatischen Modellaufbaus wird zunächst geprüft, ob der durch das statische Modell abgebildete Modellierungsfall Teil des so genannten Modellierungskataloges ist und damit bereits durch die Schnittstelle berücksichtigt wird. Ist dies der Fall, kann das Modell direkt aufgebaut werden. Falls der Modellierungsfall nicht implementiert ist, wird zunächst geprüft, ob dieser in den Modellierungskatalog aufgenommen werden sollte. Wird dieser Fall implementiert, kann die automatische Modellgenerierung künftig direkt erfolgen. Ansonsten werden die simulationsrelevanten Daten exportiert und damit der manuelle bzw. teilautomatische Modellaufbau unterstützt.

Abbildung 3-4 fasst das beschriebene Vorgehen in einem Flussdiagramm zusammen. Fehlen Methoden oder Werkzeuge einzelner Prozessschritte, so sind diese farblich hervorgehoben. Die detaillierte Beschreibung dieses Schnittstellenkonzeptes und dessen Implementierung erfolgt in Kapitel 6.

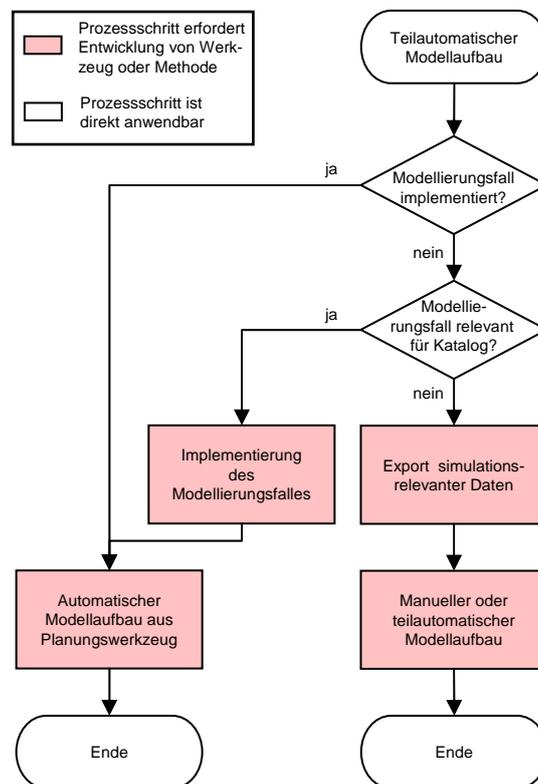


Abbildung 3-4: Flussdiagramm für den teilautomatischen Modellaufbau

3.2.3 Alternative Methoden und Werkzeuge

Ist der für die modellbasierte Analyse zu wählende Detaillierungsgrad gering, ist die aufwändige Erstellung eines Simulationsmodells nicht zielführend. Bei geringer Untersuchungshäufigkeit der Fragestellung erfolgt die Modellierung und Analyse des betrach-

teten Fertigungssystemen mit Warteschlangenmodellen, sofern diese für das betrachtete System vorhanden sind, oder mit Hilfe von statischen Abschätzungen. Sind statische Abschätzungen nicht ausreichend, muss der Einsatz der verbleibenden Ansätze im Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio geprüft werden. Abbildung 3-5 zeigt das Flussdiagramm für den Einsatz alternativer Methoden und Werkzeuge.

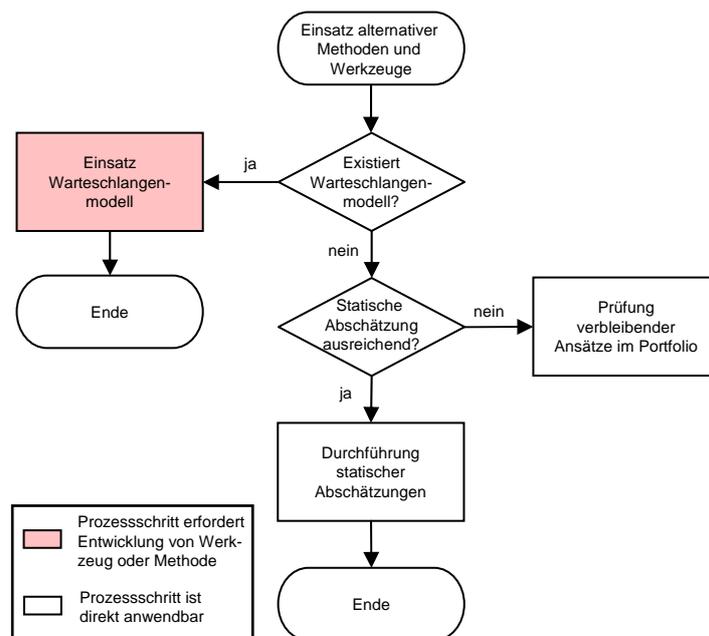


Abbildung 3-5: Flussdiagramm für den Einsatz alternativer Methoden und Werkzeuge

Die Modellierung, Analyse und Optimierung mit Warteschlangenmodellen sind in Kapitel 4 beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wird insbesondere dargestellt, wie der Einsatz von Warteschlangenmodellen unter den in Abschnitt 2.2 aufgeführten Rand- und Rahmenbedingungen möglich ist und inwiefern Warteschlangenmodelle und Simulationsmodelle sinnvoll kombiniert eingesetzt werden können.

3.2.4 Simulationsbasierte Kennfelder

In der Fertigungsplanungspraxis tauchen häufig gleiche oder vergleichbare Fragestellungen auf. Dies gilt besonders vor dem Hintergrund der Einführung von Produktionssystemen zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Ist für solche Fragestellungen eine dynamische Modellierung ohne Berücksichtigung anlagenspezifischer Details, d.h. eine Modellierung bei geringem Detaillierungsgrad, ausreichend, bieten sich die Erstellung und Anwendung simulationsbasierter Kennfelder an.

Sind die genannten Voraussetzungen hinsichtlich Detaillierungsgrad und Untersuchungshäufigkeit erfüllt, wird zunächst geprüft, ob ein geeignetes und direkt anwendbares Kennfeld bereits existiert. Wenn ein entsprechendes Kennfeld nicht existiert, muss dieses entwickelt werden. Abbildung 3-6 zeigt das Flussdiagramm für den Einsatz simulationsbasierter Kennfelder.

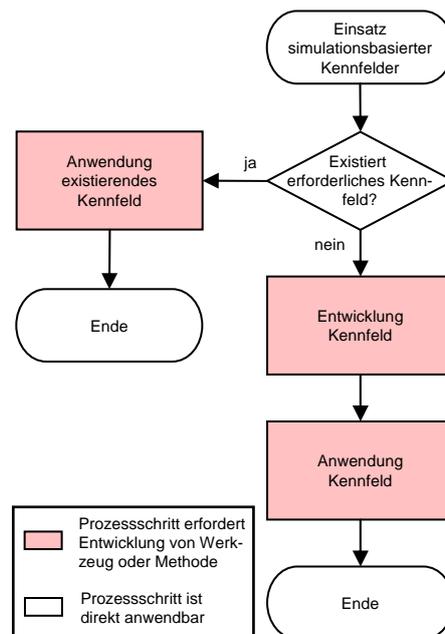


Abbildung 3-6: Flussdiagramm für den Einsatz simulationsbasierter Kennfelder

In Kapitel 5 werden der Ansatz simulationsbasierter Kennfelder, eine Methodik zu deren Erzeugung und die Anwendung simulationsbasierter Kennfelder vorgestellt.

3.3 Zusammenfassung und Fazit

Analyseprobleme unterscheiden sich durch den für die Modellerstellung erforderlichen Detaillierungsgrad und die zu beobachtende Untersuchungshäufigkeit der zugrunde liegenden Fragestellung. Daraus wird das Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio entwickelt, welches die Zuordnung geeigneter Analysemethoden entsprechend dieser Kriterien vornimmt. Abbildung 3-7 zeigt das in Kapitel 1 vorgestellte Spannungsfeld unter Berücksichtigung dieser Analysemethoden.

Das Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio ist Basis für die Entwicklung der Heuristik zur Auswahl zielführender Methoden für die Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen. Den Kern der Heuristik bildet das in Abbildung 3-8 dargestellte

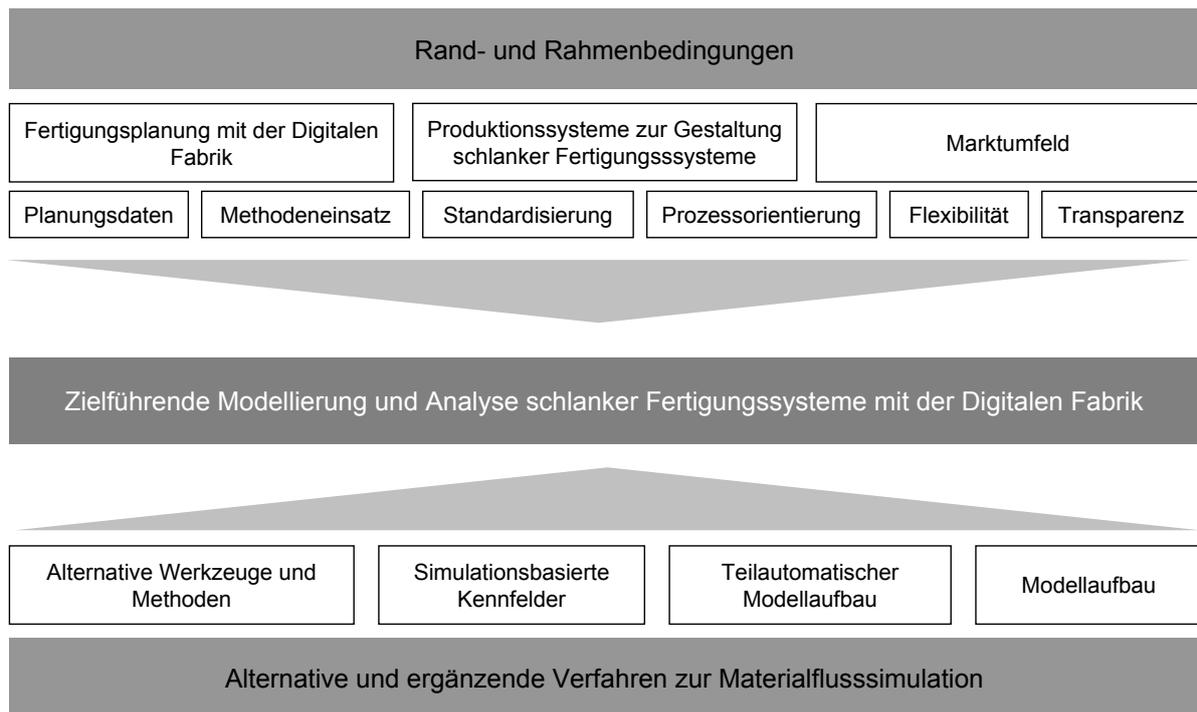


Abbildung 3-7: Spannungsfeld unter Berücksichtigung einer geeigneten Klassifizierung der Analyseprobleme

Flussdiagramm, welches das Vorgehen der vorgestellten Ansätze des Portfolios detailliert beschreibt und zusammenfasst. In diesem Flussdiagramm sind fehlende Methoden und Werkzeuge hervorgehoben. Wie in Kapitel 1 verdeutlicht, liegt der wesentliche Anspruch dieser Arbeit darin, die Entscheidungsfindung durch die dargestellte Heuristik zu unterstützen sowie die fehlenden Methoden und Werkzeuge zu entwickeln.

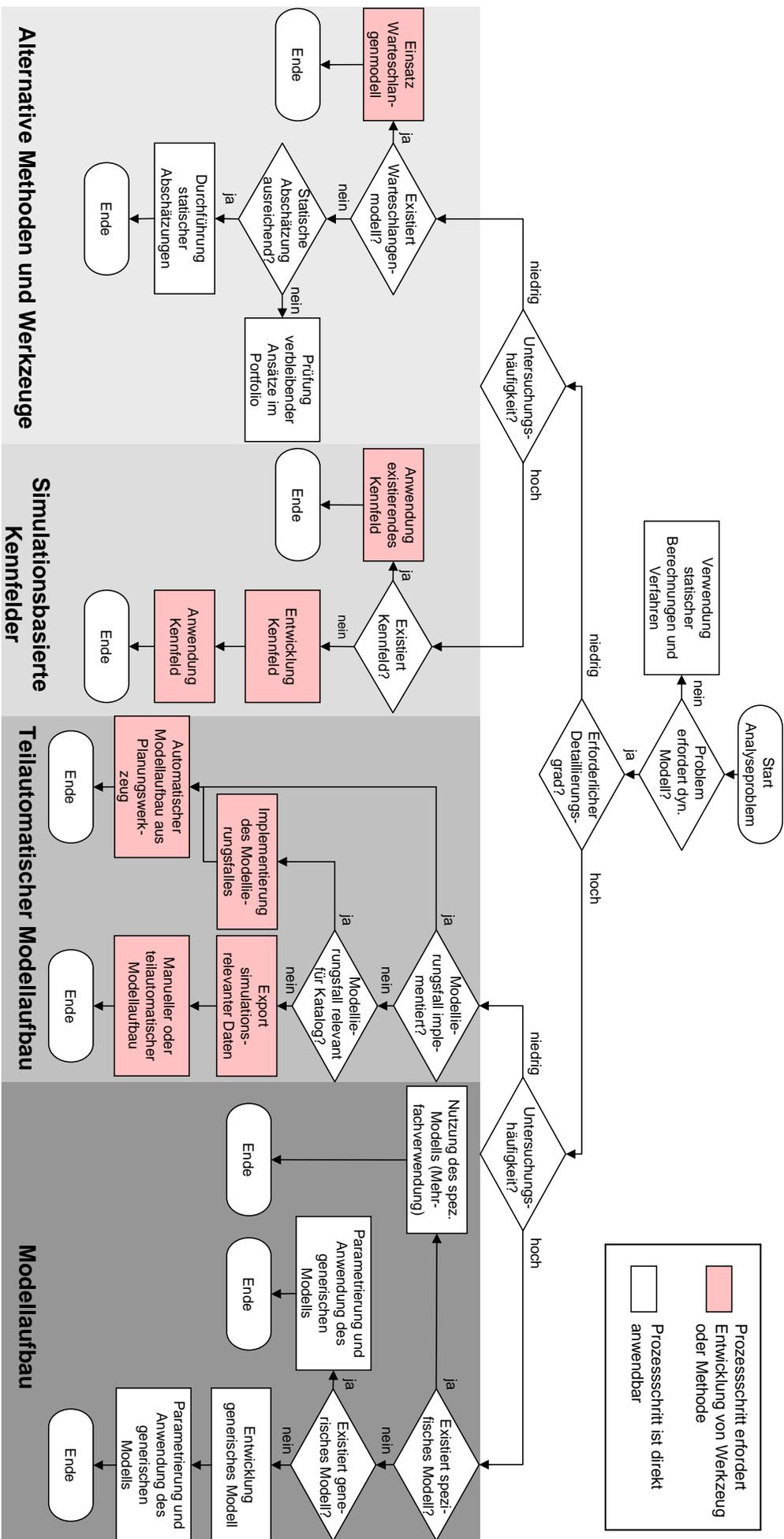


Abbildung 3-8: Heuristik zur Auswahl zielführender Methoden für die Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen

4 Alternative Methoden und Werkzeuge

4.1 Einführung

Das in Abschnitt 3.2 eingeführte Untersuchungshäufigkeit-Detaillierungsgrad-Portfolio verlangt den Einsatz von zur Simulation alternativen Werkzeugen und Methoden bei geringer Untersuchungshäufigkeit und gleichzeitig geringem Detaillierungsgrad der zugrunde liegenden Fragestellung. Zu alternativen Werkzeugen und Methoden zählen:

- Statische Abschätzungen
- Warteschlangenmodelle

Die Dynamik und Stochastik von Fertigungssystemen verursacht Ausbringungsverluste. Diese können unter Verwendung statischer Abschätzungen nur sehr grob unter Anwendung von pauschalen Zuschlägen berücksichtigt werden. Statische Abschätzungen beinhalten deshalb immer deutliche Unschärfen.

Warteschlangenmodelle, die auch als warteschlangenbasierte Verfahren bezeichnet werden, stellen hier eine erheblich verbesserte Modellierungs- und Analysemethode dar. Jedoch kann die Abbildungsgüte von Simulationsmodellen, d.h. deren Flexibilitäts- und Detaillierungsgrad, mit Warteschlangenmodellen nicht erreicht werden. In Abbildung 4-1 wird der Zeitaufwand und die Abbildungsgüte von statischen Abschätzungen, Warteschlangenmodellen und Simulationsmodellen gegenüber gestellt. Eine Erhöhung der Abbildungsgüte von statischen Abschätzungen über Warteschlangenmodelle zu Simulationsmodellen bringt demnach auch einen erhöhten Zeit- und damit Kostenaufwand mit sich. Deshalb ist eine zielgerichtete Anwendung der Methoden zwingend notwendig.

Die erforderlichen Grundlagen der sehr komplexen Modellierung mit Warteschlangenmodellen sind in Abschnitt 2.3.2 ausführlich dargelegt. Dabei wird deutlich, dass Warteschlangenmodelle lediglich für bestimmte Fertigungssystemstrukturen einsetzbar sind (vgl. Abbildung 2-16).

In der industriellen Praxis haben sich Warteschlangenmodelle bislang kaum durchgesetzt, selbst wenn die Voraussetzungen für deren Einsatz erfüllt sind. Ein wichtiger Grund hierfür ist ein mangelndes Modellverständnis seitens der Anwender, die sich kaum mit dem

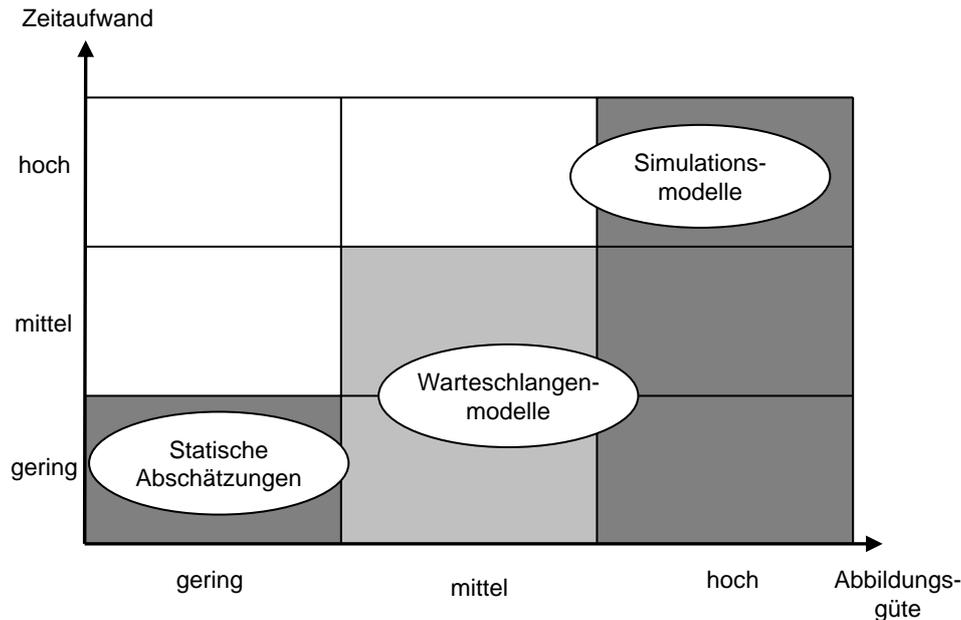


Abbildung 4-1: Gegenüberstellung von Zeitaufwand und Abbildungsgüte von statischen Abschätzungen, Warteschlangenmodellen und Simulationsmodellen. Darstellung nach [ArRa99].

mathematischen Unterbau befassen [Hege03]. Es ist deshalb notwendig, dass die beschriebenen komplexen Vorgänge, die zur Modellierung und Analyse mit warteschlangenbasierten Verfahren erforderlich sind, in einem einfach zu bedienenden Softwarewerkzeug zur Verfügung stehen. Das Programm *FlowEval* erfüllt diese Voraussetzungen und findet in der Industrie bereits Anwendung [Spie02, Bier03, TeSS06]. Die in diesem Werkzeug implementierten Algorithmen sind in [Temp03] ausführlich beschrieben. Das Werkzeug wird für die in dieser Arbeit durchgeführte Modellierung und Analyse mit warteschlangenbasierten Verfahren angewandt.

4.2 Verifikation und Validierung von Warteschlangenmodellen

Voraussetzung für den Einsatz von Warteschlangenmodellen als Alternative oder Ergänzung zur Simulation ist eine gute Qualität der mit Warteschlangenmodellen erzielten Ergebnisse. Zur Verifikation und Validierung des im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Werkzeugs wird ein umfassender Vergleich der Ergebnisse mit dem Simulationswerkzeug *Plant Simulation* der Firma UGS vorgenommen.

Die Struktur der hierfür eingesetzten Modelle wird in Abbildung 2-16a verdeutlicht. Sie setzt sich aus einer linearen Verkettung von Stationen und Puffern zusammen. Eingangsgrößen der Stationen sind Bearbeitungszeiten, mittlere störungsfreie Laufzeiten *MTBF*

sowie mittlere Stördauern $MTTR$. Darüber hinaus kann der Variationskoeffizient VK angegeben werden, der die Variation der Bearbeitungszeiten beschreibt. Er wird durch

$$VK = \frac{\sigma}{m} \quad (4.1)$$

definiert, wobei σ die Standardabweichung der Bearbeitungszeit an der betrachteten Station darstellt, m deren Mittelwert. Mit dem Variationskoeffizienten und dem Mittelwert der Bearbeitungszeiten wird die Gammafunktion parametrisiert. In *FlowEval* wird diese Funktion verwendet, da sie die Approximation zahlreicher Dichtefunktionen ermöglicht. Die Gammafunktion ist in Anhang A.2 ausführlich beschrieben. Variationen der Bearbeitungszeit sind insbesondere für manuelle Arbeitsplätze zu erwarten. Darüber hinaus können Größe oder obere und untere Grenzen der Puffer angegeben werden.

Es werden zwei Modelle für die Verifikation und Validierung aufgebaut. *Modell 1* wird dazu verwendet, das Verhalten des Warteschlangenmodells bei variierender Puffergröße und Störcharakteristik der Stationen zu untersuchen. Die Puffergrößen werden in Abhängigkeit der mittleren Stördauern durch den Zusammenhang

$$\text{Puffer} = \frac{f \cdot MTTR}{\text{Anzahl Stationen}} \quad (4.2)$$

festgelegt um den Einfluss variierender Puffergrößen bei sonst gleichen Systemparametern zu bestimmen. Darin wird der Faktor f im Intervall $f = [0, 25 \dots 3]$ variiert. Daraus ergeben sich die in Tabelle 4-1 zusammengefassten Experimente.

Experiment	Stördaten	Pufferplätze nach jeder Station (Anzahl Teile)				
1	MTTR=60s MTBF=3600s	2	3	6	12	18
2	MTTR=120s MTBF=7200s	3	6	12	24	36
3	MTTR=240s MTBF=14400s	6	12	24	48	72

Tabelle 4-1: Zusammenfassung der mit Modell 1 durchgeführten Experimente

Modell 2 wird dazu verwendet, das Verhalten eines Warteschlangenmodells bei einem Verfügbarkeitsengpass zu untersuchen. Hierfür wird eine Station mit einer geringeren Bearbeitungszeit, dafür aber mit einer ungünstigeren Störcharakteristik vorgesehen. Die wesentlichen Eigenschaften der beiden für die Verifikation und Validierung verwendeten Modelle sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

	Modell 1	Modell 2
Fertigungssystemstruktur	linear	linear
Untersuchungsaspekte	<ul style="list-style-type: none"> • Puffergröße • Störcharakteristiken 	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeitsengpass mit reduzierter Bearbeitungszeit
Modelldetails	<p>Anzahl Stationen: 10 Engpassbearbeitungszeit: 10s Durchschnittl. Stationsbearbeitungszeit: 10s</p>	<p>Anzahl Stationen: 10 Engpassbearbeitungszeit: 9,5s Durchschnittl. Stationsbearbeitungszeit: < 10s Störcharakteristik: variabel Puffergröße: abhängig von Bearbeitungszeit und Störcharakteristik</p>

Tabelle 4-2: Zusammenfassung der für die Verifikation und Validierung verwendeten Modelle

Das Ergebnis der mit Modell 1 durchgeführten Experimente ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Auf der Ordinate ist der Quotient aus tatsächlich erreichter Taktzeit und theoretisch möglicher Taktzeit aufgetragen. Bei allen Experimenten liegt die Differenz zwischen den Simulationsergebnissen und den mit Warteschlangenmodellen erzielten Ergebnissen unter einem Prozent.

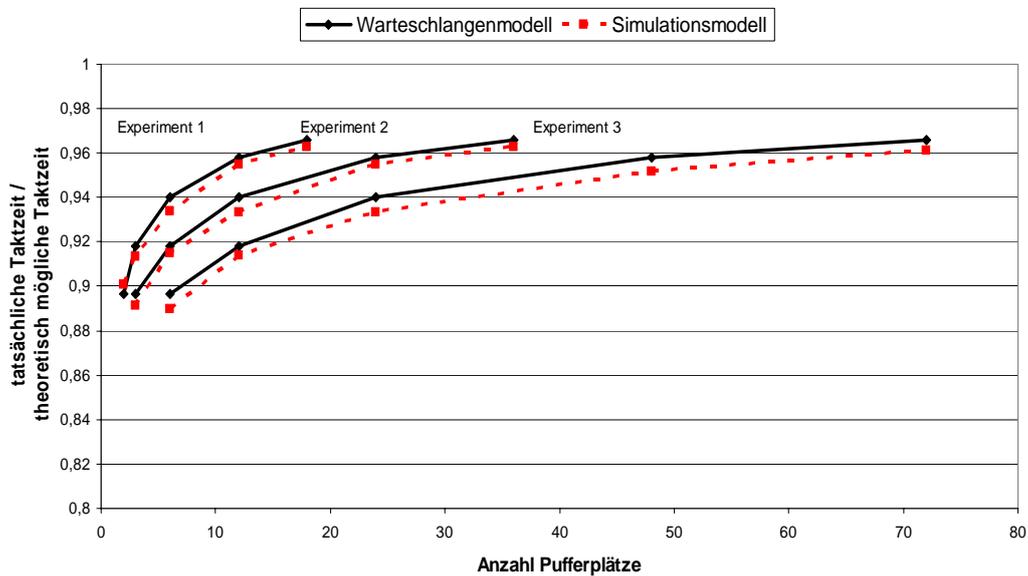


Abbildung 4-2: Ergebnisvergleich für Modell 1

Dieses Ergebnis bestätigt sich bei den mit Modell 2 durchgeführten Experimenten. Auch die Verwendung unterschiedlicher Variationskoeffizienten hat keinen negativen Einfluss auf die Ergebnisqualität.

In [ScHR02] wird ein Vergleich von Warteschlangenmodellen und Simulationsmodellen durchgeführt. Auch bei diesem Vergleich wird an einem konkreten Fall eine sehr gute Qualität der Ergebnisse der Warteschlangenmodelle nachgewiesen. Weitere umfassende Untersuchungen zu diesem Thema sind in [Temp03] verfügbar.

Verifikation und Validierung zeigen, dass sich Warteschlangenmodelle hervorragend dafür eignen, Simulationsmodelle zu ersetzen oder zu ergänzen. Voraussetzung hierfür ist lediglich, dass die beschriebenen einschränkenden Voraussetzungen an die Fertigungssystemstruktur erfüllt sind.

4.3 Optimierung mittels Warteschlangenmodellen

Abschnitt 2.3.1 geht auf die Zielsetzung von Analyseprozessen ein. Dabei wird zwischen der Optimierung und der Szenarioanalyse unterschieden. Es wird dargelegt, welche Probleme die Anwendung von Optimierungsverfahren, insbesondere unter Verwendung der Simulation als Modellierungs- und Analysewerkzeug, verhindern.

Die schnelle Analyse von Warteschlangenmodellen ermöglicht den Einsatz von Optimierungsalgorithmen. Typische Ziele der Optimierung mittels Warteschlangenmodellen sind:

- Die Minimierung der im System erforderlichen Puffer bei festgelegter Ausbringung.
- Die optimale Allokation der im System maximal zulässigen Pufferkapazität.

Auf das im vorangehenden Abschnitt für die Verifikation und Validierung verwendete Modell 2 werden diese Optimierungsalgorithmen angewandt. Abbildung 4-3 zeigt das Ergebnis beider Optimierungsalgorithmen im Vergleich zur Gleichverteilung der Puffer.

In der Praxis ist das Optimum im mathematischen Sinne aufgrund unscharfer Eingangsdaten weniger relevant. Die Optimierungsfunktionalität ermöglicht jedoch die frühzeitige Identifikation von Systemengpässen und liefert Ansatzpunkte zu deren Behebung. Das Potenzial durch Änderung von Stationskenngrößen wie Bearbeitungszeit, Störzeit oder Störabstand, welches durch alternative Maschinen und Anlagen oder organisatorische Änderungen umsetzbar ist, kann schnell auf Fertigungssystemebene bewertet werden.

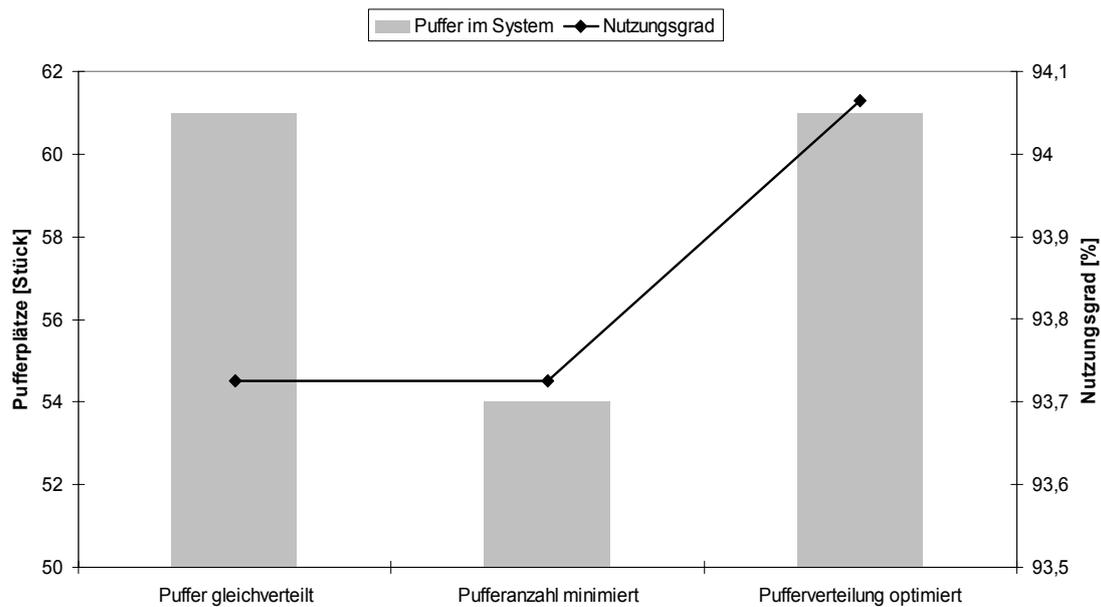


Abbildung 4-3: Ergebnis der möglichen Optimierungszielsetzungen im Vergleich zur Puffergleichverteilung

4.4 Einsatzgebiete von Warteschlangenmodellen

4.4.1 Workshop-begleitender Einsatz von Warteschlangenmodellen

Die hohe Komplexität heutiger Produkte erfordert die Einbindung aller am Produktentstehungsprozess beteiligten Mitarbeiter. Aus diesem Grund gibt es eine Reihe von interdisziplinären Planungsworkshops, an denen, abhängig von der konkreten Planungsmethode und Zielsetzung, Verantwortliche aus Entwicklung, Fertigung sowie aus Einkauf und Vertrieb teilnehmen. Diese Workshops sind im Planungsleitfaden der Produktionssysteme zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme in einer zeitlichen Abfolge festgelegt (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Für die effektive und effiziente Gestaltung von Arbeitsplätzen, sowie die Aufteilung von Arbeitsinhalten auf die Mitarbeiter bei Mehrmaschinenbedienung, wird der Workshop *Physische Simulation* als integraler Bestandteil des Planungsleitfadens durchgeführt. In Abhängigkeit der zu fertigenden Produkte und der erforderlichen Produktvarianten kann die Berücksichtigung von dynamischen Zusammenhängen im Rahmen dieses Workshops zwingend erforderlich sein.

Sowohl die Modellierungsdauer, als auch die erforderliche Rechenzeit bei der Analyse schließen den Einsatz der Simulation im Rahmen des Workshops aus. Hingegen stel-

len warteschlangenbasierte Verfahren ein geeignetes Modellierungs- und Analysewerkzeug dar. Dies gilt insbesondere unter Berücksichtigung von Untersuchungshäufigkeit und Detaillierungsgrad der zugrunde liegenden Fragestellung. Im Folgenden wird der workshopbegleitende Einsatz von Warteschlangenmodellen am Beispiel der Komplettierung einer Kleinserie aufgezeigt.

Anwendungsbeispiel: Komplettierung einer Kleinserie

Eine Komplettierung zeichnet sich in der Regel durch eine enorme Variantenvielfalt bei gleichzeitig geringen Losgrößen aus. Diese Vielfalt erzeugt erhebliche Schwankungen der Bearbeitungszeiten an den Arbeitsplätzen. Im Rahmen des Workshops kann die durch Produktvarianten verursachte Dynamik bei der Aufteilung der Arbeitsinhalte mit statischen Verfahren nicht berücksichtigt werden.

Warteschlangenmodelle erlauben die Abbildung der Dynamik durch Anwendung des Variationskoeffizienten (Gleichung 4.1). Damit eignen sich Warteschlangenmodelle für die Abbildung des zu untersuchenden Fertigungssystems. Das im Workshop erstellte Layout, eine schematische Darstellung der Anordnung der Arbeitsplätze sowie die Mitarbeiter-Arbeitsplatzzuordnung werden in Abbildung 4-4 veranschaulicht.

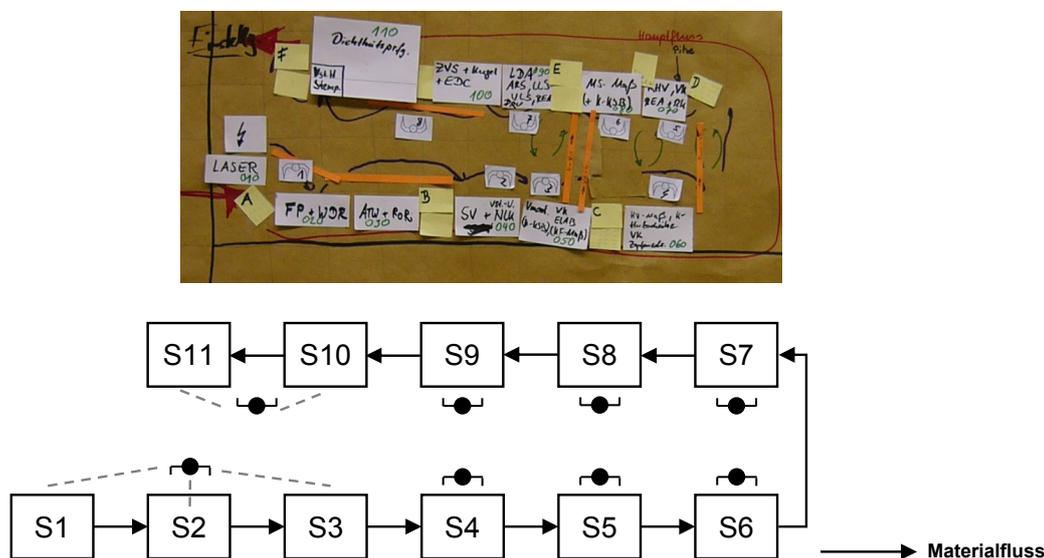


Abbildung 4-4: Im Workshop erarbeitetes Layout und schematische Darstellung der Arbeitsplätze. Die Zuordnung der Mitarbeiter zu den Arbeitsplätzen ist festgelegt.

Im ersten Schritt des Workshops wird die Auslastung der Mitarbeiter unter Berücksichtigung der Schwankung der Arbeitsinhalte untersucht. Es ergibt sich eine deutliche Überlastung des ersten Mitarbeiters. Durch Verlagerung von Arbeitsinhalten auf Mitarbeiter 2

kann Mitarbeiter 1 erheblich entlastet werden. Die Gesamtwartenzeiten im System werden dadurch deutlich gesenkt und Mitarbeiter 6 wird neuer Systemengpass. Abbildung 4-5 zeigt die Auslastung der Mitarbeiter nach der Verlagerung von Arbeitsinhalten von Mitarbeiter 1 auf Mitarbeiter 2. Die Stör-, Blockier-, Leer- und Arbeitsanteile der Mitarbeiter sind darin explizit dargestellt. Neben einer verbesserten Auslastung der Mitarbeiter und dem daraus resultierenden, verbesserten Mitarbeiterfluss kann der Linientakt um fast 4% verkürzt werden (Abbildung 4-6).

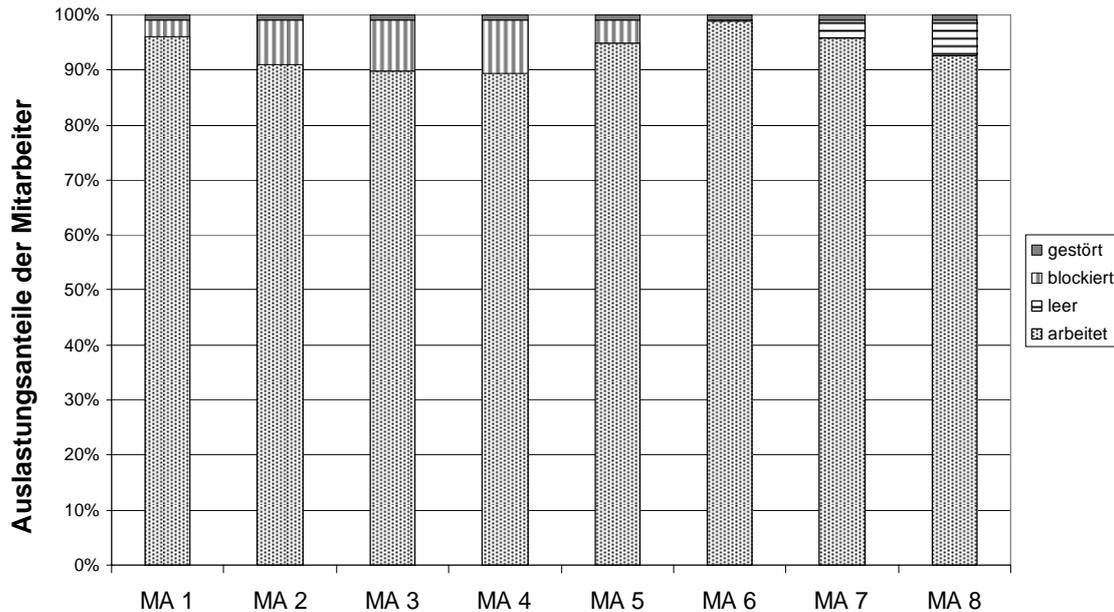


Abbildung 4-5: Mitarbeiterauslastung nach der Verlagerung von Arbeitsinhalten von Mitarbeiter 1 auf Mitarbeiter 2

4.4.2 Kombination von Simulations- und Warteschlangenmodellen

Die Restriktion auf bestimmte Fertigungssystemstrukturen bei der Modellierung mit Warteschlangenmodellen legt nahe, diese mit Simulationsmodellen zu kombinieren. Die jeweiligen Stärken der Modellierungs- und Analyseverfahren lassen sich so gezielt nutzen, wodurch Synergien erzeugt werden. Bei der Kombination von Simulations- und Warteschlangenmodellen werden zwei wesentliche Ansätze unterschieden:

- Einsatz von Warteschlangenmodellen in Grobplanungsphasen zur Einschränkung des Lösungsraumes von Simulationsuntersuchungen in der Feinplanung
- Einsatz von Warteschlangenmodellen zur Optimierung von Teilsystemen eines Gesamtsystems

Beide Ansätze werden im Folgenden näher beschrieben.

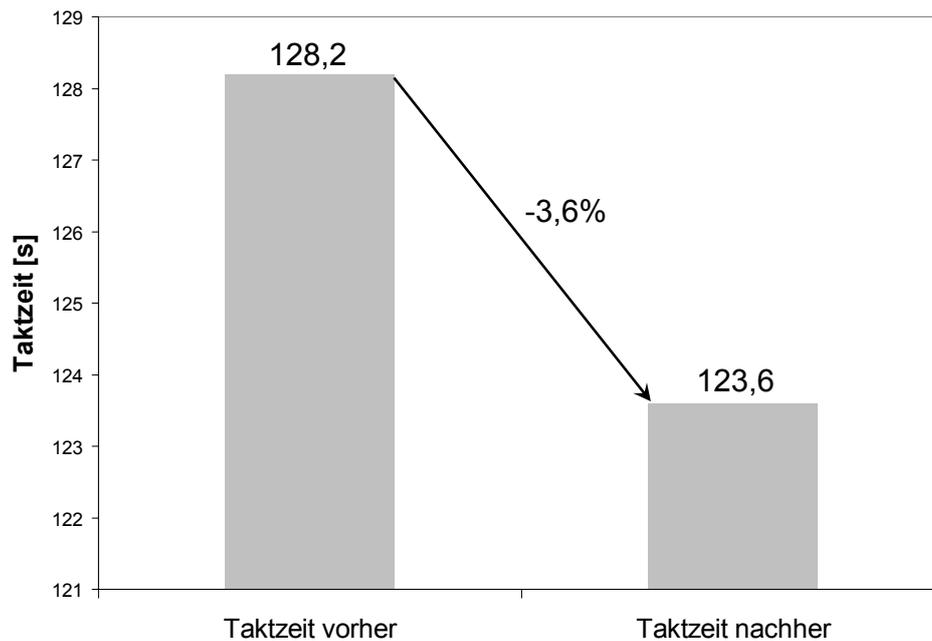


Abbildung 4-6: Taktzeitverkürzung durch Umverteilung der Arbeitsinhalte

Einsatz von Warteschlangenmodellen in Grobplanungsphasen zur Einschränkung des Lösungsraumes von Simulationsuntersuchungen in der Feinplanung

Grobplanungsphasen sind besonders geprägt durch Planungsunsicherheit, extrem hohe Variantenvielfalt und häufige Konzeptänderungen. Die kurze Rechenzeit für die Analyse einer Systemalternative mit Warteschlangenmodellen ermöglicht die Einschränkung der in späteren Phasen der detaillierten Feinplanung zu untersuchenden Systemalternativen. In der Feinplanung ist meist die Modellierung und Analyse mit Simulationsmodellen erforderlich.

Die Einschränkung des Lösungsraumes durch den Einsatz von Warteschlangenmodellen in der Grobplanungsphase führt zu einem deutlichen Qualitäts- und Zeitvorteil gegenüber herkömmlichen Planungsmethoden [ArRa99]. Eine detaillierte Beschreibung dieses Kombinationsansatzes ist in [Star91] verfügbar.

Einsatz von Warteschlangenmodellen zur Optimierung von Teilsystemen eines Gesamtsystems

Der hier verfolgte Ansatz zeigt, wie mit Warteschlangenmodellen, insbesondere mit deren Optimierungsfunktionalität, die Untersuchung von Teil- oder Subsystemen eines Fertigungssystems in der detaillierten Planung durchgeführt werden kann. Die Grundlagen

dieses Kombinationsansatzes sind in [BlFr06] verfügbar. Voraussetzung für die Anwendung dieses Ansatzes ist es, dass das Subsystem vom Gesamtsystem getrennt betrachtet werden kann (Abbildung 4-7).

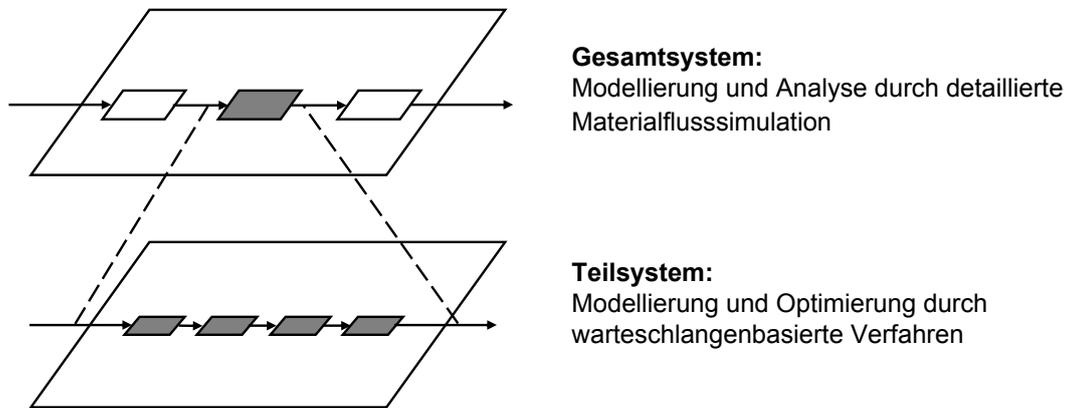


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung der Kombination von Warteschlangen- und Simulationsmodellen

Gesamt- und Teilsystem werden in Hierarchieebenen unterteilt, modelliert und analysiert. Die Möglichkeit der schnellen Analyse mittels Warteschlangenmodellen erlaubt die Optimierung des Subsystems ohne zusätzlichen Aufwand. Die Aufteilung von Simulationsmodellen in Hierarchieebenen wird in [CFHO00a, CFHO00b] vorgestellt. Im Unterschied zu dem in dieser Arbeit beschriebenen Vorgehen werden dabei unterschiedliche Simulationmethoden eingesetzt (vgl. Abbildung 2-19). So wird neben der Materialflusssimulation auf Linienebene beispielsweise auch das Ergebnis von Robotersimulationen in ein Gesamtsimulationsmodell integriert. Ein weiterer interessanter Ansatz hierarchisch strukturierter Modelle bestehend aus einem detaillierten Simulationsmodell und neuronalen Netzwerken ist in [BFOW00] verfügbar. Diese Ansätze werden im Folgenden jedoch nicht näher betrachtet.

Die hier vorgestellte Möglichkeit der Kombination von Warteschlangen- und Simulationsmodellen hat das Ziel, die Analyse eines Teilsystems mit Warteschlangenmodellen durchzuführen und die dabei gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse in das Simulationsmodell des Gesamtsystems zu integrieren. Dieser Ansatz hat gegenüber dem herkömmlichen Vorgehen, bei dem lediglich das Simulationsmodell des Gesamtsystems betrachtet wird, wesentliche Vorteile.

Durch die schnelle Berechnung eines Szenarios mit Warteschlangenmodellen und der integrierten Optimierungsfunktionalität kann der Lösungsraum bereits erheblich eingeschränkt werden. Dadurch wird die Anzahl an erforderlichen Experimenten unter Anwen-

derung des Gesamtsystems simulationsmodells deutlich reduziert, was zu Zeit- und Kosteneinsparungen bei gleichzeitig gesteigerter Planungsqualität führt.

Dieser Ansatz stellt keine Alternative zu einer reinen Simulationsuntersuchung dar, da die Vorteile der schnellen Szenarienberechnung und der Optimierung nur unter Einsatz von Warteschlangenmodellen genutzt werden können.

Tabelle 4-3 beinhaltet die Gegenüberstellung des herkömmlichen Ansatzes der Gesamtsystems simulation und der Hierarchisierung des Gesamtsystems unter Anwendung von Warteschlangen- und Simulationsmodellen.

Herkömmlicher Ansatz (Einsatz Gesamtsimulationsmodell)	Hierarchisierung des Gesamtsystems unter Anwendung von Warteschlangen- und Simulationsmodellen
Abschätzung der Puffergrößen	Optimierung / Eingrenzung der Spannbreite der Puffergrößen
Hohe Experimentanzahl mit dem Gesamtsimulationsmodell (Trial&Error)	Geringe Experimentanzahl mit dem Gesamtsimulationsmodell (Einschränkung des Suchraumes)
zeit- und kostenintensiv	zeit- und kostensparend
Möglichkeit qualitativ schlechter Lösungen	Hohe Planungsqualität durch optimierte Lösungen

Tabelle 4-3: Gegenüberstellung des herkömmlichen Ansatzes und der Hierarchisierung des Gesamtsystems unter Anwendung von Warteschlangen- und Simulationsmodellen

Im Folgenden wird der vorgestellte Ansatz anhand eines Anwendungsbeispiels konkretisiert.

Anwendungsbeispiel: Endmontage in der Konsumgüterindustrie

Die Endmontage ist ein zentraler Bestandteil jeder Fertigung. Sie stellt die Schnittstelle zum Kunden dar und ist Schrittmacher für alle vorgelagerten Prozesse der Teilefertigung oder Baugruppenmontage. Die Komplexität von Montageanlagen, sowie deren oft benötigte hohe Flexibilität in Bezug auf Stückzahlen und Produktvarianten machen die Erhöhung der Planungsqualität besonders wichtig.

Bei dem hier vorgestellten Anwendungsbeispiel handelt es sich um eine Endmontagelinie der Konsumgüterindustrie. Aufgrund einer äußerst variantenreichen Serienproduktion mit

kleinen Losen ist die betrachtete Montagelinie gering automatisiert. Eine Automatisierung ist lediglich für einzelne Montageschritte und Prüfprozesse realisiert. Abbildung 4-8 zeigt einen Ausschnitt der Montagelinie im Gesamtsimulationsmodell.

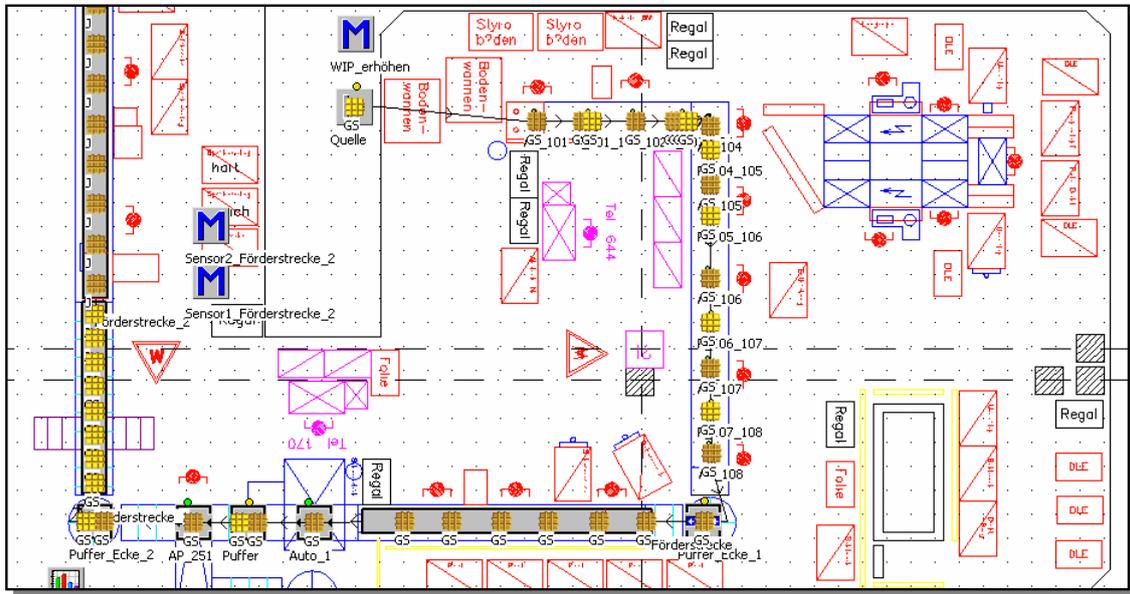


Abbildung 4-8: Ausschnitt des Gesamtsimulationsmodells

Im Fokus der Simulationsuntersuchung steht das Linienverhalten bei einer geplanten Ausbringungserhöhung. Es sollen Lösungsansätze zur Beseitigung von dabei auftretenden Engpässen erarbeitet und analysiert werden.

Charakteristisch für die betrachtete Montagelinie sind mehrere Bereiche, in denen Mitarbeiter am auf nicht-staufähigen Gurtbändern fahrenden Bauteil Montagetätigkeiten durchführen. Bis zu fünf Arbeitsplätze werden durch serielle Anordnung starr verkettet, bevor eine Entkopplung über staufähige Rollenbänder erfolgt (Abbildung 4-9a).

Dieses Transportsystem hat den Vorteil geringer Kosten und weist eine erhöhte Flexibilität auf, da ausreichend Bandstrecke vorhanden ist und weitere Arbeitsplätze eingerichtet werden können. Nicht genutzte Bandstrecke erhöht allerdings die Durchlaufzeit. Die starre Verkettung der Arbeitsplätze hat zur Folge, dass durch technische Störungen an einem Arbeitsplatz (beispielsweise defekte Werkzeuge) oder Organisationsmängel (beispielsweise fehlende Bauteile) die Arbeit an allen Arbeitsplätzen des betroffenen Bereiches eingestellt werden muss. Daraus resultieren insgesamt sehr hohe Ausfallzeiten.

Ziel der Simulationsuntersuchung ist deshalb auch die Identifikation von Verbesserungspotenzialen durch Substitution der Gurtbänder mit Arbeitsplätzen, die durch Puffer elastisch entkoppelt sind. Die Entkopplung wird mit staufähigen Rollenbändern realisiert (vgl. Abbildung 4-9b).

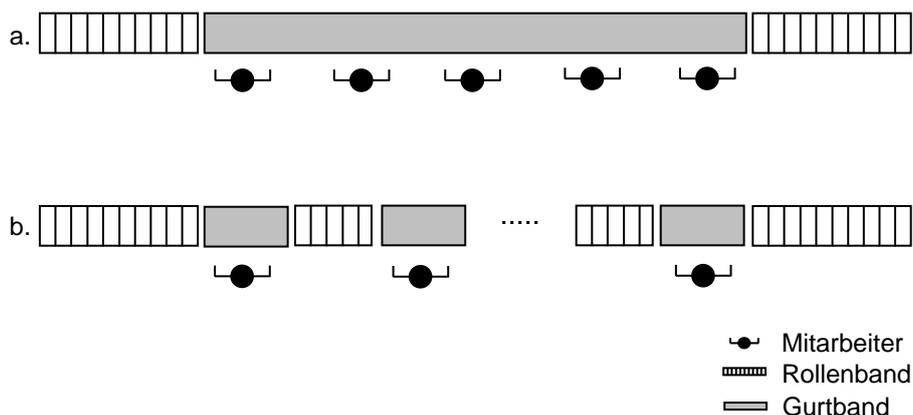


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung eines Teilbereichs der Montagelinie (a) sowie der untersuchten Alternative (b)

Für die Modellierung und Analyse mit warteschlangenbasierten Verfahren werden zunächst die Eingangsdaten aufbereitet. Zur Bestimmung der Bearbeitungszeiten der Arbeitsplätze wird ein entsprechend dem Variantenanteil gewichteter Mittelwert berechnet. Bei starken Schwankungen der Bearbeitungszeiten der Varianten an den Arbeitsplätzen empfiehlt sich deren Berücksichtigung in Form des Variationskoeffizienten (Gleichung 4.1).

Im betrachteten Beispiel unterliegen die Bearbeitungszeiten unterschiedlicher Produktvarianten nur geringfügigen Schwankungen. Deshalb wird die Schwankung der Bearbeitungszeiten nicht explizit berücksichtigt. Jedoch wird der Variationskoeffizient zur Abbildung der Schwankungen der Bearbeitungszeiten durch den Mitarbeiter verwendet. Diese liegen deutlich über den Schwankungen der Bearbeitungszeiten der Produktvarianten. Neben der Bearbeitungszeit und dem Variationskoeffizienten erfolgt die Angabe der Störcharakteristik der Arbeitsplätze.

Die Pufferdimensionierung wird ausschließlich mit dem Warteschlangenmodell durchgeführt und kann mit diesem optimiert werden. Das Ergebnis wird in das Gesamtsimulationssystem integriert. Dieses wird dann für weitere Untersuchungen verwendet, welche das Gesamtsystem betreffen.

Durch die hier dargestellte Kombination von Simulations- und Warteschlangenmodellen können im beschriebenen Beispiel Verbesserungspotenziale bezüglich der betrachteten Leistungsgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Ausbringung aufgezeigt werden. Im Beispiel wird durch optimierte Pufferdimensionierung in den Teilsystemen unter Anwendung des Warteschlangenmodells ein Potenzial für eine Ausbringungssteigerung von 8% ermittelt. Der Bestand im betrachteten Teilsystem kann um rund 75% gesenkt werden, die Durchlaufzeit kann sogar um 80% verkürzt werden (Abbildung 4-10). Durch Substitution der Gurtbänder lässt sich zusätzlich die erforderliche Fläche minimieren.

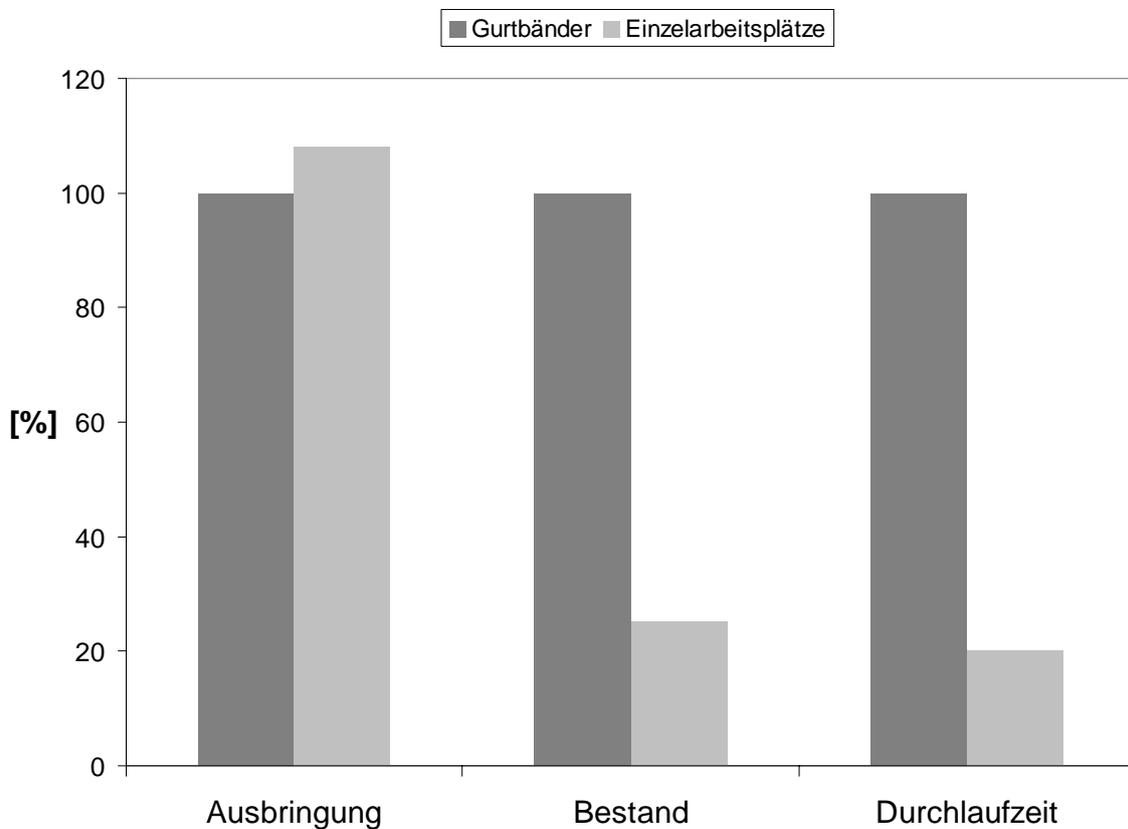


Abbildung 4-10: Verbesserungspotenziale von Ausbringung, Bestand und Durchlaufzeit

Die mit diesem Ansatz erzielbaren Verbesserungspotenziale sind von den spezifischen Bearbeitungszeiten, der Anzahl an Arbeitsplätzen und deren Störcharakteristiken abhängig.

Das Anwendungsbeispiel zeigt, dass das Fertigungssystem durch diesen Kombinationsansatz in Bezug auf wesentliche Leistungsgrößen deutlich verbessert werden kann.

4.5 Zusammenfassung und Fazit

Mit Warteschlangenmodellen lassen sich Fragestellungen geringer Untersuchungshäufigkeit bei gleichzeitig geringen Anforderungen hinsichtlich des Detaillierungsgrades der Modellierung schnell und aufwandsarm beantworten. Die Abbildungsgüte liegt dabei deutlich über der statischer Abschätzungen.

Sind die einschränkenden Voraussetzungen hinsichtlich der betrachteten Fertigungssystemstruktur erfüllt, bieten Warteschlangenmodelle eine mit Simulationsmodellen übereinstimmende Ergebnisqualität. Da die Auswertung eines Warteschlangenmodells in Sekundenbruchteilen durchgeführt werden kann, ist auch die Anwendung von Optimierungsalgorithmen möglich.

Warteschlangenmodelle können in verschiedenen Einsatzgebieten angewandt werden. In diesem Kapitel ist der Einsatz von Warteschlangenmodellen in der kooperativen Fertigungsplanung im Rahmen eines Workshops dargestellt. Außerdem wird ein neuartiger Ansatz für die Kombination von Simulations- und Warteschlangenmodellen in der Fertigungsplanung aufgezeigt. Dieser ermöglicht die Modellierung und Analyse eines Teilsystems mit Warteschlangenmodellen und die Integration der Ergebnisse in einem Gesamtsimulationsmodell. Dadurch können Warteschlangenmodelle erstmalig in der Feinplanung eingesetzt und die Vorteile von Simulations- und Warteschlangenmodellen kombiniert werden. Ausgewählte Anwendungsbeispiele konkretisieren die vorgestellten Einsatzgebiete der Warteschlangenmodelle.

5 Simulationsbasierte Kennfelder

5.1 Einführung

Simulationsbasierte Kennfelder ermöglichen, wie in Kapitel 3 diskutiert, bei hohen Untersuchungshäufigkeiten und geringem Detaillierungsgrad der zugrunde liegenden Fragestellung eine schnelle und aufwandsarme Untersuchung. Dabei werden die durch Simulationsstudien gewonnenen Erkenntnisse in simulationsbasierten Kennfeldern festgehalten, was eine Beschränkung auf die leistungsbestimmenden Ursache-Wirkzusammenhänge erforderlich macht.

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen von Kennlinien und Kennfeldern vorgestellt. Daraufhin folgt die Darstellung des heutigen Einsatzes von Kennlinien und Kennfeldern in der Fabrik- und Fertigungsplanung. Anschließend werden die Motivation und die Voraussetzungen für den Einsatz simulationsbasierter Kennfelder diskutiert. Zur Reduktion des hohen Initialaufwandes bei der Erstellung simulationsbasierter Kennfelder wird eine methodische Vorgehensweise mit dem Ziel entwickelt, diesen Aufwand zu minimieren. Abschließend wird der Einsatz von simulationsbasierten Kennfeldern durch ausgewählte Beispiele der Planungspraxis verdeutlicht.

5.2 Grundlagen von Kennlinien und Kennfeldern

5.2.1 Kennzahlen und Kennwerte

Für die Erzeugung von Kennfeldern ist die Entwicklung und Anwendung von Kennzahlen entscheidend. Als Kennzahlen werden nach der Definition in [SGHT85] Zahlen verstanden, die in Bezug auf das Erkenntnisziel relevant sind und damit im Vergleich zu anderen Zahlen einen besonderen Aussagewert haben, unabhängig von ihrer quantitativen Struktur, d.h. unabhängig davon, ob es sich um Absolutzahlen oder Relativ- bzw. Verhältniszahlen handelt. Verhältniszahlen werden in Gliederungszahlen, Beziehungszahlen und Mess- und Indexzahlen unterschieden:

- **Gliederungszahlen** entstehen durch Inbeziehungsetzen von Teilmassen zu den Gesamtmassen, d.h. die Massen sind gleichartig, stehen aber in einem Unterordnungsverhältnis zueinander. Zeitpunkt bzw. -raum der Erhebung müssen identisch sein. Gliederungszahlen stellen eine einfache Vergleichbarkeit sicher.

- Durch **Beziehungszahlen** wird das Verhältnis verschiedenartiger, gleichrangiger, zum gleichen Zeitpunkt bzw. -raum erhobener Massen ausgedrückt. Durch Beziehungszahlen können Einflussgrößen aggregiert und zusätzlich Zusammenhänge in einem Kennfeld dargestellt werden.
- **Mess- und Indexzahlen** drücken die durchschnittliche zeitliche Veränderung (unterschiedliche Erhebungszeitpunkte bzw. -räume) gleichartiger und gleichrangiger Massen aus.

Den Wert, den eine Kennzahl annimmt, heißt Kennwert. Die Entwicklung und Festlegung von Kennzahlen ist für eine breite Einsetzbarkeit von Kennfeldern entscheidend.

Nach Festlegung von relevanten Kennzahlen müssen Beziehungen zwischen diesen entwickelt und in grafischer Form durch Kennfelder dargestellt werden. Vor der Verwendung einer solchen Darstellung steht die Frage, ob die Wahl der Kennzahlen in der grafischen Darstellung den gewünschten Aussagewert liefert. Hierfür ist die Unterscheidung in Steuerkennzahlen und abhängige Kennzahlen erforderlich:

- Eine **Steuerkennzahl** ist eine Kennzahl, die unter Berücksichtigung der Verwendung des Kennfeldes relativ einfach zu verändern ist. Steuerkennzahlen sind Handlungsfaktoren, die durch bestimmte Massnahmen verändert werden können.
- Eine **abhängige Kennzahl** ist eine Kennzahl, die bezüglich einer Steuerkennzahl eine reproduzierbare Abhängigkeit zeigt. Abhängige Kennzahlen sind Einflussfaktoren, auf die kein oder nur geringer Einfluss ausgeübt werden kann.

Im Folgenden werden Kennzahlen allgemeiner auch als *Parameter* bezeichnet.

5.2.2 Darstellungsformen für Kennlinien und Kennfelder

In Anlehnung an die Definition von Walenda [Wale91] wird eine Kennlinie folgendermaßen definiert: Eine Kennlinie ist eine grafische Darstellung $y = f(x)$ von Kennwerten einer stetigen abhängigen Kennzahl y von einer stetigen oder in kleinen Schritten diskreten Steuerkennzahl x . Dabei sind die anderen unabhängig beeinflussbaren Steuerkennzahlen jeweils konstant zu halten. Kennlinien können für die Gewinnung von Näherungsgleichungen verwendet werden. In [AnMo69, Lent77] wird ein solches Verfahren zur Nutzungsgradberechnung von Linien diskutiert.

Da Kennlinien sowohl aufgrund gemessener Kennwerte als auch durch theoretische Überlegungen entstehen können, ergeben sich unterschiedliche Zielsetzungen für die Wahl einer Kennlinie als grafisches Hilfsmittel.

Nach Walenda [Wale91] wird sie verwendet, um

- komplexe theoretische Zusammenhänge anschaulich darzustellen,
- Trends aufzuzeigen anhand einer speziellen Kennlinie mit Beispielcharakter und
- experimentell ermittelte Zusammenhänge anschaulich darzustellen und theoretische Zusammenhänge abzuleiten.

Mit *Kennfeld* wird im Rahmen dieser Arbeit jede Kennliniendarstellung bezeichnet, die über die genannte Definition einer Kennlinie hinausgeht. Dazu zählen die in Abbildung 5-1 dargestellten

- Kennlinienscharen,
- Kennlinien mit Kennzahlscharen und
- Kennflächen.

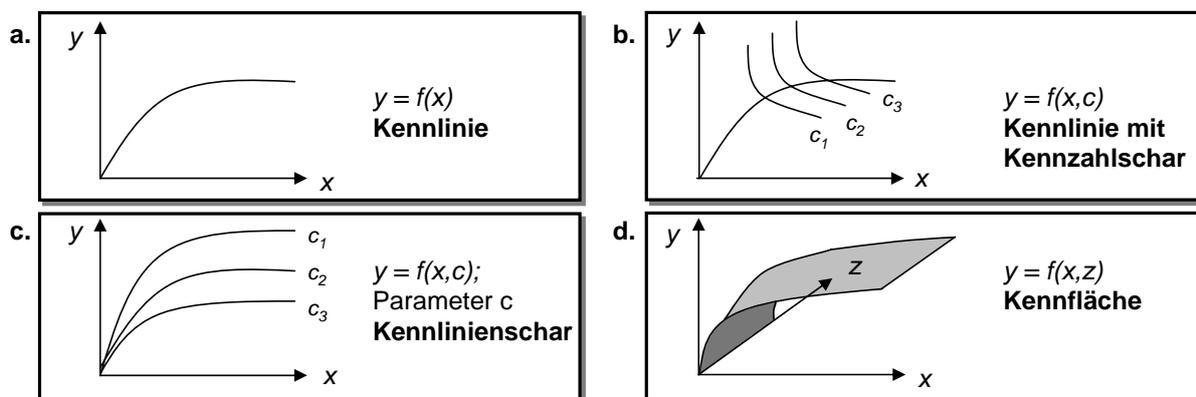


Abbildung 5-1: Mögliche Darstellungsformen für Kennlinien und Kennfelder

Abbildung 5-1a. stellt eine Kennlinie dar. Mit dieser wird der Zusammenhang zwischen der abhängigen Kennzahl y und der Steuerkennzahl x veranschaulicht. Eine Kennlinie ermöglicht die Darstellung des Haupteinflusses der Steuerkennzahl x auf die abhängige Kennzahl y .

Der in Abbildung 5-1b. dargestellte Graph zeigt den Einfluss eines zusätzlichen Parameters c auf die abhängige Kennzahl. Die in diesem Kennfeld verwendeten Kennzahlen y , x und c sind direkt voneinander abhängig.

Im Unterschied zum in Abbildung 5-1b. dargestellten Kennfeld wird der Parameter c in Abbildung 5-1c. für die einzelnen Kennlinien der Schar konstant gehalten. Abbildung 5-1a. ist ein Spezialfall der Abbildung 5-1c., bei der nur eine Stufe von c verwendet wird.

Abbildung 5-1d. zeigt eine Kennfläche. Diese entsteht, wenn zwei Steuerkennzahlen x und z unabhängig voneinander und gleichzeitig verändert werden können. In diesem Fall ist es möglich, dass sowohl x als auch z kontinuierliche Steuerkennzahlen sind, während bei den zuvor betrachteten Graphen der Parameter c nur diskrete Werte annehmen kann. Der Vorteil der dreidimensionalen Darstellung liegt darin, dass der direkte Zusammenhang zwischen den drei Parametern x , y und z dargestellt werden kann. Jedoch sind durch die Abbildung der dreidimensionalen Kennfläche auf einer zweidimensionalen Fläche die darstellbaren Kennzahlvarianten durch den Betrachtungswinkel festgelegt. Außerdem können Kennwerte nicht mit hoher Genauigkeit abgelesen werden.

5.3 Kennfelder in der Fabrik- und Fertigungsplanung

Die Idee des Einsatzes von Kennlinien und Kennfeldern ist nicht neu, sondern in vielen, insbesondere naturwissenschaftlich und technisch orientierten Wissenschaftszweigen verbreitet. Beispiele sind Transistorkennfelder in der Elektro- und Halbleitertechnik und Materialkennfelder in den Werkstoffwissenschaften. Diese bieten sich immer dann an, wenn die mehrmalige Versuchsdurchführung aufgrund vergleichbarem oder gleichem Versuchsgegenstand nicht sinnvoll oder möglich ist.

In der Fabrik- und Fertigungsplanung werden Kennlinien bislang insbesondere in der Logistikplanung eingesetzt. Solche auch als *Produktionskennlinien* bezeichnete Kennlinien zeigen die Abhängigkeit ausgewählter abhängiger Kennzahlen von der Variation der Steuerkennzahlen. Abhängige Kennzahlen von Logistiksystemen sind beispielsweise Bestände, Durchlaufzeiten, Kapazitätsnutzungsgrade (Ressourcennutzung) und die Termintreue [Kuhn97]. Die Notwendigkeit eines Mindestbestandes zur Erreichung einer festgelegten Ausbringung wird in [RiGr90] diskutiert und durch Kennlinien dargestellt.

Besonders bekannt ist die auch als *Wiendahl'sche Kennlinientheorie* bezeichnete Kennlinientheorie. Die Wiendahl'schen Kennlinien umfassen Leistungs- und Zeitkennlinien (z.B. Durchlaufzeitkennlinien). Für die Bestimmung der Leistung wird hier durch Bildung einer Gliederungszahl die tatsächliche Ausbringung zur möglichen Ausbringung ins Verhältnis gesetzt.

Abbildung 5-2 zeigt die ideale Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinie. Auf der Abszisse ist der Bestand in *Stunden (Std)* aufgetragen. Die Ordinate zeigt den Verlauf der Durchlaufzeit in *Betriebskalendertagen (BKT)* sowie die Leistung des Systems in *Stunden/Betriebskalendertag (Std/BKT)*. Bei diesen idealisierten Kennlinien wird vorausgesetzt, dass sich immer ein Auftrag am System befindet und die Bearbeitung ohne weiteren Zeitverlust umgehend begonnen werden kann.

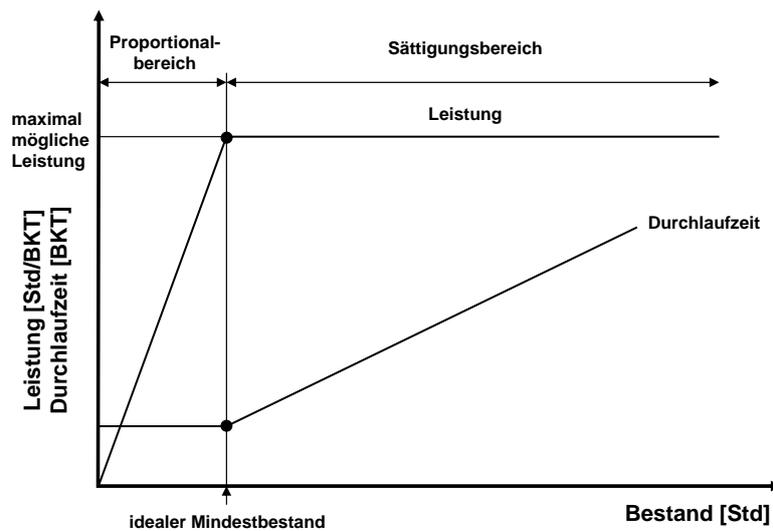


Abbildung 5-2: Ideale Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinie nach [NyWi03].

Abbildung 5-2 zeigt, dass eine Steigerung des Bestandes bis zur Erreichung eines Mindestbestandniveaus eine konstante Durchlaufzeit und eine Steigerung der Leistung zur Folge hat. Dieser Bereich wird als *Proportionalbereich* bezeichnet. Über diesen Mindestbestand hinaus hat eine weitere Steigerung des Bestandes eine Zunahme der Durchlaufzeit ohne weitere Steigerung der Leistung zur Folge (*Sättigungsbereich*). Da die bei der Ableitung der idealen Kennlinien zugrunde gelegten Voraussetzungen in der Praxis nicht gegeben sind, werden zur Erzeugung von Näherungsgleichungen zunächst Betriebspunkte mit Hilfe eines realitätsnahen Simulationsmodells erzeugt, was einen fließenden Übergang vom Proportionalbereich in den Sättigungsbereich und damit ein Verschwinden des definierten Abknickpunktes zur Folge hat. Die Leistungskennlinie kann dann durch eine mathematische Funktion angenähert werden, welche durch entsprechende Parametrierung auf ein spezifisches System angepasst werden kann. Die Herleitung und Parametrierung dieser Funktion sowie eine ausführliche Beschreibung der Wiendahl'schen Kennlinientheorie ist in [NyWi03] verfügbar.

Die Wiendahl'schen Kennlinien sind Grundlage für eine Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten. Ludwig [Ludw94] nutzt die Kennlinientheorie zur modellgestützten Überwachung und Diagnose logistischer Produktionsprozesse. Meier führt auf Basis der Theorie eine Bestandsoptimierung durch [Meie95]. Eine weitere Möglichkeit der Anwendung der Kennlinientheorie im Rahmen der Fabrikplanung ist in [Möll96] dargestellt. Fastabend [Fast97] setzt die Kennlinientheorie für die Synchronisation von Fertigungs- und Montageprozessen ein. Strate [Stra02] setzt die Kennlinientheorie für die Analyse und Planung von Fertigungssystemen ein. In [WiHe02a, WiHe02b] wird die Anwendung der Kennlinien für die Verfügbarkeitsanalyse komplexer Fertigungssysteme eingesetzt.

Weiterentwicklungen der Wiendahl'schen Kennlinientheorie führten zur risikoberücksichtigenden Betriebskennlinie [Brat99], zur Terminkennlinie [Yu02], die eine Analyse der Termintreue in der Produktion zulässt, zur Lagerkennlinie, die den Zusammenhang zwischen Lagerbestand und Lieferbereitschaft beschreibt [Lutz02], zur Prozesskennlinie zur Analyse einzelner Kapazitätsrestriktionen innerhalb einer Prozesskette [WiSc02] sowie zu logistischen Fertigungsbereichskennlinien [Schn04].

Darüber hinaus werden die Wiendahl'schen Kennlinien auch für die Ergebnisdarstellungen von grundlegenden Simulationsuntersuchungen verwendet. Larsen [Lars93] stellt die Ergebnisse seiner Simulationsuntersuchungen zur Verwendung alternativer Arbeitspläne mit diesen Kennlinien dar. In [ZäMK92, ZäHö92] werden die Wiendahl'schen Kennlinien für die Bewertung von Ansätzen der Produktionsprogrammplanung eingesetzt.

Eine Einsatzmöglichkeit von Kennlinien für spezielle Logistiksysteme stellt die Fahrzeuganzahl-Diagnose dar [WeSt89]. Diese zeigt, wie sich Änderungen der Fahrzeuganzahl auf wichtige logistische Kennzahlen auswirken. Eine Fokussierung auf die Untersuchung von Steuerungsstrategien erfolgt in [Harl92]. In [Kuhn97] werden Kennlinien als Teil einer Konstruktionssystematik für Logistikmodelle vorgeschlagen.

Die vorgestellten Ansätze basieren überwiegend auf der von Wiendahl eingeführten Kennlinientheorie. Diese ist, wie die vorgestellte Literaturliste zeigt, sehr vielseitig, erfordert jedoch eine Anpassung an den Betrachtungsgegenstand und in der Regel eine systemspezifische Parametrierung.

In [NyWi03] wird diese Kennlinientheorie neben Warteschlangenmodellen und der Simulation als alternativer Modellierungsansatz vorgestellt. Tabelle 5-1 zeigt die Gegenüberstellung der dabei diskutierten Vor- und Nachteile.

Modellierungsansatz	Nachteile	Vorteile
Simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Modellgültigkeit lässt sich nur punktuell nachweisen • Neuaufbau des Modells für jeden Anwendungsfall erforderlich • Übertragbarkeit der Ergebnisse in der Regel nicht möglich • hoher Anwendungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • geringer Erstellungsaufwand • Modelladaption möglich • Einzelereignisse beschreibbar
Warteschlangenmodell	<ul style="list-style-type: none"> • hoher (aber einmaliger) Erstellungsaufwand • Modelladaption nicht bzw. nur in engen Grenzen möglich • Beschreibungsgrenzen teilweise nicht praxistgerecht 	<ul style="list-style-type: none"> • Modellstruktur und –parameter sind aus elementaren Gesetzmäßigkeiten abgeleitet • geringer Anwendungsaufwand
Kennlinientheorie	<ul style="list-style-type: none"> • hoher (aber einmaliger) Erstellungsaufwand • Beschränkung auf Ressourcensicht 	<ul style="list-style-type: none"> • Modellstruktur und –parameter sind überwiegend aus elementaren Gesetzmäßigkeiten abgeleitet • geringer Anwendungsaufwand • Modelladaption in Grenzen möglich • Modellevaluation im Rahmen der Anwendung möglich

Tabelle 5-1: Vergleich der Modellierungsansätze Simulation, Warteschlangenmodell und Kennlinientheorie nach [NyWi03]

5.4 Simulationsbasierte Kennfelder

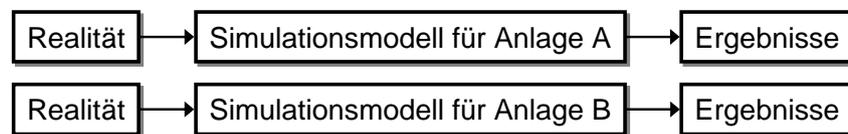
Die in dieser Arbeit vorgestellten simulationsbasierten Kennfelder unterscheiden sich von den im vorangehenden Abschnitt dargestellten Ansätzen deutlich. Simulationsbasierte Kennfelder werden nicht als alternative Modellierungs- und Analyseverfahren für Fertigungssysteme verstanden, sondern als Ansatz zur deutlichen Aufwandsreduktion bei der Modellierung und Analyse häufig auftretender Fragestellungen, die keinen hohen Detaillierungsgrad erfordern.

5.4.1 Ansatz und Potenziale simulationsbasierter Kennfelder

Eine Umfrage zu Defiziten der Simulation zeigt, dass mangelnde Lerneffekte auf den fallspezifischen, einmaligen Lösungen von Simulationsstudien basieren, aus denen keine Grundsatzkenntnisse gewonnen werden [ReFe97]. Jede Simulation für sich zeigt nur die Auswirkungen der speziell gewählten Modellbeschreibung auf die Leistungsfähigkeit eines Fertigungssystems. Dabei werden nur singuläre Ergebnisse generiert, aber keine allgemeinen Erkenntnisse gewonnen [NyWi03]. In [KoGr95] wird als wesentlicher Nachteil

der Simulation angeführt, dass problemspezifische Modelle nur selten bei der Lösung verwandter Probleme eingesetzt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aus der Sicht jedes Anwenders „sein“ Fertigungssystem einzigartig ist. Aus der Sicht der Modellierung und Analyse in der Simulation muss jedoch festgestellt werden, dass es eine Vielzahl von Parallelen in den Fertigungssystemen gibt [Noch93].

Bislang wird für jede Simulationsstudie ein spezifisches Modell erstellt. Dies gilt auch bei vergleichbaren Strukturen und Parametern der zugrunde liegenden Anlagen, die zu einer *Anlagenklasse* zusammengefasst werden können. In Abbildung 5-3 ist dieses Vorgehen dargestellt.



(Anlagen A und B einer Anlagenklasse)

Abbildung 5-3: Bisheriger Ansatz: Spezifische Modelle für Anlagen einer Anlagenklasse

Beim Ansatz simulationsbasierter Kennfelder wird zunächst ein generisches Simulationsmodell der betrachteten Anlagenklasse erstellt. Dieses dient als Grundlage für die Erzeugung des Kennfeldes, welches anschließend im Gegensatz zum bisherigen Ansatz direkt die erforderlichen Ergebnisse ohne erneute Simulation liefert. Abbildung 5-4 verdeutlicht den Ansatz simulationsbasierter Kennfelder.

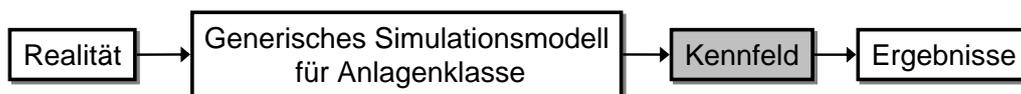


Abbildung 5-4: Ansatz simulationsbasierter Kennfelder: Generisches Modell einer Anlagenklasse zur Kennfelderzeugung

Der Ansatz des so genannten *Solution Space Scanning (3S)* hat eine vergleichbare Zielrichtung [BlWK98, Wutt00]. Allerdings werden bei diesem Ansatz die Ergebnisse von Versuchsläufen in einer Datenbank abgelegt, was eine spezifische Auswertung dieser Datenbasis bei jedem Analyseproblem erfordert. Bei beiden Verfahren wird das zeitdynamische Verhalten der Leistungsgrößen nicht berücksichtigt und der eingeschwungene Zustand des Systems betrachtet.

Das in Abschnitt 2.2.3 beschriebene Produktionssystem für die Gestaltung schlanker Fertigungssysteme basiert auf zahlreichen Prinzipien. Manche dieser Prinzipien machen den Einsatz der Simulation zwingend erforderlich. Diese sind:

- **Prozessorientierung:** Die ganzheitliche Geschäftsprozessoptimierung erfordert die Betrachtungen der Interdependenzen zwischen einzelnen Prozessen. Diese können durch Einsatz der Simulation modelliert und analysiert werden.
- **Flexibilität:** Zur Sicherstellung der Flexibilität eines Fertigungssystems, muss dieses bei unterschiedlichen Randbedingungen erprobt werden. Hierzu ist die Simulation erforderlich.

Weitere Prinzipien begünstigen simulationsbasierte Kennfelder. Diese sind:

- **Standardisierung:** Standardisierung von Prozessen und Fertigungseinrichtungen führt zu vergleichbareren Fertigungssystemen. Dadurch wird der Ansatz simulationsbasierter Kennfelder unterstützt.
- **Transparenz:** Durch Reduktion der Komplexität von Fertigungssystemen wird deren Transparenz erhöht. Dies erleichtert die Erstellung simulationsbasierter Kennfelder oder macht diese erst möglich.

Der Ansatz der Erstellung und des Einsatzes simulationsbasierter Kennfelder bietet drei wesentliche Potenziale:

- Der Aufwand für Simulationsuntersuchungen von in der Planungspraxis häufig wiederkehrenden Fragestellungen fällt nicht mehrfach an.
- Die Ergebnisse aufwändiger Simulationsuntersuchungen bleiben in einfach nachvollziehbarer Form erhalten. Dadurch wird die Verschwendung im Planungsprozess verhindert und durch die Möglichkeit der verbesserten Parametrierung von Fertigungssystemen gleichzeitig das Planungsergebnis qualitativ verbessert. Darüber hinaus leisten simulationsbasierte Kennfelder einen wichtigen Beitrag zum Wissensmanagement [FrHe06c].
- Simulationsbasierte Kennfelder haben gegenüber problemspezifischen Berechnungsverfahren (Abschnitt 2.3.2), die alternativ zu Kennfeldern angewandt oder aus Kennfeldern abgeleitet werden können, den deutlichen Vorteil der Visualisierung relevanter Effekte.

5.4.2 Klassifizierung simulationsbasierter Kennfelder

Ludwig [Ludw94] unterscheidet zwischen *systemspezifischen* und *systemneutralen* Kennfeldern für den Fall der Wiendahl'schen Kennlinien. Diese Unterscheidung wird im Folgenden für simulationsbasierte Kennfelder gemacht.

Systemspezifische simulationsbasierte Kennfelder sind für spezifische Fertigungssysteme und damit nur sehr eingeschränkt gültig. Durch systemspezifische Kennfelder wird eine quantitative Sensitivitätsbewertung bei Änderung der Randbedingungen ermöglicht. Dadurch kann insbesondere die operative Auftragseinplanung unterstützt werden. Darüber hinaus ermöglichen systemspezifische Kennfelder die Unterstützung wichtiger Entscheidungen bei der Rekonfiguration eines bestehenden oder der Neuplanung eines neuen Fertigungssystems.

Systemneutrale simulationsbasierte Kennfelder ermöglichen die qualitative Bewertung von Fertigungssystemen zur Unterstützung der Parameteradaption insbesondere in frühen Konzepterstellungsphasen. Dies ermöglicht die Gewinnung wichtiger Tendenzaussagen. Außerdem dienen systemneutrale Kennfelder der quantitativen Bestimmung relevanter Systemleistungsgrößen und führen damit zu einer signifikanten Steigerung der Planungsqualität.

Tabelle 5-2 stellt systemspezifische und systemneutrale simulationsbasierte Kennfelder gegenüber.

Systemspezifische simulationsbasierte Kennfelder	Systemneutrale simulationsbasierte Kennfelder
Quantitative Bewertung der Sensitivitäten von Systemleistungsgrößen bei Änderung der Randbedingungen	Qualitative Bewertung zur Unterstützung der Parameteradaption in Konzepterstellungsphasen (Erlangung von Tendenzaussagen)
Unterstützung der operativen Auftragseinplanung	Quantitative Bestimmung relevanter Systemleistungsgrößen
Entscheidungsunterstützung bei Rekonfigurationen und Neuplanungen von Fertigungssystemen	Steigerung der Planungsqualität durch genauere Parametrierung

Tabelle 5-2: Gegenüberstellung systemspezifischer und systemneutraler simulationsbasierter Kennfelder

5.4.3 Nach- und Vorteile simulationsbasierter Kennfelder

Simulationsbasierte Kennfelder sind sowohl mit Nach- als auch mit Vorteilen verbunden, welche in diesem Abschnitt näher betrachtet werden.

Nachteilig ist der statische Charakter der Kennfelder. Ändern sich die Annahmen, die bei der Erstellung des Kennfeldes getroffen werden, muss dieses neu erstellt werden. Sollten die für eine Analyse erforderlichen Parameterwertebereiche nicht durch das Kennfeld abgedeckt sein, muss dieses entsprechend erweitert werden. Grundsätzlich ist die universelle Anwendbarkeit von Kennfeldern dadurch sowie durch Beschränkung auf bestimmte Fragestellungen eingeschränkt.

Da die Kennfelderzeugung einmalig eine hohe Anzahl an Versuchsläufen erfordert, ist der Aufwand erheblich. Dieser fällt bei der Änderung und Erweiterung des Kennfeldes erneut an.

Im Gegensatz zu spezifischen Simulationsstudien erfordert die Anwendung simulationsbasierter Kennfelder weder die Modellierung noch die Durchführung von Experimenten. Der entstehende Nutzen durch die detaillierte Analyse eines spezifischen Systems (vgl. Abbildung 2-21) wird damit bei Anwendung eines simulationsbasierten Kennfeldes nicht explizit generiert. Dennoch muss das System genau betrachtet und die Anwendbarkeit auf ein Kennfeld geprüft werden.

Dies führt auf der anderen Seite zu einem wichtigen Vorteil simulationsbasierter Kennfelder: die schnelle und einfache Analyse. Diese bietet auch bei intuitiv nicht greifbaren Zusammenhängen Unterstützung und ermöglicht die Quantifizierung bekannter Zusammenhänge mit ausreichender Genauigkeit. Simulationsbasierte Kennfelder ermöglichen damit eine proaktive Planungsunterstützung vor der Festlegung auf ein bestimmtes Fertigungskonzept.

Der wesentliche Nachteil simulationsbasierter Kennfelder ist der hohe, einmalige Erstellungsaufwand. Da Kennfelder statisch sind und eine Änderung der bei der Kennfelderzeugung getroffenen Annahmen die Neuerstellung des Kennfeldes erfordert, muss dieser Erstellungsaufwand minimiert werden. Zu diesem Zweck wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, die die effiziente Erstellung von simulationsbasierten Kennfeldern ermöglicht. Diese Methodik wird im nächsten Abschnitt ausführlich erörtert.

Eine zusammenfassende Übersicht der Nach- und Vorteile simulationsbasierter Kennfelder ist in Tabelle 5-3 zusammenfassend dargestellt.

Nachteile	Vorteile
Kennfelder sind statisch und müssen an geänderte Bedingungen angepasst werden	Schnelle und einfache Analyse
Kennfelder sind nicht universell anwendbar	Unterstützung bei intuitiv nicht greifbaren Zusammenhängen
Kennfelder erfordern keine echte Modellbildung, sondern zeigen eine Parameterevaluation	Quantifizierung bekannter Zusammenhänge mit ausreichender Genauigkeit
Hoher, einmaliger Erstellungsaufwand	Proaktive Planungsunterstützung vor detaillierter Fertigungskonzepterstellung

Tabelle 5-3: Nach- und Vorteile simulationsbasierter Kennfelder

5.5 Methodik für die Erzeugung simulationsbasierter Kennfelder

Die Methodik für die Erzeugung simulationsbasierter Kennfelder gliedert sich in fünf wesentliche Schritte. Im ersten Schritt erfolgt der Aufbau des generischen Simulationsmodells. Der zweite Schritt umfasst die Festlegung der Simulationsdaten. Dabei werden die Modell- und Simulationsparameter bestimmt. Die relevanten Modellparameter werden durch eine Sensitivitätsanalyse im dritten Schritt identifiziert. Im vierten Schritt erfolgt die Entwicklung geeigneter Kennzahlen. Der letzte Schritt stellt die eigentliche Kennfelderstellung dar. Dieser Schritt umfasst die Auswahl der Kennfelddarstellung, die Erstellung des Versuchsplans, die Ausführung der Experimente sowie die Verifikation und Validierung des resultierenden Kennfeldes.

Abbildung 5-5 veranschaulicht die zur Kennfelderzeugung erforderlichen Schritte. Daraus wird deutlich, dass die Ergebnisse einzelner Schritte der Kennfelderzeugung eine Iteration über mehrere Schritte erfordern können.

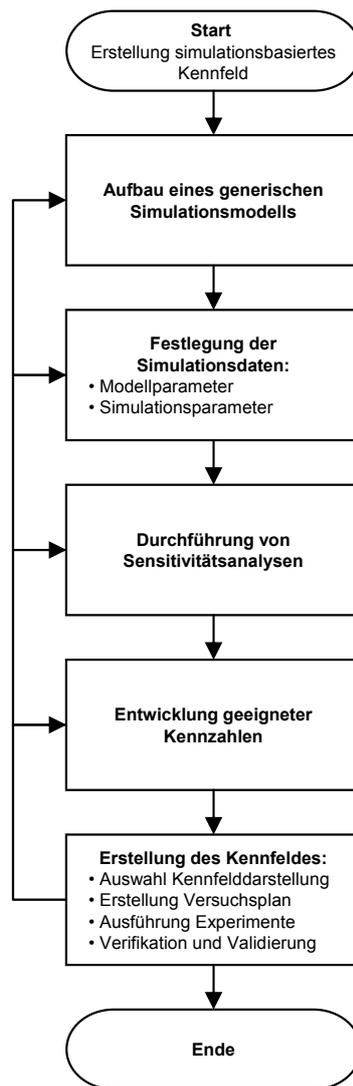


Abbildung 5-5: Methodik für die Erzeugung simulationsbasierter Kennfelder

Die Schritte der Kennfelderzeugung werden in den nächsten Abschnitten ausführlich erläutert. Existieren für einzelne Schritte konkurrierende Methoden, werden diese beschrieben, bewertet und abschließend das zielführende Vorgehen definiert.

5.5.1 Aufbau eines generischen Simulationsmodells

Für die Erstellung eines simulationsbasierten Kennfeldes ist der Einsatz eines *generischen Simulationsmodells* erforderlich. Unter einem generischen Simulationsmodell wird hier in Anlehnung an [Warn96] ein Simulationsmodell verstanden, von dem alle anderen Anwendungen als Spezialfälle abgeleitet werden können.

In der Literatur wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff des *Referenzmodells* verwendet [FeLo04, WiSc06]. Dies gilt insbesondere für den Fall des Abgleiches eines Sollmodells mit einem weiteren Modell, dem Referenzmodell. Für Referenzmodelle wird Allgemeingültigkeit gefordert [Broc03].

Im Unterschied zum Referenzmodell beinhaltet das generische Modell die Möglichkeit aus sich bzw. aus seinen Fragmenten heraus das spezifische Modell zu bilden, ohne dabei den Anspruch auf Allgemeingültigkeit zu erheben [Warn96]. Durch ein generisches Modell wird die Parametrierbarkeit des Simulationsmodells in einem hinreichend großen Wertebereich sichergestellt. Abbildung 5-6 verdeutlicht die hier verwendete Definition eines generischen Modells.

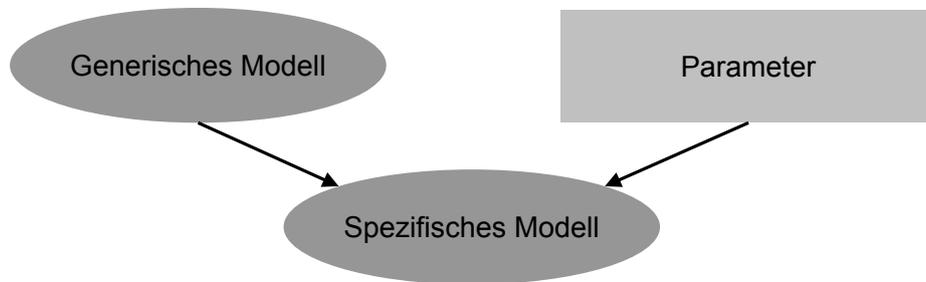


Abbildung 5-6: Verwendung eines generischen Modells

Die Erstellung eines generischen Modells erfolgt in weiten Teilen vergleichbar mit der in Abschnitt 2.3.2 erläuterten Erstellung eines spezifischen Modells. Grundsätzlich muss jedoch bei der Erstellung eines generischen Simulationsmodells das Vorgehensprinzip „Vom Groben zum Detail“ (Top down) gewählt werden (vgl. [DaHu02]). Darüber hinaus wird durch Anwendung folgender Modellierungsprinzipien die Beschränkung auf die wichtigsten Systemmerkmale sichergestellt:

- **Reduktion:** Verzicht auf unwichtige Systemmerkmale. Ein Beispiel hierfür sind logistische Einflüsse. Diese hängen direkt mit den Leistungsgrößen eines Fertigungssystems zusammen, werden jedoch nur dann berücksichtigt, wenn davon ausgegangen werden muss, dass es sich dabei um Störpotenziale handelt.
- **Abstrahierung:** Vereinfachung unverzichtbarer Systemmerkmale. Ein Beispiel hierfür ist die Abbildung einer Station durch eine Black-Box ohne Berücksichtigung detaillierter Abläufe im Inneren der Station. Eine detaillierte Betrachtung ist nur dann erforderlich, wenn Einflüsse existieren, die durch Abstraktion nicht berücksichtigt werden.

Neben der Detaillierung der Modellierung ist die Wahl der Systemgrenzen entscheidend für die Einsetzbarkeit des generischen Modells und damit der Aussagefähigkeit des resultierenden Kennfeldes.

Die folgenden Aspekte sind bei der Erstellung eines generischen Modells hinsichtlich dessen praktischer Anwendbarkeit besonders zu beachten:

Flexibilität des Modells

Ein wichtiger vorbereitender Schritt bei der Erstellung eines generischen Modells ist die Festlegung der Flexibilität des Modells. Dies bedeutet die Festlegung auf die in Abbildung 5-4 dargestellte Anlagenklasse. Das generische Modell muss durch entsprechende Parametrierung alle für die Kennfelderzeugung erforderlichen spezifischen Anlagenmodelle umfassen.

Da ein generisches Modell für eine Vielzahl von teilweise deutlich unterschiedlichen Parameterkonfigurationen Gültigkeit haben muss, kommt der Validierung des generischen Modells eine besondere Bedeutung zu. Ein Modell kann grundsätzlich für eine Parameterkonfiguration valide sein, während es für eine weitere invalide ist. Die in Abschnitt 5.5.3 detailliert beschriebenen Sensitivitätsanalysen tragen damit auch zur Validierung des generischen Modells bei und können Modelländerungen notwendig machen.

Parametrierbarkeit des Modells

Da ein generisches Modell erst durch Parametrierung ein anwendbares, spezifisches Modell ergibt (Abbildung 5-6), muss diese komfortabel und schnell durchführbar sein.

Die zur Kennfelderzeugung erforderlichen spezifischen Anlagenmodelle müssen durch Anwendung einer geeigneten Schnittstelle automatisch und mit geringem Aufwand erzeugt werden können. Hierfür wird die so genannte *COM-Schnittstelle* (COM = **C**omponent **O**bject **M**odel) verwendet, welche in Abschnitt 5.5.5 ausführlich beschrieben ist.

5.5.2 Festlegung der Simulationsdaten

Simulationsdaten werden in folgende Klassen unterteilt:

- **Modellparameter:** Modellparameter werden erneut in die Unterklassen *Steuerparameter* und *Leistungsparameter* oder *Leistungsgrößen* unterteilt. Modellparameter beeinflussen oder charakterisieren direkt das Simulationsmodell.
- **Simulationsparameter:** Simulationsparameter sind für das Experimentieren mit dem Simulationsmodell, nicht jedoch für die Beeinflussung des Verhaltens oder der Charakterisierung des Simulationsmodells selbst relevant.

Diese Klassifizierung wird im Folgenden detailliert beschrieben.

Modellparameter

Modellparameter stellen die Ein- und Ausgangsgrößen eines Modells dar. Als *Steuerparameter* werden alle Parameter bezeichnet, die das Modell direkt beeinflussen. Beispiele hierfür sind:

- **Stationsparameter:** Technische Verfügbarkeit, Bearbeitungszeit, Stördaten etc.
- **Pufferparameter:** Puffergröße, Pufferinhalt, Verweilzeit etc.
- **Systemparameter:** Engpass-Bearbeitungszeit, Stationsanzahl, Systemstruktur (Parallelstationen oder Verkettungen), Mitarbeiterereinsatz etc.

Durch technische Überlegungen und Erfahrungswissen kann der erforderliche Wertebereich der Steuerparameter eingeschränkt werden. Die in Abschnitt 5.5.3 diskutierte Sensitivitätsanalyse schränkt die Gesamtheit der Steuerparameter auf die für die Kennfelderzeugung relevanten Steuerparameter ein.

Unter *Leistungsgrößen* (*LG*) werden abhängige Parameter verstanden, die eine Aussage über die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems oder Teile des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der Systemzustände x_i und Randbedingungen *RB* ermöglichen. Leistungsgrößen lassen sich allgemein durch Gleichung 5.1 formulieren:

$$LG = f(x_i, RB) \quad (5.1)$$

Das Ziel der Analyse legt die relevanten Leistungsgrößen fest. Da diese in Kennfeldern dargestellt werden, ist eine Beschränkung auf wesentliche Leistungsgrößen erforderlich.

Bei der Sensitivitätsanalyse werden auch Wechselwirkungen von Modellparametern identifiziert. Diese ermöglichen die Aggregation von Modellparametern. Dadurch kann das resultierende Kennfeld für die Analyse einer wesentlich breiteren Anzahl an Systemen eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 5.5.4).

Simulationsparameter

Simulationsparameter dienen der *Kalibrierung* des Simulationsmodells. Dabei wird die erforderliche Einschwingphase und die Simulationsdauer bestimmt. Darüber hinaus wird der entstehende Fehler abgeschätzt und durch Experimentreplikationen verringert.

Bestimmung der erforderlichen Einschwingphase

Ein stabiles, dynamisches System benötigt eine gewisse *transiente Phase* oder *Einschwingphase* bis zur Erreichung der stationären Phase, in der die Leistungsgrößen des Systems bestimmt werden.

Da für die Kennfelderzeugung eine sehr große Anzahl an Experimenten erforderlich ist, muss die Einschwingphase minimiert werden. Für die Bestimmung der Einschwingphase bieten sich folgende Ansätze an:

- Null-Regel
- Welch-Methode
- Emshoff-Sisson-Regel

Diese Ansätze werden in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben.

Null-Regel

Bei dieser Vorgehensweise wird dem Problem ohne Auslassen von Messwerten begegnet [Whit95]. Es werden alle Messwerte benutzt und die transiente Phase wird ignoriert. Der entstehende Fehler wird reduziert, indem die betrachtete Sequenz ausreichend lange gewählt wird und dadurch der Einfluss der transienten Phase auf das Gesamtergebnis gering ausfällt.

Alternativ dazu wird ein typischer stationärer Zustand als Initialisierung gewählt. Die Identifikation dieses stationären Zustandes ist jedoch sehr schwierig.

Welch-Methode

Bei der Methode von Welch handelt es sich um ein grafisches Verfahren. Auf Basis der Messwerte wird eine Grafik erstellt, mit der das Erreichen des stationären Zustands identifiziert werden kann [LaKe00]. Dabei ist folgendes Vorgehen erforderlich:

1. m unabhängige, lange Wiederholungen von je n Messwerten durchführen ($m \geq 5$).
2. Zu jedem Zeitpunkt den Mittelwert der m Wiederholungen bestimmen. Dadurch wird die Varianz der Messwerte deutlich reduziert.
3. Den gleitenden Mittelwert mit einer Fensterweite von $2w + 1$ bilden (siehe Gleichung B.2 in Anhang B.1). Dadurch werden hochfrequente Schwingungen der Messwerte bis zu einer Frequenz von $\frac{1}{2w+1} \cdot \frac{1}{\Delta T}$ unterdrückt. ΔT ist der Zeitabstand zwischen den Messungen. In den ersten w Zeitpunkten kann der gleitende Mittelwert nicht über die ganze Fensterweite berechnet werden. Die zu den Zeitpunkten nicht vorhandenen Messwerte werden ausgelassen, das Fenster ist also kleiner. Die Berechnung des Mittelwerts erfolgt dann nach folgender Gleichung:

$$\bar{Y}(i)_{\text{Welch}} = \frac{\sum_{s=-i+1}^{i-1} Y(i+s)}{2i-1} \quad (5.2)$$

Der Wert w für die Fensterweite ist dabei höchstens $w \leq \lfloor \frac{n}{4} \rfloor$.¹

4. Mit der so erstellten Kurve wird die Einschwingphase grafisch bestimmt.

Abbildung 5-7 stellt das Vorgehen mit $w = 1$ für den gleitenden Mittelwert dar. Je größer w gewählt wird, desto stärker fällt die Glättung aus. Ein zu groß gewähltes w führt allerdings zu einer starken Zeitverzögerung beim Einschwingen des Gleitenden Mittelwerts verglichen mit den direkten Messwerten und folglich zu einer zu groß gewählten Einschwingphase. Es gilt also, ein möglichst kleines w zu wählen, welches eine korrekte grafische Auswertung erlaubt.

Emshoff-Sisson-Regel

Gemäß der Definition von Emshoff und Sisson ist die stationäre Phase dann erreicht, wenn gleich viele Messwerte über dem Mittelwert liegen wie darunter [EmSi70]. Der Median liegt dann auf dem Mittelwert. Es werden so viele Messwerte vom Anfang der Messkurve abgeschnitten, bis diese Regel erfüllt ist. Das Ende der transienten Phase ist dann erreicht.

¹ $\lfloor \cdot \rfloor$ ist die Minimum-Integer-Funktion.

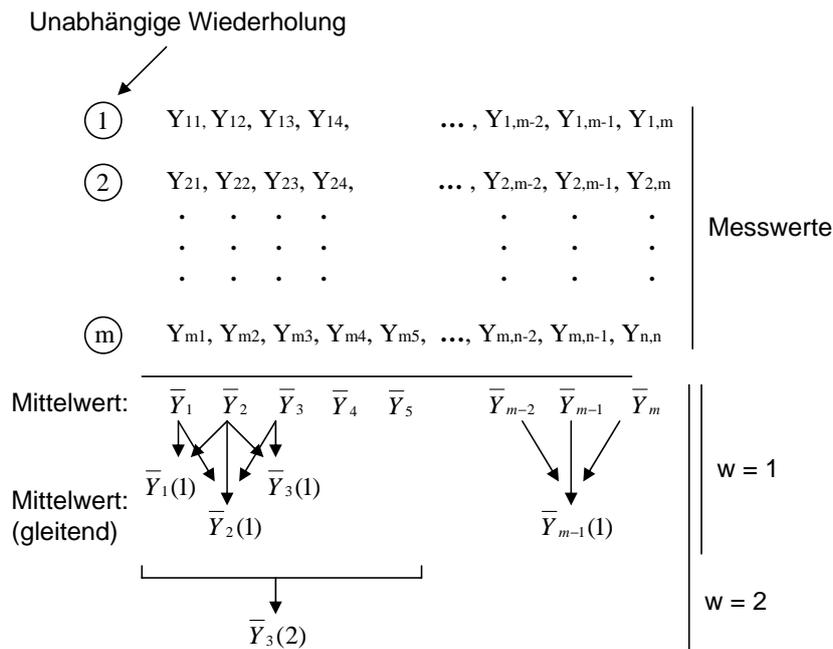


Abbildung 5-7: Darstellung der Welch-Methode

Der Vorteil dieser Methode ist, dass Ausreißer-Messwerte keinen nennenswerten negativen Effekt haben. Außerdem kann diese Methode bei nicht asymptotisch verlaufenden Messkurven angewandt werden.

Allerdings werden Schwingungen um den Mittelwert nicht erkannt. Dies birgt ein großes Fehlerpotenzial.

Ein weiteres Kennzeichen dieser Methode ist, dass keine Funktionsparameter eingestellt werden müssen. Bei der Erkennung der stationären Phase durch den Schnittpunkt von Mittelwert und Median wird von einer nicht-schiefen Verteilung der Messwerte ausgegangen. Bei einer schiefen Verteilung ist die stationäre Phase dann erreicht, wenn Mittelwert und Median parallel verlaufen.

Bewertung der Methoden zur Bestimmung der Einschwingphase

Wie in den vorangehenden Abschnitten dargestellt, bestehen mehrere Ansätze für die Bestimmung der Einschwingphase. Alle Methoden haben Vor- und Nachteile, die berücksichtigt werden müssen. In Tabelle 5-4 werden die in den vorangehenden Absätzen beschriebenen Methoden zusammengefasst und deren Vor- und Nachteile gegenübergestellt.

Aufgrund der deutlich überwiegenden Nachteile der Null-Regel wird diese nicht weiter betrachtet. Stattdessen wird für die Bestimmung der Einschwingphase ein zweistufiges

Methoden	Nachteile	Vorteile
Null-Regel	<ul style="list-style-type: none"> • Fehler durch Berücksichtigung von Daten der transienten Phase • Einstellen eines stationären Zustands ist schwierig 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Messwerte bleiben unberücksichtigt • Geringer Aufwand
Welch-Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Ergebnisbeeinflussung durch Wahl der Fensterbreite w 	<ul style="list-style-type: none"> • Grafische Darstellung • Sehr einfach • Hohe Zuverlässigkeit
Emshoff-Sisson-Regel	<ul style="list-style-type: none"> • Schwingungen um den Mittelwert werden nicht erkannt 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausreißer zeigen kaum negativen Einfluss • Keine freien Parameter bei der Anwendung

Tabelle 5-4: Gegenüberstellung der Methoden zur Bestimmung der Einschwingphase

Vorgehen gewählt. Da die Emshoff-Sisson-Regel sehr einfach anzuwenden ist, wird diese Methode in der ersten Stufe angewandt. Zusätzlich wird in der zweiten Schritt die Welch-Methode angewandt, um das Ergebnis durch die mit dieser Methode verbundene Visualisierung abzusichern.

Fehlerabschätzung

Zur Bestimmung des korrekten Erwartungswertes und des Vertrauensintervalls der Leistungsgrößen eines stochastischen Systems müssen für jede Parameterkonfiguration Versuchsreplikationen durchgeführt werden. Bei jeder Replikation müssen zufällige Ereignisse variiert werden. Stochastische Parameter werden in der Simulation mit so genannten *Pseudo-Zufallszahlengeneratoren* erzeugt. Der Startwert der Zufallszahlengeneratoren, der so genannte *Zufallszahlenstrom*, bestimmt dabei die resultierenden Zufallszahlen. Durch Variation der Zufallszahlenströme werden bei den einzelnen Replikationen unterschiedliche zufällige Zahlen erzeugt. Die Unabhängigkeit der resultierenden Leistungsgrößen der einzelnen Replikationen wird dadurch sichergestellt.

Bei jeder Replikation muss die Einschwingphase erneut durchlaufen werden. Dies erzeugt erheblichen Aufwand bei der Erstellung simulationsbasierter Kennfelder. Aus diesem Grund wird das so genannte *Batch-Verfahren* angewandt. Ein langer Versuchslauf wird dabei in mehrere Intervalle unterteilt. Dieses Verfahren wird im nächsten Abschnitt ausführlich beschrieben.

Batch-Verfahren

Beim *Batch-Verfahren* wird ein langer Versuchslauf durchgeführt [Gord78, Alex95]. Dieser Versuchslauf wird in mehrere Intervalle unterteilt. Es ist dabei besonders wichtig, den

Einfluss der transienten Phase zu eliminieren, da die beim Batch-Verfahren gebildeten Intervalle sonst durch einen Initialisierungsfehler verfälscht sind. Durch die transiente Phase werden die ersten d Messwerte ausgelassen.

Die stationäre Phase des Versuchslaufs mit $n - d$ Messwerten wird in b gleich große Intervalle der Länge l aufgeteilt ($b = \lfloor \frac{n-d}{l} \rfloor$)¹. Diese Intervalle werden als einzelne Versuchsläufe interpretiert und als *Pseudo-Versuche* bezeichnet. Der Endzustand jedes Pseudo-Versuchs stellt den Initialwert des nachfolgenden Pseudo-Versuchs dar. Abbildung 5-8 verdeutlicht die Anwendung des Batch-Verfahrens.

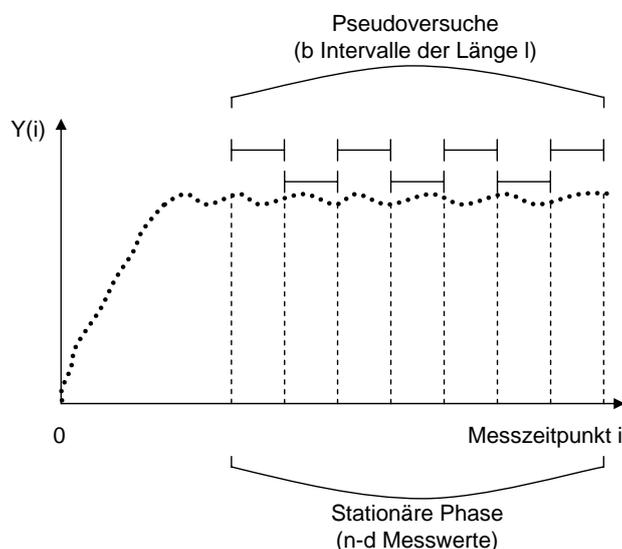


Abbildung 5-8: Anwendung des Batch-Verfahrens

Die Hauptschwierigkeit des Batch-Verfahrens ist die richtige Wahl der Intervalllänge. Je kürzer die Intervalle, desto geringer ist die erforderliche Simulationsdauer der stationären Phase. Bei zu kurzer Intervalllänge können die in den einzelnen Intervallen ermittelten Leistungsgrößen nicht mehr als unabhängig betrachtet werden. Die unerwünschte Korrelation kann durch Einfügen von Zwischenintervallen vermindert werden. Diese bedeuten jedoch einen zusätzlichen Aufwand.

In der Literatur finden sich deutlich uneinheitliche Angaben zur richtigen Wahl der Intervalllänge. Conway [Conw63] zeigt die Vernachlässigbarkeit des mit steigender Intervalllänge sinkenden Fehlers durch die Abhängigkeit der Leistungsgrößen aus den einzelnen Intervallen. In [Gord78] wird als Mindestlänge der Intervalle die Länge der transienten Phase postuliert. Abweichend davon wird in [LaKe00] für statistische Untersuchungen

¹ $\lfloor \cdot \rfloor$ ist die Minimum-Integer-Funktion

eine Länge der stationären Phase gefordert, welche dem fünffachen der transienten Phase entspricht.

Im Folgenden wird eine Methode entwickelt, welche die Unabhängigkeit der Leistungsgrößen aus den einzelnen Intervallen prüft. Unter Anwendung dieser Methode kann sichergestellt werden, dass die Intervalllänge ausreichend lange gewählt ist.

Die erforderlichen Schritte hierzu sind:

1. Bildung des Medians des gesamten stationären Versuchslaufs.
2. Bestimmung des letzten Werts der Zielgröße jedes Intervalls.
3. Unterscheidung der Intervalle in Abhängigkeit der in Schritt 2 bestimmten Zielgröße. Liegt die Zielgröße oberhalb des Medians, wird dem Intervall eine „1“ zugeordnet. Andernfalls erfolgt die Zuordnung der „0“. Daraus ergibt sich eine so genannte binäre Reihe. Abbildung 5-9 verdeutlicht die Schritte 1-3 dieser Methode.
4. Überprüfung des Zufallscharakters der binären Reihe. Zu diesem Zweck werden Verfahren angewandt, die für Tests von Zufallszahlengeneratoren eingesetzt werden. Falls die Überprüfung fehlschlägt, muss die Länge der Intervalle erhöht werden. Da deutlich zu lang gewählte Intervalle nicht explizit identifiziert werden können, muss mit einer kurzen Intervalllänge begonnen werden, welche dann sukzessive verlängert wird. Auf den Test der Zufälligkeit geht der nächste Abschnitt näher ein.

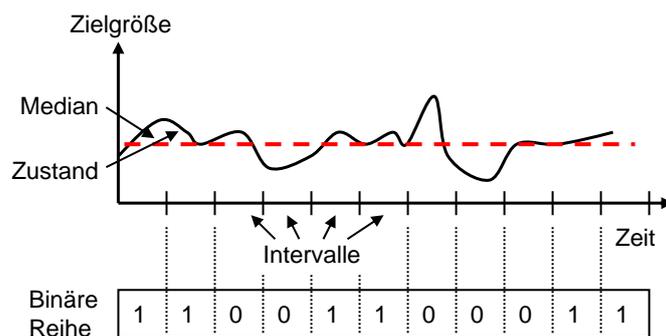


Abbildung 5-9: Erstellung der binären Reihe

Test der Zufälligkeit

Bei einer idealen Zufallsverteilung der binären Reihe bestehen keine statistischen Abhängigkeiten der einzelnen Werte untereinander. Dies ist dann der Fall, wenn die Wahrscheinlichkeit für eine Null oder eine Eins bei der Unterscheidung in Schritt 3 gleich groß ist.

Hierfür gibt es einen aus mehreren Einzeltests bestehenden Test, der einen Quasi-Standard darstellt [Hild02]. Dieser vom *NIST (National Institute of Standards and Technology)* publizierte Test wird als *FIPS 140-1* bezeichnet [NIST94]. Bei den Einzeltests handelt es sich um den *Monobit-Test*, den *Poker-Test*, den *Laufängen-Test* und den *Ausschlusstest des langen Laufs*. Nach NIST müssen diese Tests bestanden werden, um den minimalen Ansprüchen an einen Zufallszahlengenerator zu genügen.

Für die Sicherstellung der Unabhängigkeit der Leistungsgrößen der einzelnen Intervalle wird das Bestehen dieser Einzeltests ebenfalls gefordert. Diese werden im Folgenden näher beschrieben:

- **Monobit-Test:** Für den Monobit-Test wird eine binäre Reihe benutzt, welche aus 20.000 Werten besteht. Der Test ist bestanden, wenn die Anzahl der Einsen im Bereich

$$9654 < \{\text{Anzahl Einsen}\} < 10346 \quad (5.3)$$

liegt.

Die Erfahrungen bei der Implementierung und Anwendung haben ergeben, dass ein deutliches Scheitern dieses Test auch auf eine fehlerhafte Erkennung und Eliminierung der transienten Phase hindeuten kann. Im Falle des Scheiterns dieses Tests muss deshalb auch die Richtigkeit der Bestimmung der transienten Phase nochmals geprüft werden.

- **Poker-Test:** Wie in obigem Test wird eine Reihe von 20.000 Werten verwendet. Die Werte dieser Reihe werden in 5.000 Intervalle der Größe 4-Bit aufgeteilt. Die Auftretenshäufigkeit dieser 4-Bit-Zahlen wird für die Bildung der Häufigkeitsfunktion $f(i)$, $i \in \{0 : 1 : 15\}$ verwendet. Mit den Funktionswerten dieser Häufigkeitsfunktion wird ein Wert X nach folgender Berechnungsvorschrift bestimmt:

$$X = \frac{16}{5000} \cdot \left[\sum_{i=0}^{15} f(i)^2 \right] - 5000 \quad (5.4)$$

Dieser Test ist dann bestanden, wenn für den errechneten Wert gilt:

$$1.03 < X < 57.4 \quad (5.5)$$

- **Laufängen-Test:** Unter einem *Lauf* wird bei diesem Test die Anzahl des wiederholten Auftretens von Null oder Eins verstanden. Die aus 20.000 Werten bestehende binäre Reihe wird nach Läufen abgesucht und deren Anzahl entsprechend ihrer Länge aufsummiert. Liegt die Anzahl der jeweiligen Läufe innerhalb der in Tabelle 5-5 angegebenen Akzeptanzintervallen, ist der Test bestanden.

Laufänge	Akzeptanzintervall der Häufigkeiten
1	2.267 – 2.733
2	1.079 – 1421
3	502 – 748
4	223 – 402
5	90 – 223
> 5	90 – 223

Tabelle 5-5: Akzeptanzintervalle der Läufe

- **Ausschlusstest des langen Laufs:** Auch bei diesem Test wird unter einem Lauf die Anzahl des wiederholten Auftretens von Null oder Eins verstanden. Der Ausschlusstest des langen Laufs durchsucht die aus 20.000 Werten bestehende binäre Reihe nach dem längstem vorhandenem Lauf. Dieser darf höchstens eine Länge von 33 Bit haben, damit der Test bestanden ist.

Bestimmung der erforderlichen Versuchsanzahl

Die im vorangehenden Abschnitt besprochene Methode zeigt auf, wie die Intervalllänge zu wählen ist, um gleichwertige und prinzipiell gleichartige Versuchsergebnisse ermitteln zu können.

Da die Versuchsergebnisse zufallsbedingten Schwankungen unterliegen, ist eine große Versuchsanzahl erforderlich, um eine Aussage über die Ergebnisqualität treffen zu können. Die Versuche sind eine Stichprobe aus der unendlich großen *Grundgesamtheit*. Bei einer Simulationsuntersuchung wird von dieser Grundgesamtheit auf eine *Stichprobe* geschlossen. Bei der sinnvollen Annahme einer normal- oder gaußverteilten Grundgesamtheit kann diese Grundgesamtheit durch den wahren *Mittelwert* μ und die *Standardabweichung* σ charakterisiert werden. Die Standardabweichung wird auch als der *mittlere Fehler* bezeichnet. Da der wahre Mittelwert nicht bekannt ist, muss als dessen Schätzung der Mittelwert \bar{x} der Einzelversuche benutzt werden. Damit lässt sich die *empirische Standardabweichung* s_x [Stel04] angeben.

Diese ist definiert als

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.6)$$

Dabei ist:

- n \cdots Anzahl der Versuche
- x_i \cdots Ergebnis eines Versuchs
- \bar{x} \cdots Mittelwert aller Versuche

Durch Quotientenbildung der empirischen Standardabweichung mit dem Mittelwert kann die *normierte empirische Standardabweichung* bestimmt werden:

$$s_{x \text{ norm.}} = \frac{s_x}{\bar{x}} \quad (5.7)$$

Die normierte Standardabweichung wird auch als *Variationskoeffizient* bezeichnet (vgl. Abschnitt 4.2). Sie macht die Streuung der Systemausgänge direkt vergleichbar und verdeutlicht, welche der ermittelten Mittelwerte einer signifikanten Streuung unterliegen. Je höher die Streuung, desto höher ist die zu erwartende Differenz zwischen den Leistungsgrößen der unabhängigen Versuche. Der Mittelwert ist dann unsicherer und es bedarf einer umso höheren Anzahl an Versuchsläufen, je größer die normierte empirische Standardabweichung ist, um einen genauen Mittelwert zu erhalten.

Um die mit den durchgeführten Versuchen erzielte Genauigkeit quantifizieren zu können, wird eine so genannte *Intervallschätzung* durchgeführt. Das dabei erforderliche Vorgehen ist in zahlreichen Standardwerken der Statistik beschrieben. Aufgrund der Wichtigkeit der Intervallschätzung für diese Arbeit wird das Vorgehen in Anlehnung an Scheffler [Sche97] in der Folge detailliert beschrieben.

Bei der Intervallschätzung wird ein begrenztes Intervall um den Mittelwert \bar{x} bestimmt, das mit einer sinnvollen *Sicherheitswahrscheinlichkeit* den wahren Mittelwert μ einschließt. Hierzu kann das *Konfidenzintervall* (*Vertrauensbereich*) bestimmt werden, das von der unteren und oberen Konfidenzgrenze eingeschlossen wird. Die Sicherheitswahrscheinlichkeit heißt in diesem Zusammenhang *Konfidenzniveau* $P = 1 - \alpha$, darin ist α die *Irrtumswahrscheinlichkeit*.

Die Normalverteilung setzt voraus, dass die Stichprobe sehr groß ist. Je kleiner die Versuchsanzahl n ist, desto unsicherer schätzen \bar{x} und s_x die wahren Werte μ und σ . Die

Studentsche *t-Verteilung* berücksichtigt dies durch Einbeziehen der Versuchszahl über die Anzahl der Freiheitsgrade ν , das heißt die Anzahl der voneinander unabhängigen Vergleichsmöglichkeiten der Systemausgänge. Die Anzahl der Freiheitsgrade ν einer Statistik ist durch die Versuchszahl abzüglich der Anzahl zu bestimmender Parameter festgelegt. Die Dichtekurve der *t-Verteilung* hat eine breitere Basis als die der Normalverteilung. Die geringere Kenntnis über μ drückt sich bei gleicher Irrtumswahrscheinlichkeit in einer größeren Intervallbreite aus.

Das Konfidenzintervall ist um so kleiner, je kleiner die Sicherheitswahrscheinlichkeit P , je kleiner die Streuung s_x und je größer die Versuchszahl n der in den Mittelwert \bar{x} eingehenden Messwerte ist. Das Konfidenzintervall wird durch

$$\text{Konfidenzintervall} = \bar{x} \pm \frac{t \cdot s_x}{\sqrt{n}} \quad (5.8)$$

berechnet. Dabei ist t der Wert für die Studentsche Prüfverteilung. Dieser Wert ist in Abhängigkeit von P und ν tabelliert und in der Literatur verfügbar (beispielsweise in [Sche97]).

5.5.3 Durchführung von Sensitivitätsanalysen

Eine effektive Sensitivitätsanalyse für die Kennfelderzeugung hat zwei wesentliche Ziele. Zum einen muss die Anzahl der Versuchsläufe für die Kennfelderzeugung minimiert werden. Zum anderen muss die Anzahl im Kennfeld darzustellender Zusammenhänge begrenzt sein. Beide Ziele werden durch die Identifikation sensibler Parameter und die daraus abgeleitete eingeschränkte Betrachtung erreicht.

Bei der Sensitivitätsanalyse ist darauf zu achten, dass der Einfluss stochastischer Parameter das Ergebnis nicht verfälscht. Wird der Zahlenstrom des Zufallszahlengenerators konstant gehalten, treten bei jedem Versuchslauf dieselben stochastischen Einflüsse auf. Dadurch kann die Sensitivität eines Parameters isoliert vom Einfluss stochastischer Parameter analysiert werden. Replikationen bei der Sensitivitätsanalyse zur statistischen Absicherung sind dann erforderlich, wenn die Parameter, deren Sensitivitäten analysiert werden sollen, selbst einem stochastischen Verhalten unterliegen oder wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass diese durch weitere stochastische Parameter beeinflusst werden.

Für die Durchführung von Sensitivitätsanalysen bieten sich folgende Verfahren an:

- Infinitesimal Perturbation Analysis (IPA)

- One-by-One Factor-Methode
- Intensitäts-Beziehungsmatrix
- Vollfaktorielle Versuchsplanung
- Teilfaktorielle Versuchsplanung

Diese Verfahren werden im Folgenden näher beschrieben und abschließend bewertet.

Infinitesimal Perturbation Analysis

Die *Infinitesimal Perturbation Analysis (IPA)* ist eine Methode, mit der anhand eines einzelnen Versuchslaufs die Auswirkungen kleiner Änderungen der Systemeingangsparameter auf die zu untersuchenden Systemleistungsgrößen mittels einer so genannten *Gradientenschätzung* berechnet werden können.

Da es sich bei Fertigungssystemen um ereignisdiskrete Systeme handelt, ändern sich auch die Systemleistungsgrößen an diskreten Zeitpunkten. Deshalb sind diese stückweise konstant und deren Ableitung nach der Zeit stets null. Das Ziel der IPA ist nicht die Berechnung dieser Ableitung oder die Approximation von Ableitungen bezüglich Systemparameter durch Differenzenbildung.

Vielmehr sind die Gradienten, die mittels der IPA berechnet werden, Ableitungen bezüglich der Systemeingangsparameter. Mit diesen Gradienten lassen sich die Auswirkungen kleiner Änderungen der Systemeingangsparameter auf die Systemleistungsgrößen analysieren.

Dabei wird mit θ der Vektor der Systemeingangsparameter bezeichnet. $x(t)$ bezeichnet die Entwicklung des dynamischen Systems über der Zeit t . Im Vektor ξ werden die Zufallszahlenströme der Parameter festgelegt. Anstatt $x(t)$ wird in der Folge $x(t; \theta, \xi)$ verwendet, um die Abhängigkeit von $x(t)$ von den Variablen θ und ξ deutlich zu machen. τ_i bezeichnet die i -te Änderung des Systemzustands, die durch ein Ereignis ausgelöst wird.

Mit der IPA wird analysiert, wie sich das Verhalten des Systems ändert, wenn die Systemeingangsparameter θ um den Betrag $\Delta\theta$ geändert werden. Es wird also analysiert, wie sich das System $x(t; \theta, \xi)$ gegenüber dem System $x(t; \theta + \Delta\theta, \xi)$ verhält. Dabei ergibt sich das System $x(t; \theta + \Delta\theta, \xi)$ aus $x(t; \theta, \xi)$ durch Verwendung desselben Modells mit unveränderten Zufallszahlen, wobei der Vektor der Systemeingangsparameter θ durch $\theta +$

$\Delta\theta$ ersetzt wird. Die Systemleistungsgrößen $x(t; \theta, \xi)$ lassen sich mit dem so genannten Leistungsmaß analysieren, welches durch

$$L(x(t; \theta, \xi)) = \frac{1}{N} \int_0^{\tau_N} f(x(t; \theta, \xi)) dt \quad (5.9)$$

definiert ist [HoCa91], wobei mit $f(\cdot)$ eine beschränkte reellwertige Funktion bezeichnet wird, die die Zustandsänderungen einer Systemleistungsgröße beschreibt. Stellt beispielsweise $x(t; \theta, \xi)$ ein Warteschlangenmodell bestehend aus einer Maschine und einem Puffer dar (vgl. Abbildung 2-15) und $f(x)$ den Verlauf des Pufferinhaltes, so ist $L(x(t; \theta, \xi))$ die durchschnittliche Puffergröße nach N Zustandswechseln [Glas91].

Da es sich bei $x(t; \theta, \xi)$ um ein stochastisches System handelt, ist $L(x(t; \theta, \xi))$ (in der Folge kurz mit $L(\theta, \xi)$ bezeichnet) ein Zufallsmaß. Da Ereignisse nur zu diskreten Zeitpunkten ausgelöst werden und der Verlauf der Funktion $x(t; \theta, \xi)$ stückweise konstant ist, lässt sich Gleichung 5.9 zu

$$L(\theta, \xi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} f(x_i) (\tau_{i+1} - \tau_i) \quad \text{mit } \tau_0 = 0 \quad (5.10)$$

umformulieren, wobei mit x_i der Zustand der Funktion $x(t; \theta, \xi)$ zum Zeitpunkt τ_i bezeichnet wird und $\tau_{i+1} - \tau_i$ die Dauer dieses Zustands beschreibt.

Das in Gleichung 5.10 definierte Leistungsmaß ist für endliche Intervalle definiert. Für die Analyse ereignisdiskreter Systeme ist der Erwartungswert von $L(\theta, \xi)$ von zentraler Bedeutung. Dieser wird als Grenzwert folgendermaßen definiert:

$$E[L(\theta, \xi)] = \lim_{N \rightarrow \infty} L(\theta, \xi) \quad (5.11)$$

Mittels des Erwartungswerts $E[L(\theta, \xi)]$ des Leistungsmaßes $L(\theta, \xi)$ wird das System analysiert. Hierzu muss der Gradient des erwarteten Leistungsmaßes $\nabla_{\theta} E[L(\theta, \xi)]$ zunächst berechnet werden. Durch Kenntnis des Systems $x(t; \theta, \xi)$ lässt sich $\nabla_{\theta} L(\theta, \xi)$ ohne Variation der Systemeingangsparameter θ exakt bestimmen.

Mit diesem so genannten stochastischen Gradienten kann das Verhalten des Systems untersucht werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Bedingung

$$E[\nabla_{\theta} L(\theta, \xi)] = \nabla_{\theta} E[L(\theta, \xi)] \quad (5.12)$$

erfüllt ist. Die IPA liefert lediglich den Gradienten des Leistungsmaßes, dessen Erwartungswert einfach berechnet werden kann (linke Seite der Gleichung 5.12). Die rechte Seite der Gleichung 5.12 wird zur Systemanalyse benötigt.

Wird die IPA nicht verwendet, muss der Gradient $\nabla_{\theta} E[L(\theta, \xi)]$ durch einige Simulationsläufe bestimmt werden. Für das System $x(t; \theta, \xi)$ wird ein Simulationslauf mit dem Parametervektor θ und dem Zufallszahlenstrom ξ_0 durchgeführt. Anschließend werden für die n Komponenten des Parametervektors weitere Simulationsläufe unter Verwendung desselben Zufallszahlenstroms ξ_0 durchgeführt, wobei im i -ten Simulationslauf die Komponente i durch einen Faktor h gestört wird. Es ergeben sich somit $n + 1$ Leistungsmaße, $L(\theta, \xi_0), L(\theta + he_1, \xi_0), \dots, L(\theta + he_n, \xi_0)$, wobei mit e_i der i -te Einheitsvektor bezeichnet wird. Durch Bilden der Differenz von $L(\theta + he_i, \xi_0) - L(\theta, \xi_0)$ für $i = 1, 2, \dots, n$ erhält man den Effekt kleiner Störungen auf den Parameter θ_i .

Bei der IPA wird der Gradient des Leistungsmaßes exakt berechnet, d.h.

$$\nabla_{\theta} L(\theta, \xi_0) = (\partial_{\theta_1} L(\theta, \xi_0), \partial_{\theta_2} L(\theta, \xi_0), \dots, \partial_{\theta_n} L(\theta, \xi_0)),$$

wobei mit

$$\partial_{\theta_i} L(\theta, \xi_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{L(\theta + he_i, \xi_0) - L(\theta, \xi_0)}{h} \quad (5.13)$$

bezeichnet wird. Gleichung 5.13 wird als stochastische partielle Ableitung bezeichnet. Der n -dimensionale Vektor aus diesen stochastischen partiellen Ableitungen wird stochastischer Gradient genannt. Es wird somit lediglich ein Simulationslauf durchgeführt, um den Gradienten zu bestimmen, während ohne Anwendung der IPA $n + 1$ Durchläufe durchgeführt werden müssen. Die IPA stellt den Grenzwert $\lim_{h \rightarrow 0}$ dar. Die Anwendung der IPA wird in [Glas91] anhand eines einfachen Beispiels ausführlich dargestellt.

Um die Berechnung des stochastischen Gradienten durchführen zu können, muss $L(\theta, \xi)$ in θ stetig differenzierbar sein. Diese Bedingung ist in der Regel nur dann erfüllt, wenn die Störungen auf den Systemeingangsparametern θ_i so gering sind, dass dadurch die Reihenfolge der Ereignisse, beispielsweise die zu bearbeitenden Aufträge in einem Puffer, nicht verändert wird [Glas91]. Daher wird für die Anwendung der IPA die starke Einschränkung formuliert, dass eine Änderung der Reihenfolge der Ereignisse das Verhalten des Gesamtsystems über der Zeit nicht ändert [Stri93].

Eine weitere einschränkende Annahme besteht dadurch, dass ein aktiviertes Ereignis bis zum Eintreten nicht unterbrochen werden darf [Stri93]. Nur unter Berücksichtigung dieser einschränkenden Annahmen ist Gleichung 5.12 gültig und damit die IPA anwendbar.

Die IPA ist nur schwierig auf komplexe Systeme anwendbar, da der oben beschriebene Algorithmus für jede Anwendung angepasst werden muss [RoNT02]. So müssen für die Anwendung der IPA zusätzliche Ereignistabellen aufgenommen werden, die einen tiefen Eingriff in das Simulationssystem erfordern. Da moderne, objekt-orientierte Simulationssoftwaresysteme einen Eingriff durch Programmierung nur auf Hochsprachenebene erlaubt, wird die Anwendung der IPA zusätzlich erschwert [Azad99].

Aufgrund der einschränkenden Annahmen und den erforderlichen aufwändigen Anpassungen am Simulationssystem wird auf eine Implementierung der IPA im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

One-By-One-Factor-Methode

Die *One-by-One-Factor-Methode* ist eine aufwandsarme Methode für die Gewinnung erster Erkenntnisse über Parametersensitivitäten [VDI3633b]. Bei dieser Methode wird jeweils nur ein Parameter variiert, während alle anderen Parametereinstellungen konstant gehalten werden. Die Haupteffekte der Parameter lassen sich so identifizieren. Wechselwirkungseffekte bleiben jedoch unberücksichtigt. Hier liegen auch die Grenzen dieser Methode, da Wechselwirkungen der Parameter häufig nicht vernachlässigt werden können.

Eine Wechselwirkung zwischen Parametern bedeutet nicht, dass die Parameter gegenseitig aufeinander einwirken, sondern dass verschiedene Parametereinstellungen unterschiedliche Effekte auf die Systemleistungsgrößen verursachen. Eine Wechselwirkung liegt dann vor, wenn der Einfluss eines Parameters von der Einstellung eines anderen Parameters abhängt.

Der Durchführungsaufwand der Methode hängt sehr stark von der Anzahl zu variierender Parameter und den zu untersuchenden Abstufungen ab.

Intensitäts-Beziehungsmatrix

Mit der Intensitäts-Beziehungsmatrix werden Parameterwechselwirkungen durch Experten geschätzt und aussagekräftig dargestellt [Pfei01]. Es wird dafür eine so genannte *Beziehungsmatrix* aufgestellt, in der die Parameter über sich selbst aufgetragen werden. In dieser Matrix wird die Wirkung der Parameter in den Zeilen auf die Parameter in

den Spalten bewertet. Hierfür werden die in Tabelle 5-6 erläuterten Werte verwendet. Die Summe der Werte in den Zeilen der Matrix ergibt die so genannte *Aktivsumme*, die der Spalten ergibt die so genannte *Passivsumme*. Abbildung 5-10 zeigt die Intensitäts-Beziehungsmatrix und veranschaulicht das beschriebene Vorgehen.

Eintrag	Bedeutung
0	Keine Wirkung
1	Schwache Wirkung
2	Stärkere Wirkung
3	Sehr starke Wirkung

Tabelle 5-6: Einträge in der Intensitäts-Beziehungsmatrix

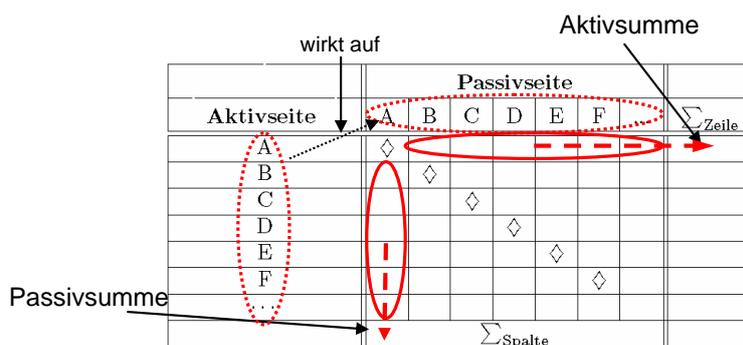


Abbildung 5-10: Intensitäts-Beziehungsmatrix

Die Werte der Aktiv- und Passivsumme werden im in Abbildung 5-11 gezeigten *Aktiv-/Passiv-Diagramm* der Intensitäts-Beziehungsmatrix eingetragen. Aus diesem Diagramm lässt sich die gegenseitige Beeinflussung der Parameter in Abhängigkeit der Felder des Aktiv-/Passiv-Diagramms folgendermaßen bestimmen:

- **Aktives Feld:** Die Parameter dieses Feldes beeinflussen andere Parameter deutlich.
- **Passives Feld:** Die Parameter dieses Feldes zeigen kaum Wechselwirkungen mit anderen Parametern.
- **Kritisches Feld:** Die Parameter dieses Feldes beeinflussen andere Parameter deutlich und werden selbst deutlich von den Einstellungen anderer Parameter beeinflusst.
- **Reaktives Feld:** Die Parameter dieses Feldes werden stark von den Einstellungen anderer Parameter beeinflusst.

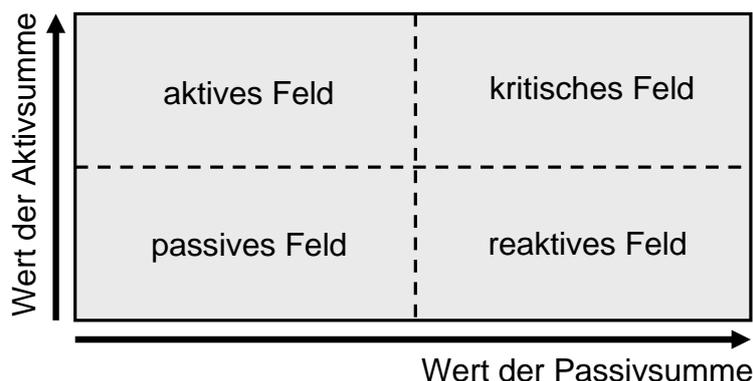


Abbildung 5-11: Aktiv-/Passiv-Diagramm der Intensitäts-Beziehungsmatrix

Vollfaktorielle Versuchsplanung

Die vollfaktorielle Versuchsplanung ist eine sehr aufwändige Methode, bei der die zu untersuchenden Parameter bzw. *Faktoren* gleichzeitig über mehrere Stufen variiert und ihre *Auswirkungen bzw. Effekte* auf die zu untersuchenden Ausgangsdaten analysiert werden. Ziel dabei ist es, nicht nur die Haupteinflüsse der Parameter zu untersuchen, sondern auch Wechselwirkungen zu berücksichtigen.

Der Aufwand der vollfaktoriellen Versuchsplanung richtet sich nach der Anzahl der Parameter und der Anzahl der Parameterstufen. Die Gesamtzahl der erforderlichen Versuchsläufe N eines vollfaktoriellen Versuchsplans mit k Parametern, die auf z_i Stufen (i bezeichnet den i -ten Parameter) variiert werden, lässt sich folgendermaßen bestimmen:

$$N = \prod_{i=1}^k z_i \quad \text{mit } k, z_i \in \mathbf{N}. \quad (5.14)$$

Sind zur statistischen Absicherung der Ergebnisse n Replikationen erforderlich, werden für die vollfaktorielle Versuchsplanung entsprechend $n \cdot N$ Versuchsläufe bzw. Pseudo-Versuche erforderlich (vgl. Abschnitt 5.5.2).

Aufgrund des hohen Aufwandes für einen vollfaktoriellen Versuchsplan ist es sinnvoll, die Anzahl der Parameterstufen gering zu halten. Für die Sensitivitätsanalyse genügt es meistens, die Parameter über zwei Stufen zu variieren [Mont01]. Hieraus ergibt sich ein Spezialfall der vollfaktoriellen Versuchsplanung, das so genannte *2^k-Factor Design of Experiments*.

2^k-Factor Design of Experiments

Beim 2^k-Factor Design of Experiments werden sämtliche Parameter lediglich auf zwei Stufen variiert. In diesem Fall ergibt sich gemäß Gleichung 5.14 ein Aufwand von $N = 2^k$ Versuchsläufen pro Replikation. 2^k-Versuchspläne werden auch als Versuchspläne erster Ordnung bezeichnet.

Für die Sensitivitätsanalyse wird aus Erfahrungen oder durch Absprache mit den Fertigungsplanern eine Ober- und Untergrenze der Parameter definiert. Diese Grenzen werden auch als *Faktorstufen* bezeichnet. Als Beispiel wird ein vollfaktorieller Versuchsplan bestehend aus den Faktoren \bar{x}_1 und \bar{x}_2 aufgestellt, deren Einfluss auf Systemleistungsgrößen analysiert werden soll. In Tabelle 5-7 sind diese Faktoren mit relevanten Ober- und Untergrenzen zusammengefasst.

Parameter x_i	Faktorstufen	
	Untergrenze	Obergrenze
x_1	100	900
x_2	25	45

Tabelle 5-7: Faktorstufen eines 2²-Versuchsplans

Zur Verdeutlichung des Untersuchungsraumes lassen sich die Faktorstufen in ein natürliches Koordinatensystem eintragen (vgl. Abbildung 5-12). Die resultierende Fläche wird durch eine Transformation derart verschoben, dass deren Zentralpunkt in der Mitte eines so genannten *geometrischen Koordinatensystems* liegt. Für den Abstand zwischen der Ober- bzw. Untergrenze und dem Zentralpunkt wird nun für jeden Faktor eine Einheit festgelegt. Die Faktoren im geometrischen Koordinatensystem werden mit x_1 und x_2 bezeichnet. Die Transformation ist für die mathematische Auswertung des Versuchsplans erforderlich. Aus dem geometrischen Koordinatensystem ergibt sich der 2²-Versuchsplan.

Für die Umsetzung und Auswertung des 2²-Versuchsplans wird die in Tabelle 5-8 gezeigte *Gesamtmatrix* verwendet. Diese setzt sich aus folgenden Matrizen zusammen:

- **Designmatrix:** Diese Matrix enthält die für die Umsetzung und Auswertung des Versuchsplans erforderlichen Faktoren und deren Stufen.

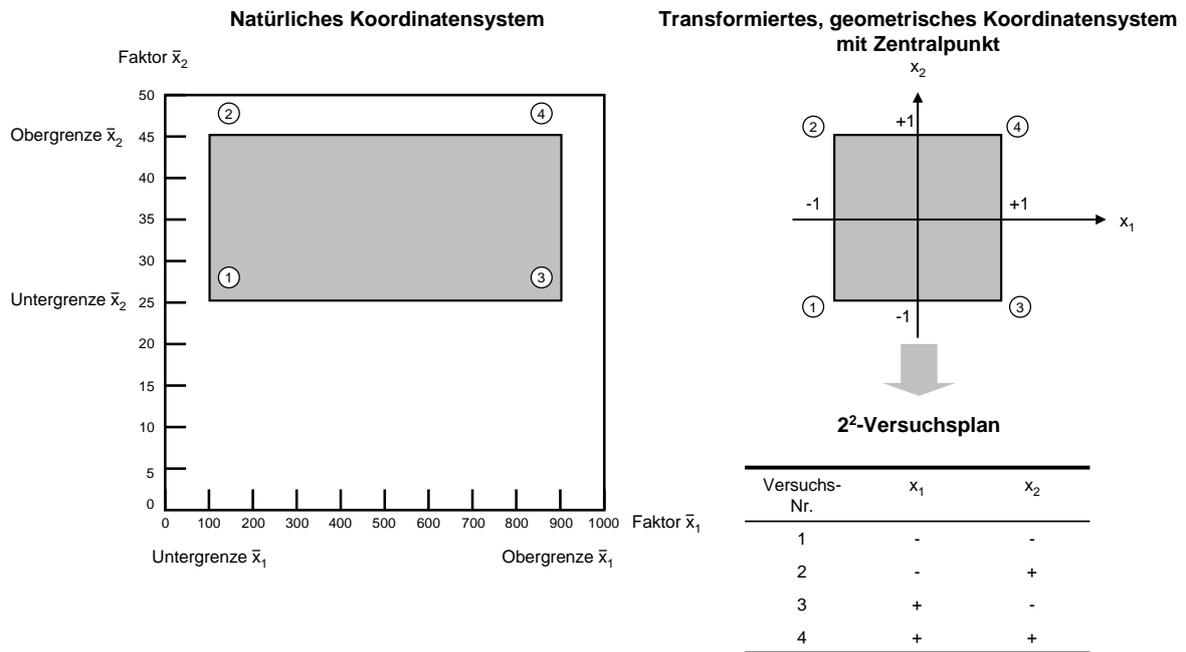


Abbildung 5-12: Normierung der Faktorstufen. Darstellung nach [Sche97].

	Designmatrix		Matrix der unabhängigen Parameter				Matrix der abhängigen Parameter			
	Parameter									
Versuchsnummer	x_1	x_2	I	x_1	x_2	x_1x_2	y_1	y_2	...	y_n
1	-	-	+	-	-	+				
2	-	+	+	-	+	-				
3	+	-	+	+	-	-				
4	+	+	+	+	+	+				
Effektmatrix										
				Haupteffekt 1	Haupteffekt 2	Wechselwirkungseffekt 12				

Tabelle 5-8: Gesamtmatrix für einen vollfaktoriellen 2²-Versuchsplan nach [Sche97]

- **Matrix der unabhängigen Parameter:** Neben den in der Designmatrix verwendeten Faktorstufen beinhaltet diese Matrix auch die Wechselwirkungen der Faktoren. Diese ergeben sich durch Multiplikation der für die Wechselwirkung zu berücksichtigenden Parameter. So berechnet sich beispielsweise die Wechselwirkung x_1x_2 der Parameter $x_1 = -1$ und $x_2 = -1$ zu $(-1) \cdot (-1) = (+1)$. Die so erhaltenen Vorzeichenkolonnen werden für die Berechnung der Effekte der unabhängigen Parameter auf die abhängigen Parameter benötigt.
- **Matrix der abhängigen Parameter:** Diese Matrix beinhaltet die Ergebnisse der Versuchsläufe der untersuchten abhängigen Parameter bzw. Systemleistungsgrößen y_1, y_2, \dots, y_n . Die Einträge dieser Matrix müssen gegebenenfalls durch Replikationen statistisch abgesichert werden.
- **Effektmatrix:** Die Effekte, die durch Variation der unabhängigen Parameter auf die abhängigen Parameter entstehen, werden in der Effektmatrix dargestellt. Für die Berechnung eines Effektes E_j wird die Summe der abhängigen Parameter auf der unteren Stufe von der Summe der abhängigen Parameter auf der oberen Stufe subtrahiert und das Ergebnis durch die halbe Versuchsanzahl dividiert:

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{sgn}(a_{ij}))y_i}{\frac{N}{2}} \quad \text{für } j = 1, 2, \dots, 2^k - 1, \quad (5.15)$$

Mit $\text{sgn}(x)$ wird die *Signumfunktion* (*Vorzeichenfunktion*) und mit a_{ij} der Eintrag in der i -ten Zeile und der j -ten Spalte der Matrix der unabhängigen Parameter bezeichnet. Je geringer der Betrag eines Effektes, desto geringer ist auch der Einfluss des untersuchten Parameters bzw. die Wechselwirkung von Parametern. Ein positives Vorzeichen von E_j bedeutet, dass der abhängige Parameter mit zunehmendem Wert des unabhängigen Parameters ansteigt. Umgekehrt bedeutet ein negatives Vorzeichen, dass der abhängige Parameter mit zunehmendem Wert des unabhängigen Parameters abfällt. Die Quantifizierung der Effekte ist auch Grundlage für die Durchführung der hier nicht näher betrachteten *Regressionsanalyse*. Für die Regressionsanalyse muss zusätzlich ein Absolutglied berechnet werden. Dieses berechnet sich aus der mit I (Identität) bezeichneten Spalte der Matrix der unabhängigen Parameter. Die Spalte I enthält lediglich positive Vorzeichen.

Der Aufwand der 2^k -Factor Design of Experiments Methode steigt mit der Anzahl der zu untersuchenden Parameter exponentiell an. Jedoch ermöglicht diese Methode eine nahezu vollständige Sensitivitätsanalyse der Parameter und ihrer Wechselwirkungen. Werden in

einem Versuchsplan $k \geq 5$ Parameter untersucht, kompensieren sich die stochastischen Effekte derart, dass sogar die einmalige Durchführung des Versuchsplans ausreichend ist und auf Replikationen verzichtet werden kann [Klep03].

Für die richtige Interpretation des Ergebnisses muss ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen dem unabhängigen und dem abhängigen Parameter bestehen (vgl. Abbildung 5-13).

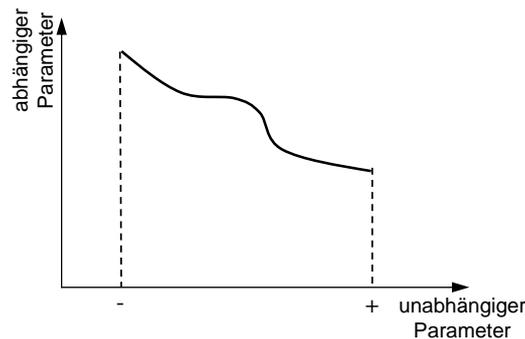


Abbildung 5-13: Unproblematische Nichtlinearität bei einem 2^k -Factor Design of Experiment

Bei einem hochgradig nichtlinearen Verlauf des abhängigen Parameters zwischen den Grenzen des unabhängigen Parameters (Abbildung 5-14) können entscheidende Zusammenhänge unentdeckt bleiben. Aus diesem Grund kann der 2^k -Versuchsplan um einen weiteren Versuch, den so genannten *Null-Versuch*, erweitert werden. Dabei befinden sich alle Faktoren in der Mitte ihrer Gültigkeitsbereiche, dem *Zentrumspunkt*. Aus dem 2^k -Versuchsplan wird mit dem Null-Versuch ein $2^k + 1$ -Versuchsplan [Acel96].

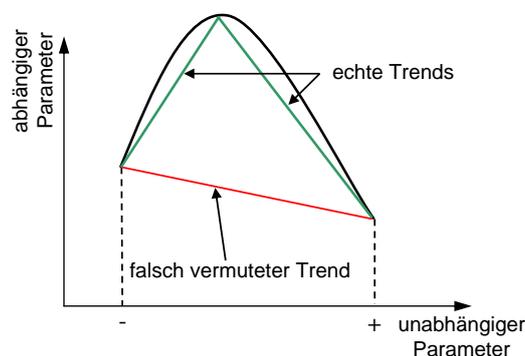


Abbildung 5-14: Problematische Nichtlinearität bei einem 2^k -Factor Design of Experiment

Die in Abbildung 5-15 gezeigte Nichtlinearität kann durch den Null-Versuch identifiziert werden. Dieser kann damit zur Validierung des linearen Verhaltens der Parameter genutzt

werden. Wird ein deutlich nichtlinearer Verlauf identifiziert, ist eine weitere Untersuchung beispielsweise durch ein 3^k -Factor Design of Experiments erforderlich.

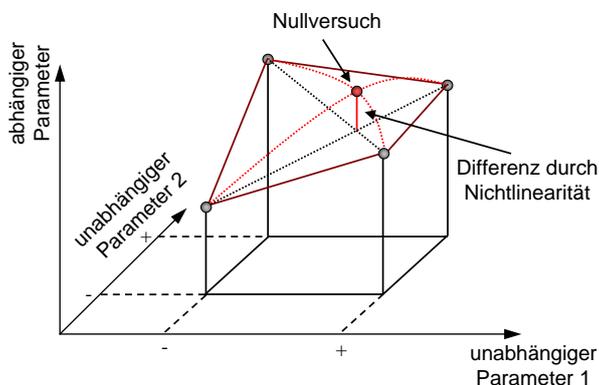


Abbildung 5-15: Nullversuch zur Ergänzung des 2^k -Versuchsplan. Darstellung in Anlehnung an [Acel96].

Teilfaktorielle Versuchsplanung

Bei einer großen Parameteranzahl und einem großen Aufwand der Versuchsdurchführung muss von der vollfaktoriellen auf die *teilmfaktorielle Versuchsplanung* übergegangen werden. Dabei werden die Haupteffekte und lediglich ausgewählte Wechselwirkungen von Parametern untersucht. Es wird häufig davon ausgegangen, dass Wechselwirkungen zwischen drei und mehr Parametern vernachlässigt werden können, da diese sich häufig nicht von Streuungen unterscheiden lassen. Außerdem sind solche Wechselwirkungen nur schwer nachzuvollziehen und grafisch nicht darstellbar. Die Anzahl der Versuche bei der teilfaktoriellen Versuchsplanung lässt sich durch

$$N = 2^{k-p}, \quad \text{mit } k > p, \quad k, p \in \mathbf{N} \quad (5.16)$$

berechnen, wobei k die Anzahl der Parameter und p die Anzahl der unberücksichtigten Wechselwirkungen bezeichnet.

Durch die deutlich verminderte Versuchsanzahl wird der Aufwand erheblich reduziert. Da eine Selektion der als relevant erachteten Wechselwirkungen erfolgt, wird ein teilfaktorieller Versuchsplan auch als *Screening-Versuchsplan* bezeichnet. Anstelle der unberücksichtigten Wechselwirkungen wird ein weiterer Parameter in den Versuchsplan aufgenommen. Abbildung 5-16 zeigt beispielhaft einen teilfaktoriellen Versuchsplan.

Der wesentliche Nachteil der teilfaktoriellen Versuchsplanung ist, dass der Effekt einer unberücksichtigten Wechselwirkung nicht von dem eines zusätzlich in den Versuchsplan

Versuch Nr.	A	B	C	AB	AC	BC	D = ABC	AD	BD	...	ABCD
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	...	+
2	+	+	-	+	-	-	-	-	-	...	+
3	+	-	+	-	+	-	-	-	+	...	+
4	+	-	-	-	-	+	+	+	-	...	+
5	-	+	+	-	-	+	-	+	-	...	+
6	-	+	-	-	+	-	+	-	+	...	+
7	-	-	+	+	-	-	+	-	-	...	+
8	-	-	-	+	+	+	+	-	-	...	+

Abbildung 5-16: Teilfaktorierter Versuchsplan

integrierten Parameters unterschieden werden kann. Die Wechselwirkung und der Parameter werden dann als *vermengt* bezeichnet.

Um diesen Nachteil zu begrenzen, kann zunächst die oben dargestellte Intensitäts-Beziehungsmatrix angewandt werden. Dadurch können irrelevante Wechselwirkungen zielgerichtet durch weitere Parameter ersetzt werden.

Bewertung der Methoden zur Sensitivitätsanalyse

In den vorangehenden Abschnitten wurden Ansätze zur Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Alle Methoden haben Vor- und Nachteile, die berücksichtigt werden müssen. In Tabelle 5-9 werden die Methoden der Sensitivitätsanalyse zusammengefasst und deren Vor- und Nachteile gegenübergestellt.

Bei der Infinitesimal Perturbation Analysis überwiegen die Nachteile die Vorteile deutlich. Die One-by-One Factor Methode kann für die Gewinnung erster Erkenntnisse angewandt werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn die zu wählenden Parametergrenzen noch festgelegt werden müssen oder die Sensitivität einzelner Parameter gezielt überprüft werden muss. Die Intensitäts-Beziehungsmatrix eignet sich für die Bestimmung der Relevanz von Wechselwirkungen und kann für eine vollständige Sensitivitätsanalyse lediglich ergänzend eingesetzt werden. So können die zu vernachlässigenden Wechselwirkungen der teilfaktoriellen Versuchsplanung mit dieser Methode identifiziert werden.

Unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile der Methoden wird die Sensitivitätsanalyse in zwei Stufen durchgeführt.

Methoden	Nachteile	Vorteile
Infinitesimal Perturbation Analysis	<ul style="list-style-type: none"> • Starke Einschränkungen • Hoher Anpassungsaufwand • Aufwändige Implementierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Einzelner Simulationslauf für Bestimmung von Sensitivitäten ausreichend
One-by-One Factor Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Aufwändig • Keine Identifikation von Wechselwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr einfach • Geeignet für die Gewinnung erster Erkenntnisse
Intensitäts-Beziehungsmatrix	<ul style="list-style-type: none"> • Bewertung enthält subjektive Komponente • Lediglich Abschätzung von Wechselwirkungen • Methode kann nur in Kombination mit weiteren Ansätzen für eine Sensitivitätsanalyse verwendet werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung von Expertenwissen • Einfache Anwendung • Aussagekräftige Darstellung
Vollfaktorielle Versuchsplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr hoher Aufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung von Wechselwirkungen • Systematische Parametervariation
Teilfaktorielle Versuchsplanung	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Aufwand • Vermengung von Haupt- und Wechselwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Aufwand gegenüber der vollfaktoriellen Versuchsplanung • Berücksichtigung von Wechselwirkungen • Systematische Parametervariation

Tabelle 5-9: Gegenüberstellung der Methoden zur Sensitivitätsanalyse

In der ersten Stufe wird die One-by-One-Factor-Methode für die Gewinnung erster Ansätze angewandt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden in der zweiten Stufe für die vollständige Sensitivitätsanalyse mittels vollfaktorieller Versuchsplanung angewandt. Lediglich bei einer großen Versuchsanzahl, verbunden mit einem hohen Aufwand bei der Ausführung des Versuchsplans, kommt die teilfaktorielle Versuchsplanung zum Einsatz. Die irrelevanten Wechselwirkungen werden dann mit der Intensitäts-Beziehungsmatrix identifiziert.

5.5.4 Entwicklung geeigneter Kennzahlen

Ein wichtiger und herausfordernder Schritt bei der Erzeugung simulationsbasierter Kennfelder ist die Entwicklung geeigneter Kennzahlen. Diese stellen eine möglichst breite Einsetzbarkeit der Kennfelder sicher. Allerdings kann für die Entwicklung der Kennzahlen keine verbindliche Methode vorgegeben werden. Vielmehr müssen diese für das zu realisierende Kennfeld spezifisch entwickelt werden.

Bei der Bildung von Kennzahlen werden Modellparameter aggregiert oder normiert. Häufig kann dies durch Verhältniszahlen erreicht werden (vgl. Abschnitt 5.2.1). Die Kennwerte

der Kennzahl werden dabei durch einen Bezugswert (idealer Betriebszustand z.B. Minimum bzw. Maximum der betrachteten Kennzahl) dividiert. Es gilt dann:

$$LG_{\text{Normiert}} = \frac{x}{x_{\text{Bezugswert}}} \quad (5.17)$$

Ein Beispiel einer häufig verwendeten, normierten Leistungsgröße ist der so genannte mittlere Flussgrad FG_m [NyWi03]. Dieser ergibt sich aus dem Quotienten der mittleren Durchlaufzeit DLZ_m und der minimalen Durchlaufzeit DLZ_{\min} (Gleichung 5.18):

$$FG_m = \frac{DLZ_m}{DLZ_{\min}} \quad (5.18)$$

Die Entwicklung und Anwendung von Kennzahlen wird anhand der in Abschnitt 5.6 dargestellten Beispiele simulationsbasierter Kennfelder konkretisiert.

5.5.5 Erstellung des Kennfeldes

Die Kennfelderstellung läuft in vier wesentlichen Schritten ab:

- Auswahl einer geeigneten Kennfelddarstellung
- Erstellung des erforderlichen Versuchsplans
- Ausführung der Experimente
- Verifikation und Validierung des Kennfeldes

Auswahl einer geeigneten Kennfelddarstellung

Zunächst muss eine geeignete Darstellung für das Kennfeld festgelegt werden. Die Zusammenhänge zwischen den Steuerparametern und den Kennwerten der Leistungsgrößen werden dabei derart abgebildet, dass eine einfache Anwendung unter Berücksichtigung des Erkenntniszieles möglich ist.

Grundsätzlich stehen die in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen und in Abbildung 5-1 gezeigten Darstellungsformen für Kennfelder zur Verfügung. Gegebenenfalls müssen die Achsen des Diagramms logarithmiert werden. Dadurch wird die Ablesbarkeit des Kennfeldes bei sehr großen Wertebereichen der Modellparameter sichergestellt. Können nicht alle Zusammenhänge dargestellt werden, ist die Entwicklung von *Kennfeldsystemen* oder *Kennfeldkatalogen* erforderlich. Kennfeldsysteme bestehen aus mehreren zusammenhängenden Kennfeldern. Kennfeldkataloge bestehen aus mehreren Kennfeldern oder Kennfeldsystemen,

die sich durch Variation eines oder mehrerer wichtiger Parameter unterscheiden, wodurch die Darstellung in nur einem Kennfeld oder Kennfeldsystem nicht zielführend ist.

Erstellung eines Versuchsplans

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse wird ein vollständiger Versuchsplan erstellt. In diesem werden ausschließlich die einflussreichen Steuerparameter berücksichtigt. Für die Erstellung des Versuchsplans wird eine *vollständige systematische Parametervariation* durchgeführt. Gegenüber der Abstufung der Parameter bei der Sensitivitätsanalyse erfolgt die Abstufung der Steuerparameter bei der systematischen Parametervariation deutlich granularer. Je größer die Nichtlinearität eines Zusammenhangs, desto geringer muss die Abstufung gewählt werden.

Ausführung der Experimente

Der Versuchsplan ist Grundlage für die Durchführung der zur Kennfelderstellung erforderlichen Versuchsläufe. Da zur Kennfelderstellung sehr viele Versuchsläufe erforderlich sind, muss dieser Vorgang weitgehend automatisiert werden.

Zu diesem Zweck wird die *COM-Schnittstelle* verwendet. Die COM-Schnittstelle ermöglicht den Datenaustausch zwischen Anwendungen und die Steuerung einer Anwendung aus einer anderen.

Bei COM handelt sich um ein objektbasiertes Programmiermodell nach dem Client-/Server-Prinzip. Durch die COM-Schnittstelle wird es dem COM-Client ermöglicht auf die Dienste des COM-Servers zuzugreifen. Die verwendeten Anwendungen müssen hierfür in der Lage sein, so genannte COM-Objekte zu erstellen und in einem definierten Format im Speicher abzulegen. Diese Objekte werden über die Schnittstelle zwischen den Anwendungen ausgetauscht. Die die Objekte enthaltenden Module werden als COM-Server bezeichnet.

Abbildung 5-17 verdeutlicht die Funktionsweise der COM-Schnittstelle anhand der Simulationssoftware Plant Simulation und MS Excel.

Die im Versuchsplan der Excel-Tabelle enthaltenen Parametrierungen des Plant Simulation Modells werden durch geeignete Befehle in *Visual Basic for Applications (VBA)* aus Excel in ein COM-Objekt umgewandelt und auf dem COM-Server abgelegt. Die Simulationssoftware Plant Simulation greift auf dieses COM-Objekt zu und wandelt die

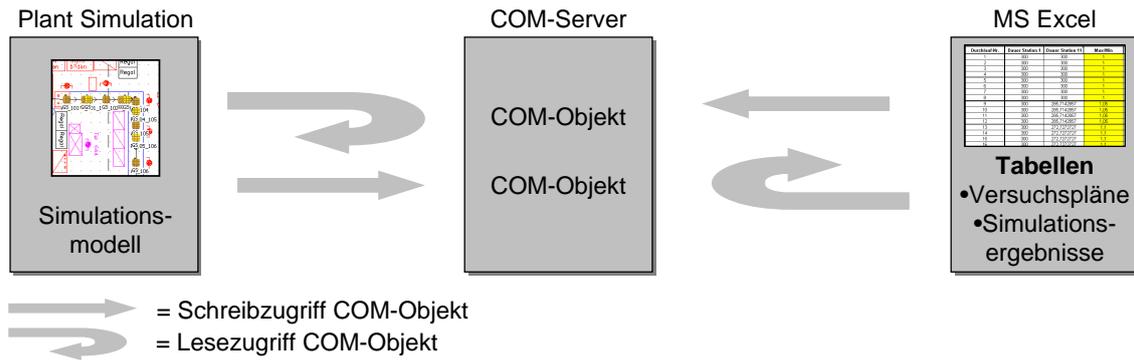


Abbildung 5-17: Funktionsweise der COM-Schnittstelle

darin enthaltenen Daten in Befehle um, die in der eigenen Programmiersprache *SimTalk* gelesen werden können. Diese Befehle parametrieren das Simulationsmodell entsprechend der Vorgaben des Versuchsplans. Die Steuerung der Simulation erfolgt ebenfalls über die COM-Schnittstelle. Nach Abschluss des Versuchslaufs werden die Ergebnisse auf demselben Weg aus dem Simulationsmodell ausgelesen und in der Excel-Tabelle gespeichert. Der Versuchsplan wird mit der COM-Schnittstelle automatisch ohne weitere Eingriffe des Anwenders ausgeführt.

Die simulativ ermittelten Leistungsgrößen werden in MS Excel weiterverarbeitet und für die eigentliche Kennfelderstellung verwendet. Die Ergebnisse werden außerdem dahingehend geprüft, ob allgemeingültige Aussagen abgeleitet werden können und ob die Untersuchung weiterer Fragestellungen erforderlich ist.

Verifikation und Validierung

Die resultierenden simulationsbasierten Kennfelder müssen verifiziert und validiert werden. Die Verifikation der simulationsbasierten Kennfelder erübrigt sich durch die Verifikation des generischen Simulationsmodells, welche durch die ausführliche Sensitivitätsanalyse für unterschiedliche Steuerparameter bestätigt wird.

Wichtig ist jedoch die Validierung der simulationsbasierten Kennfelder. Hierzu muss das resultierende Kennfeld nach Fertigstellung auf einige ausgewählte Beispiele angewandt und das Ergebnis dem einer systemspezifischen Simulation gegenübergestellt werden. Verläuft dieser Vergleich zufriedenstellend, kann das validierte simulationsbasierte Kennfeld bei künftigen Fragestellungen direkt angewandt werden.

5.6 Beispiele für simulationsbasierte Kennfelder

In Abschnitt 5.4.2 wird die grundlegende Unterscheidung zwischen systemneutralen und systemspezifischen simulationsbasierten Kennfeldern gemacht. Dieser Abschnitt stellt entsprechend dieser Unterscheidung mehrere Beispiele für simulationsbasierte Kennfelder dar, die unter Anwendung der in diesem Kapitel entwickelten Methodik erzeugt wurden.

5.6.1 Systemneutrale Kennfelder

Rüstillücke

Für die variantenreiche Produktion ist die Analyse der erforderlichen Rüstvorgänge von zentraler Bedeutung. Beim Rüsten wird eine Station den Anforderungen einer Produktvariante angepasst. Um den Rüstvorgang zeitlich zu optimieren, sieht das Produktionssystem zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme das so genannte *Schnellrüsten* vor. Der Rüstvorgang wird dabei in *internes* und *externes* Rüsten unterteilt. Nur das interne Rüsten erfordert den Stillstand der Station. Es besteht aus dem Abrüsten, Aufrüsten und sofern erforderlich einem Probelauf. Das externe Rüsten kann parallel zum Betrieb durchgeführt werden. Es umfasst die Vor- und Nachbereitung des Rüstvorgangs. Abbildung 5-18 veranschaulicht die beschriebene Unterteilung des Rüstvorgangs.

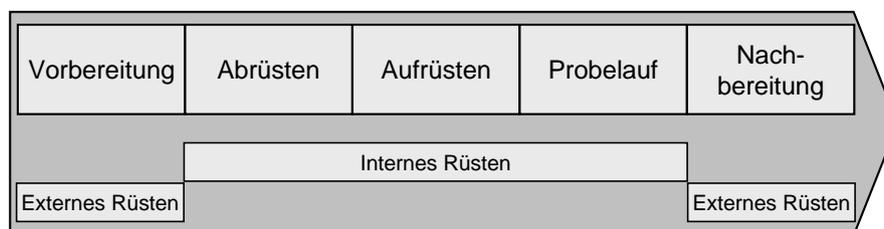


Abbildung 5-18: Gliederung des Rüstvorgangs nach [Früh90]

Neben der Optimierung des internen Rüstens ist die Verlagerung von Tätigkeiten des internen Rüstens in das externe Rüsten ein wichtiger Bestandteil des *Schnellrüstens*.

Rüstzeiten übersteigen die mittleren Stördauern der Stationen deutlich. Die Puffer können meist nicht derart dimensioniert werden, dass die Rüstzeiten kompensiert werden. Es werden folgende Rüststrategien unterschieden:

- Leerlauf des Systems mit anschließendem Rüsten aller Stationen
- Sukzessives Rüsten der Stationen

Bei verkoppelten Stationen einer Anlage wirkt sich der durch das Rsten verursachte Stillstand der Stationen auf die gesamte Anlage aus. Diese Stillstandszeit wird als *Rüstlücke (RL)* bezeichnet. Die Rüstlücke ist die Zeitspanne, die zwischen zwei am Linienende aufeinander folgenden Losen liegt. Der Rstvorgang wird durch die Mitarbeiter eines *Rsterpools* durchgeführt. Der Rsterpool enthält eine begrenzte Mitarbeiteranzahl, die maximal der Stationsanzahl entspricht.

Zur schnellen Bestimmung der Rüstlücke wird ein systemneutrales simulationsbasiertes Kennfeld entwickelt. Es werden zwei Produkttypen A und B unterschieden, die abwechselnd in die Linie eingelastet werden. Die Linie besteht aus einer Kette von durch identische Puffer entkoppelte Stationen. Die Bearbeitungszeiten der Produkttypen sind gleich, jedoch ist bei einem Loswechsel ein Umrüsten aller Stationen erforderlich. Abbildung 5-19 zeigt die schematische Darstellung des generischen Simulationsmodells, welches der Entwicklung des simulationsbasierten Kennfeldes zur Bestimmung der Rüstlücke zugrunde liegt. Die zu untersuchenden Steuerparameter und deren Beschränkungen sind in Tabelle 5-10 zusammengefasst.

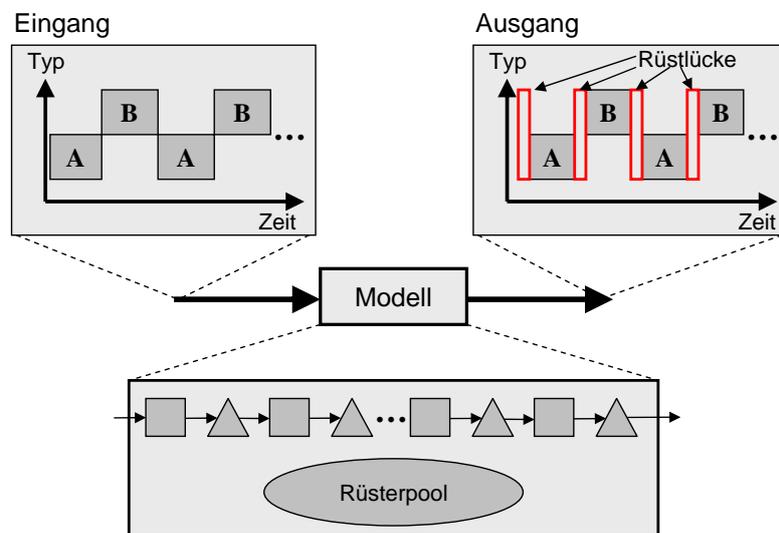


Abbildung 5-19: Schematische Darstellung des Rstmodells

Die Schwankung der Rstzeit wird mit der Gammaverteilung modelliert. Die Gamma-verteilung ermöglicht die Abbildung unterschiedlicher Verteilcharakteristiken durch den Variationskoeffizient VK (vgl. Anhang A.2). Die Schwankung der Taktzeit wird mit der Gleichverteilung modelliert.

Steuerparameter	Untere Grenze	Obere Grenze
Puffergröße	1	40
Bearbeitungszeit	5 s.	30 s.
MA (Rüster)	1	1 pro Station
Stationsanzahl	10	20
Verfügbarkeit	95%	100%
MTTR	2 min.	3 min.
Rüstzeitverteilung	keine	Gammaverteilung (VK = 0,8)
Taktzeitverteilung	keine	Gleichverteilung ($\pm 6\%$)
Rüstzeit	30 s.	6 min.

Tabelle 5-10: Steuerparameter mit Ober- und Untergrenzen

Mit den in Tabelle 5-10 dargestellten Parametern wird eine umfassende Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die interessierende Leistungsgröße ist die Rüstlücke. Das Ergebnis lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Schwankung der Rüstzeiten und die Wahl des Variationskoeffizienten der Gammaverteilung hat erheblichen Einfluss auf die Rüstlücke.
- Die Schwankung der Taktzeiten und der Störungen zeigt kaum Einfluss auf die Rüstlücke. Deshalb werden beide Parameter in der Folge als deterministisch angenommen.
- Alle weiteren Parameter müssen in den Folgeschritten weiter berücksichtigt werden.

Im nächsten Schritt werden geeignete Kennzahlen entwickelt. In diesem Fall kann hierzu zunächst eine Gleichung entwickelt werden, welche die direkte Berechnung der Rüstlücke im deterministischen Fall ermöglicht:

$$L = \underbrace{\left(\left\lceil \frac{1}{R} \right\rceil \cdot D \right)}_1 - \underbrace{\left((S - 1) \cdot (P + 1) \cdot B \right)}_2 + \underbrace{\left(\left((S - 1) \bmod (R \cdot S) \right) \cdot (P + 1) \cdot B \right)}_3 \quad (5.19)$$

Die Parameter dieser Gleichung sind:

- L ... Rüstlücke (Zielgröße)
- R ... Rüstergrad (MA/Station)
- D ... Rüstdauer pro Station
- S ... Stationsanzahl
- P ... Puffergröße
- B ... Bearbeitungszeit an jeder Station

Gleichung 5.19 setzt sich aus den Termen 1-3 zusammen. Diese bedeuten:

1. Maximale Arbeitszeit der MA je Loswechsel.
2. Leerlaufzeit des vorherigen Loses. Diese Zeit wird benötigt, bis das letzte Teil des aktuellen Loses die Anlage verlassen hat. Während dieser Zeit werden die ersten Stationen der Anlage bereits gerüstet.
3. Mit diesem Term wird der Zeitverlust berücksichtigt, der durch die Rüstvorgänge an den letzten Stationen der Anlage bei geringem Rüstergrad entstehen kann.

Wenn gilt,

$$R \cdot S \cdot (P + 1) \cdot B > D \quad (5.20)$$

ist die Rüstlücke $L = D$. Der Rüstvorgang der ersten Stationen ist abgeschlossen, bevor weitere Stationen einen Rüster anfordern, da schneller gerüstet werden kann, als sich die Station-Puffer-Elemente leeren. In diesem Grenzfall sind in der Regel mehr Rüster vorhanden als benötigt werden.

Aus Gleichung 5.19 ist ersichtlich, dass die Parameter P und B nur zusammen als Term $(P + 1) \cdot B$ auftreten. Dieser Term wird als Kennzahl K_1 definiert und kann als Verweilzeit der Teile in den Puffern aufgefasst werden.

$$K_1 = (P + 1) \cdot B \quad (5.21)$$

Zur Steigerung der Einsetzbarkeit des resultierenden Kennfeldes werden Verhältniszahlen eingeführt. Die Mitarbeiteranzahl wird ins Verhältnis zur Stationsanzahl gesetzt. Diese Verhältniszahl wird als der *Rüstergrad* R bezeichnet und ist auch in Gleichung 5.19 verwendet.

$$R = \frac{\text{MA-Anzahl}}{S} \quad (5.22)$$

Eine weitere Kennzahl K_2 wird gebildet, indem die Bearbeitungszeit in Relation zur Rüstzeit gesetzt wird:

$$K_2 = \frac{B}{D} \quad (5.23)$$

Für die Kennfelderzeugung müssen folgende Kennzahlen und Steuerparameter berücksichtigt werden:

- K_1
- K_2
- Rüstergrad
- Stationsanzahl
- Stochastik der Rüstdauer

Im nächsten Schritt wird ein simulationsbasiertes Kennfeldsystem für die Bestimmung der Rüstlücke erstellt. Dieses Kennfeldsystem besteht aus bis zu vier Kennfeldern. Das erste Kennfeld ermöglicht die Bestimmung der Rüstlücke bei deterministischen Rüstzeiten. Die weiteren drei Kennfelder ermöglichen die Bestimmung der Verlängerung der Rüstlücke durch stochastische Einflüsse bei Variationskoeffizienten von $VK = 0,4$, $VK = 0,6$ und $VK = 0,8$. Das Kennfeld ist für den hier interessierenden Rüstergrad von 30% gültig. Falls weitere Rüstergrade relevant sind, müssen weitere Kennfeldsysteme erstellt werden. Diese haben den gleichen Aufbau und werden zu einem Kennfeldkatalog zusammengefasst.

Abbildung 5-20 zeigt die Anwendung des Kennfeldsystems für den Variationskoeffizienten von $VK = 0,4$. Begonnen wird im unteren Kennfeld des Kennfeldsystems. Auf der nach unten weisenden senkrechten Achse wird der Wert der Kennzahl K_1 abgetragen. Der Schnittpunkt mit der zugehörigen Kennlinie (abhängig von der Stations-Kettenlänge und dem Parameter K_2) wird aufgesucht und damit der deterministische Wert der Rüstlücke auf der horizontalen Achse abgelesen.

Mit diesem Wert kann die Verlängerung der Rüstlücke durch stochastische Einflüsse bestimmt werden. Hierzu muss im Kennfeld für den betrachteten Variationskoeffizienten $VK = 0,4$ zunächst die zugehörige Kennlinie identifiziert werden (ebenfalls abhängig von der

Störungen. Ein wichtiges Ziel bei der Einführung von Produktionssystemen zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme ist die Minimierung der erforderlichen Systempuffer, um die Bestände zu reduzieren und damit die Durchlaufzeiten zu verringern. Deshalb ist die fundierte Dimensionierung der Puffer zunehmend wichtiger.

Es werden drei grundlegende Verkettungsarten unterschieden [WiHN04]:

- **Vollständige Entkopplung:** Bei einer vollständig entkoppelten Verkettung können sämtliche Verluste durch unbeschränkte Pufferkapazität kompensiert werden. Der Verfügbarkeitsengpass legt die Verfügbarkeit des Gesamtsystems fest (Abbildung 5-21a)
- **Starre Verkettung:** Eine starre Verkettung führt zu einer sehr schlechten Gesamtverfügbarkeit der Anlage, da Verkettungsverluste nicht kompensiert werden können (Abbildung 5-21b). Die Gesamtverfügbarkeit kann durch Multiplikation der Stationenverfügbarkeiten vereinfacht analytisch berechnet werden. Diese Berechnung impliziert die Annahme unabhängiger Störungen der Stationen eines Fertigungssystems. Ein weiterer Ansatz für die Berechnung der Gesamtverfügbarkeit ohne diese vereinfachende Annahme wird in [BuRE93] diskutiert.
- **Elastische Entkopplung:** Abbildung 5-21c zeigt eine elastische Verkettung, bei der die Entkopplung durch begrenzte Pufferkapazitäten erfolgt. Diese Verkettungsart wird in realen Systemen am häufigsten verwendet, kann jedoch analytisch nicht ausgewertet werden.

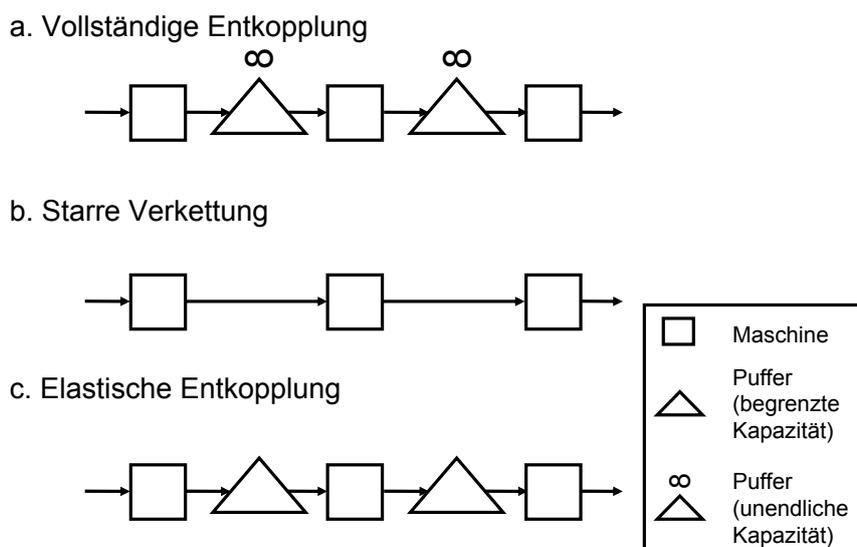


Abbildung 5-21: Verkettungsarten von Maschinen bzw. Stationen nach [WiHN04]

Die Auswertung der Verluste durch die Verkettung von Stationen wird in der Praxis sehr häufig und in verschiedenen Phasen der Fertigungsplanung benötigt. Die Simulation ist eine etablierte Methode für die Modellierung und Analyse der Verkettung von Systemen. Um spezifische Simulationsuntersuchungen und den damit verbundenen Aufwand einzusparen, wird ein systemneutraler Kennfeldkatalog erstellt.

Die Kennfelder verwenden die durch Multiplikation der Stationenverfügbarkeiten erhaltene Gesamtverfügbarkeit einer Anlage unter Annahme einer starren Verkettung als Eingangsgröße. Das Ergebnis ist ein korrigierter Wert der Gesamtverfügbarkeit, welcher für die elastische Entkopplung des Systems gilt.

Zur verbesserten Einsetzbarkeit der Kennfelder, wird die Kennzahl C entwickelt. Diese errechnet sich folgendermaßen aus der Taktzeit t_M der Stationen, der durchschnittlichen Puffergröße PG im Fertigungssystem sowie der mittleren Stördauer $MTTR$:

$$C = \frac{t_M \cdot PG}{MTTR} \quad (5.24)$$

Die Kennzahl C ermöglicht die Berücksichtigung der Kompensation wachsender mittlerer Stördauern durch erhöhte Taktzeiten oder vergrößerte Puffer. Für die Entwicklung der Kennfelder wird der Bereich der C -Werte von $C = 0 \dots \infty$ berücksichtigt.

Abbildung 5-22 zeigt das simulationsbasierte Kennfeld für die Bestimmung der Gesamtverfügbarkeit elastisch entkoppelter Fertigungssysteme bei einer Anlage bestehend aus zehn Stationen sowie die Anwendung des Kennfeldes anhand eines Beispiels. Die Kennfelder sind jeweils für eine Stationenzahl gültig und werden zu einem Kennfeldkatalog zusammengefasst.

Ein konkretes Anwendungsbeispiel dieses Kennfeldkataloges ist die rechnerunterstützte Planung von verketteten Fertigungssystemen mit der Digitalen Fabrik [FrHe06b]. Ausgangspunkt ist ein statisches Fertigungssystemmodell. Die Verkettung mehrerer Stationen wird durch ein entsprechendes Strukturelement realisiert.

Zur Berechnung der Kapazität des Fertigungssystems ist die Eingabe kapazitätsrelevanter Daten (z.B. mittlere Stördauer, technische Zuverlässigkeit, Schichtmodell, Ausschuss- und Nacharbeitsrate etc.) auf Stationesebene erforderlich. Abbildung 5-23 zeigt das statische Fertigungssystemmodell und einen Auszug der Maske für die Eingabe kapazitätsrelevanter Daten.

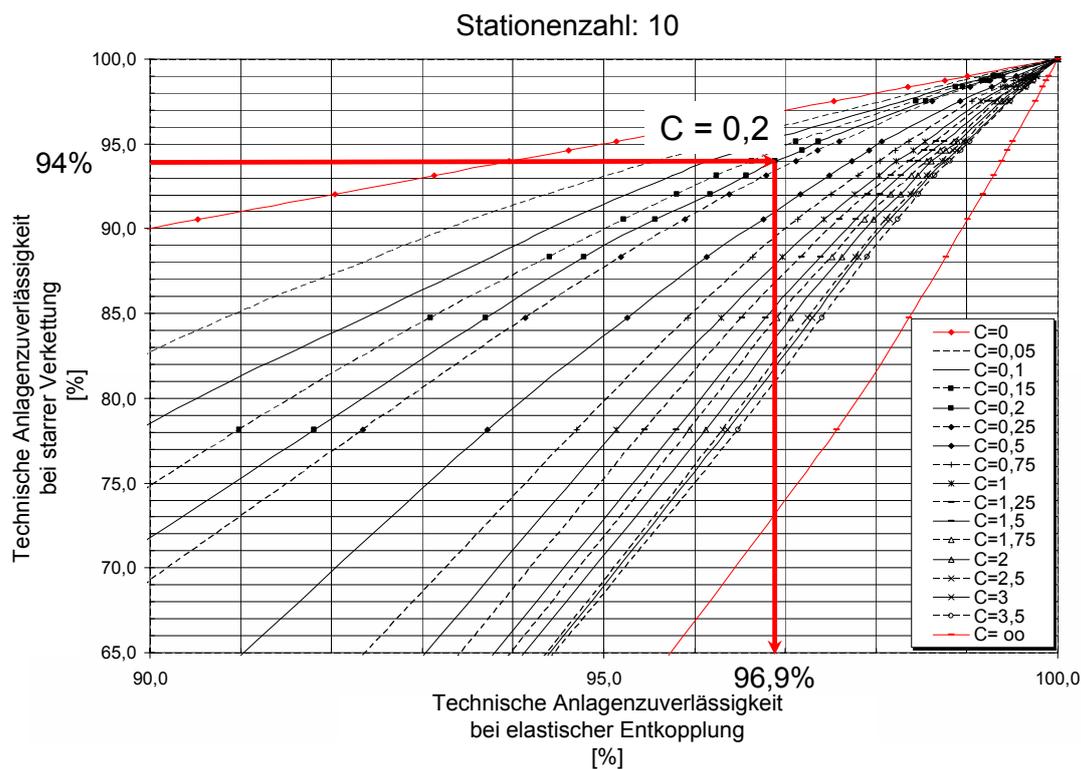


Abbildung 5-22: Simulationsbasiertes Kennfeld zur Bestimmung der technischen Zuverlässigkeit eines elastisch entkoppelten Fertigungssystems. Die technische Anlagenzuverlässigkeit bei starrer Verkettung und der durch Gleichung 5.24 bestimmte C -Wert stellen die erforderlichen Eingangsgrößen dar.

Die technische Zuverlässigkeit ist ein äußerst wichtiger Wert für die Kapazitätsberechnung einer Linie. Für das korrekte Festlegen eines Zuverlässigkeitswertes auf Linienebene müssen die Verkettungseffekte berücksichtigt werden, was durch Einsatz des in Abbildung 5-22 dargestellten simulationsbasierten Kennfeldes möglich ist.

Durch Anwendung des Kennfeldkataloges kann die voraussichtliche technische Kapazität eines Fertigungssystems erheblich genauer und realistischer bestimmt werden. Im in Abbildung 5-22 dargestellten Beispiel liegt die unter Einsatz des Kennfeldes bestimmte Kapazität um 27% über der Kapazität bei der Annahme einer starren Verkettung. Die dadurch verbesserte Planungsqualität vermeidet Fehlinvestitionen bei sehr geringem zusätzlichem Aufwand.

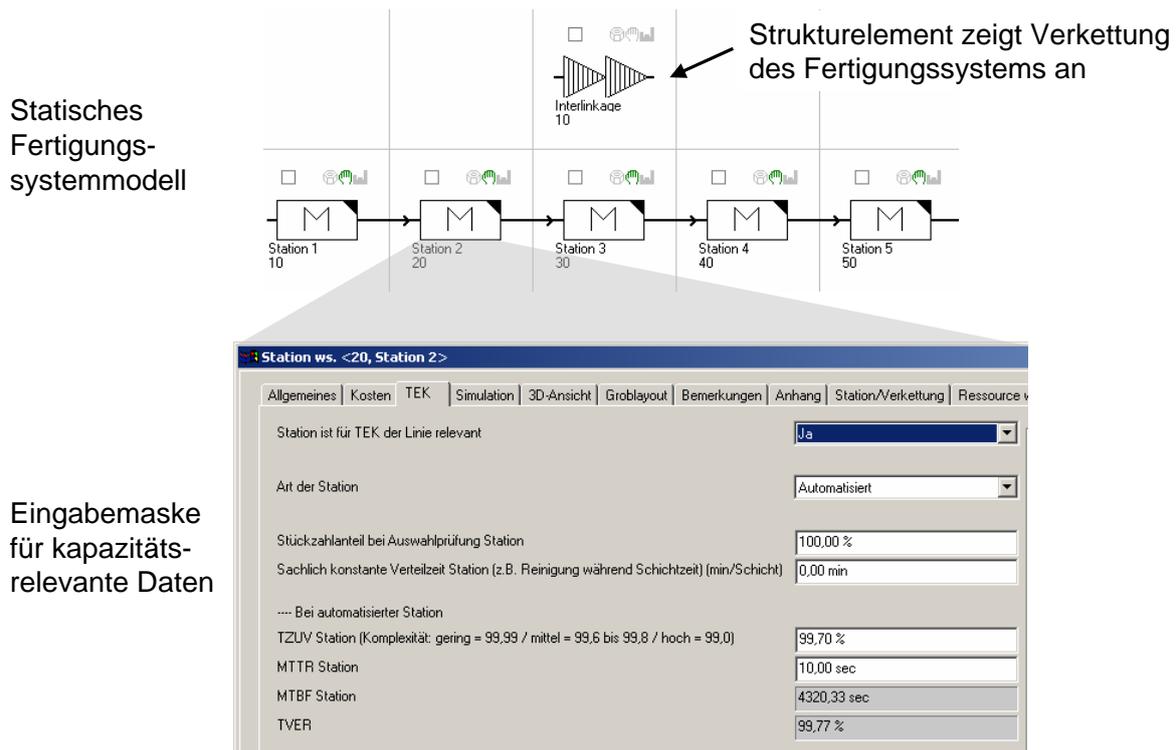


Abbildung 5-23: Statisches Fertigungssystemmodell und ein Auszug der Eingabemaske für kapazitätsrelevante Daten

5.6.2 Systemspezifische Kennfelder

Programmplanung

In Tabelle 5-2 ist der Nutzen systemspezifischer simulationsbasierter Kennfelder dargestellt. Diese eignen sich insbesondere für die Unterstützung der operativen Auftragseinsparung und die Quantifizierung der Sensitivitäten von Systemleistungsgrößen auf die Änderung bestimmter Randbedingungen.

Die in Abschnitt 5.5 entwickelte Methodik für die effiziente Erstellung simulationsbasierter Kennfelder unterstützt auch die Erstellung systemspezifischer Kennfelder. Jedoch ist der Aufwand einzelner Schritte deutlich geringer. Es ist beispielsweise nicht erforderlich, intensive Sensitivitätsanalysen durchzuführen, da eine vorliegende Fragestellung die Darstellung aller interessierenden relevanten Zusammenhänge ermöglicht. Außerdem wird nur der Wertebereich der Parameter untersucht, der von unmittelbarem Interesse für das betrachtete Fertigungssystem und dessen mögliche Betriebszustände ist.

In diesem Beispiel wird die Fertigung eines Bauteils einer Einspritzpumpe betrachtet. Das Bauteil durchläuft insgesamt sieben Prozesse in fünf Fertigungs- bzw. Prüfbereichen. Der

Fertigungsbereich A wird dabei drei mal durchlaufen. Dieser Ablauf ist in Abbildung 5-24 schematisch dargestellt.

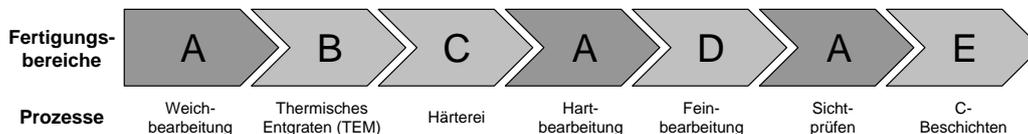


Abbildung 5-24: Schematische Darstellung des Fertigungsablaufes für das betrachtete Bauteil

Das Produktionsprogramm umfasst insgesamt drei Varianten (Variante I-III). Die Bearbeitungszeiten in den Anlagen der Fertigungsbereiche unterscheiden sich zwischen diesen Varianten zum Teil erheblich. Aufgrund einer nachgelagerten Montage ist die Liefertreue eine wesentliche Leistungsgröße der Fertigung. Die Durchlaufzeit muss deshalb sehr gering, insbesondere jedoch vorhersehbar sein. Hierfür muss der zu erwartende Bestand bekannt sein.

Zur Analyse des Fertigungssystems wird zunächst ein detailliertes Simulationsmodell aufgebaut. Mit diesem Modell lassen sich zielführende Maßnahmen zur Bestandsreduktion ableiten.

Die zu fertigende Bauteilanzahl schwankt darüber hinaus erheblich. Die Fertigung wird deshalb mit variabler Ausbringung betrieben. Zusätzlich können diese Schwankungen durch Anpassung der Schichtzeiten kompensiert werden. Die Fertigung wird sowohl im 24h-Betrieb in drei Schichten als auch in zwei Schichten betrieben.

Aufgrund charakteristischer Prozessanforderungen können die Bestände lediglich unter Anwendung der Simulation bestimmt werden. So erfordern die Anlagen bestimmter Prozesse Warmlaufphasen bis zu sechs Stunden. Beim 24h-Betrieb fällt diese Warmlaufphase lediglich zum Wochenbeginn an. Bei der Fertigung in zwei Schichten muss sie jedoch täglich berücksichtigt werden. Außerdem werden die Fertigungsbereiche insgesamt nicht mit einheitlichen Schichtmodellen betrieben. Das Simulationsmodell unterscheidet sich deshalb in Abhängigkeit der verwendeten Schichtmodelle erheblich.

Zur Prognose der Bestände wird ein für dieses System spezifisches Kennfeld generiert. Hierfür müssen folgende Wertebereiche für die erforderlichen Stückzahlen berücksichtigt werden:

- Zwei-Schichtbetrieb: 1200-1500 Stück/d

- Drei-Schichtbetrieb: 2000-2600 Stück/d

Es müssen drei Variantenzusammensetzungen der Produktionsprogramme berücksichtigt werden. Durch die unterschiedlichen Bearbeitungszeiten der Varianten I-III unterscheiden sich die zu erwartenden Bestände zum Teil erheblich. Je größer der Anteil der Variante II, desto größer sind die Bestände. Tabelle 5-11 fasst die untersuchten Produktionsprogramme zusammen.

	Programm 1 (84-15-1)	Programm 2 (67-28-5)	Programm 3 (50-45-5)
Variante I [%]	84	67	50
Variante II [%]	15	28	45
Variante III [%]	1	5	5
Gesamt [%]	100	100	100

Tabelle 5-11: Für die Kennfelderzeugung zu berücksichtigende Produktionsprogramme

Fertigungsbereich A ist der größte Bereich, der von allen Teilen durchlaufen wird. Der Bestand in diesem Bereich ist deshalb besonders kritisch. Im Kennfeld ist der Bestand von Fertigungsbereich A als Teilmenge des Gesamtbestandes ebenfalls verfügbar. Fertigungsbereich A wird darin als *kritischer Bereich* bezeichnet.

Eine rasche Bestimmung der Bestände ermöglicht die Terminierung von Aufträgen. Die Bestände sind im Wesentlichen abhängig von

- dem verwendeten Produktionsprogramm,
- der erforderlichen Stückzahl und dem damit festgelegten Schichtmodell.

Diese Zusammenhänge lassen sich in einem einfachen Kennfeld darstellen. Zur besseren Übersichtlichkeit und damit Ablesbarkeit ist es sinnvoll, für jedes Produktionsprogramm ein eigenständiges Kennfeld zu erstellen und diese zu einem Kennfeldkatalog zusammen zu fassen, da die Bestände bei den verwendeten Produktionsprogrammen zum Teil erheblich schwanken. Abbildung 5-25 zeigt beispielhaft das Kennfeld für das Produktionsprogramm 1. Dieses sowie die weiteren Kennfelder des Kennfeldkataloges zu diesem Beispiel befinden sich im Anhang B.3.

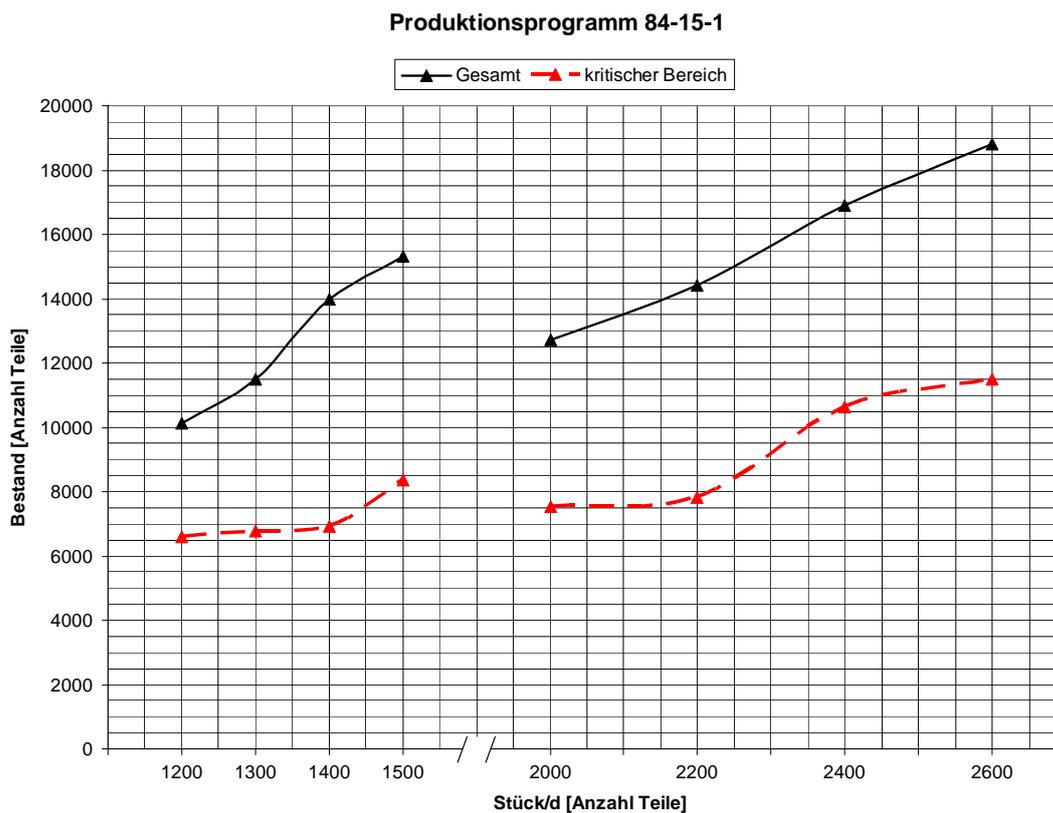


Abbildung 5-25: Kennfeld für das Produktionsprogramm 1

Durch die Visualisierung der Sensitivitäten können die Auswirkungen von Stückzahländerungen im Rahmen der vorgegebenen Grenzen sehr schnell bewertet werden. Dies ist ein wesentlicher Vorteil von Kennfeldern gegenüber anderen Darstellungsformen oder Berechnungsarten.

5.7 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel werden simulationsbasierte Kennlinien und Kennfelder eingeführt. Diese stellen im Fall hoher Untersuchungshäufigkeiten und geringer Anforderungen an die Detaillierung einen geeigneten Lösungsansatz dar, der über wesentliche Potenziale bei der Unterstützung von Fabrik- und Fertigungsplanungsaufgaben verfügt.

Die Unterscheidung von systemspezifischen und systemneutralen simulationsbasierten Kennfeldern ist von zentraler Bedeutung.

Systemspezifische Kennfelder lassen sich durch Ausführung zahlreicher ausgewählter Versuchsläufe mit begrenztem Aufwand erstellen. Für systemneutrale Kennfelder ist der Er-

stellungsaufwand durch die hohe Anzahl an erforderlichen Versuchsläufen sehr hoch. Aus diesem Grund ist eine Methodik erforderlich, die den Aufwand für die Erstellung insbesondere systemneutraler simulationsbasierter Kennfelder minimiert.

Diese Methodik wird im vorliegenden Kapitel entwickelt und evaluiert. Sie bietet erhebliches Potenzial für die Aufwandsreduktion bei der Erstellung simulationsbasierter Kennfelder.

Simulationsbasierte Kennfelder haben sich in der Praxis bereits bewährt. In diesem Kapitel werden ausgewählte Beispiele sowohl für systemspezifische als auch für systemneutrale simulationsbasierte Kennfelder vorgestellt.

Anhand der Problematik der *Rüstlücke* wird die Anwendung der Methodik zur effizienten Erstellung von Kennfeldern ausführlich aufgezeigt. Das resultierende Kennfeld eignet sich hervorragend zur schnellen Bestimmung der zu erwartenden Rüstlücke mit und ohne Berücksichtigung stochastischer Einflüsse.

Am Beispiel *Planung verketteter Systeme* wird verdeutlicht, wie simulationsbasierte Kennfelder die Planung in der Digitalen Fabrik unterstützen können. Dabei wird die technische Kapazität einer Anlage statisch berechnet. Hierzu wird die technische Anlagenzuverlässigkeit zunächst unter Annahme einer starren Verkettung der Stationen bestimmt. Das Kennfeld ermöglicht die Korrektur dieses Wertes der Anlagenzuverlässigkeit für die Annahme elastisch entkoppelter Stationen. Dadurch erfolgt eine deutlich genauere Berechnung der Kapazität, wodurch die Planungsqualität gesteigert und die Überdimensionierung des resultierenden Fertigungssystems vermieden werden kann.

Das Beispiel *Produktionsplanung* zeigt eine Einsatzmöglichkeit systemspezifischer Kennfelder. Durch vorab klar vorgegebene Randbedingungen wird die Erstellung des Kennfeldes erleichtert. Dennoch können zahlreiche Bausteine der Methodik für die Erstellung simulationsbasierter Kennfelder auch bei systemspezifischen Kennfeldern angewandt werden. Mit dem systemspezifischen Kennfeld werden die kritischen Leistungsgrößen des Fertigungssystems (Bestand bzw. Durchlaufzeit) für verschiedene Betriebszustände aufwandsarm bestimmt.

6 Teilautomatischer Simulationsmodellenaufbau

6.1 Einführung

Bei geringer Untersuchungshäufigkeit und gleichzeitig hohem Detaillierungsgrad ist der Aufbau eines spezifischen Simulationsmodells erforderlich. Um dieses teilweise oder vollständig automatisch erzeugen zu können, muss eine geeignete Schnittstelle vorhanden sein.

Um die Simulationsmodellerstellung zu automatisieren wurden sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie zahlreiche Anstrengungen unternommen.

Erste Ansätze sind durch die Kopplung von Datenverarbeitungssystemen mit Simulationssystemen entstanden [Spla95]. Weiterentwicklungen führten zur Entwicklung und Implementierung eines Konzeptes zum automatischen Aufbau von Simulationsmodellen auf Basis von standardisierten Modellen und Modellbausteinen [BFWG00]. Diese Konzepte basieren auf einer heterogenen Systemlandschaft, in welcher ein Datenaustausch mangels geeigneter Schnittstellen erheblich erschwert ist. Die Möglichkeit der automatischen Simulationsmodellerstellung einer bestehenden Fertigung, basierend auf Echtzeitproduktionsdaten und einer Bausteinbibliothek, ist in [KLWW03, KaWW06] verfügbar. Dieses Konzept setzt jedoch ein bereits existierendes Fertigungssystem voraus und eignet sich deshalb nicht für den Einsatz in der Fabrik- und Fertigungsplanung.

Die Rechnerunterstützung der Fabrik- und Fertigungsplanung mit der Digitalen Fabrik stellt eine Voraussetzung dar, welche den automatischen Aufbau von Simulationsmodellen durch das Konzept der zentralen Datenhaltung sowie durch statische Fertigungssystemmodelle ermöglicht und unterstützt (vgl. Abschnitt 2.2).

Erste Ansätze der automatischen Simulationsmodellerstellung unter Anwendung der Digitalen Fabrik basieren auf deren Prozessmodell sowie unterlagerten Simulationsmodellen, wie beispielsweise Roboter- und Ergonomiesimulationen der Maschinenebene [BIFr01]. Datenstrukturen unter Anwendung so genannter *Features* stellen einen weiteren Ansatz dar, Simulationswerkzeuge in die Digitale Fabrik zu integrieren [Fran03, BIFr04].

Ein weiterer, viel versprechender Ansatz für die automatische Simulationsmodellerstellung verwendet so genannte *Verbindungselemente*, welche in die Digitale Fabrik einge-

bunden werden. Sie bieten die Möglichkeit, zusätzliche Informationen über Materialflüsse zu hinterlegen, welche für eine eindeutige Simulationsmodellerstellung benötigt werden. Dieses Konzept ist insbesondere dann von Interesse, wenn bei der Planung mit der Digitalen Fabrik Produktvarianten im Fokus stehen. Eine ausführliche Beschreibung ist in [BlZe05, Zenn06] verfügbar.

Für die Integration von Simulationswerkzeugen in die Digitale Fabrik existieren darüber hinaus bereits kommerzielle Lösungen, die dem selbst definierten Anspruch weitgehend allgemeingültiger Einsetzbarkeit bislang allerdings nicht genügen [BBHZ02]. Außerdem ist die Integration von Simulations- und Planungswerkzeugen unterschiedlicher Softwareanbieter problematisch. Hierdurch ergeben sich weitere Einschränkungen.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz basiert auf statischen Fertigungssystemmodellen der Digitalen Fabrik. Diese werden unter Anwendung definierter Workflows erzeugt und bieten dadurch einen ausgezeichneten Ansatzpunkt für die automatische Modellgenerierung.

6.2 Integration der Simulation in die Digitale Fabrik

Die Hauptziele, um die Integration der Simulation in die Digitale Fabrik zu erreichen, beinhalten die Automatisierung der Simulationsmodellerstellung sowie die Bereitstellung der resultierenden Simulationsergebnisse für den Fertigungsplaner.

Für die Entwicklung eines hierfür geeigneten Schnittstellenkonzeptes ist es zunächst sinnvoll, zwischen *Informationsintegration* und *Systemintegration* zu unterscheiden. Unter Informationsintegration wird der Austausch von relevanten Informationen zwischen verschiedenen Systemen verstanden, während eine Systemintegration die Kontrolle eines Systems aus einem anderen ermöglicht [Bern00]. Abbildung 6-1 verdeutlicht diese begriffliche Abgrenzung.

Die Systemintegration stellt gegenüber der Informationsintegration einen höheren Integrationsgrad dar. Da sich die Stärken der Softwareanbieter meist in einzelnen Funktionen bündeln und eine unternehmensweit homogene Softwarelandschaft nicht vorausgesetzt werden kann, ist das Ziel der Systemintegration nur schwer erreichbar. In dem in dieser Arbeit vorgestellten Schnittstellenkonzept ist aus diesen Gründen lediglich eine Informationsintegration möglich.

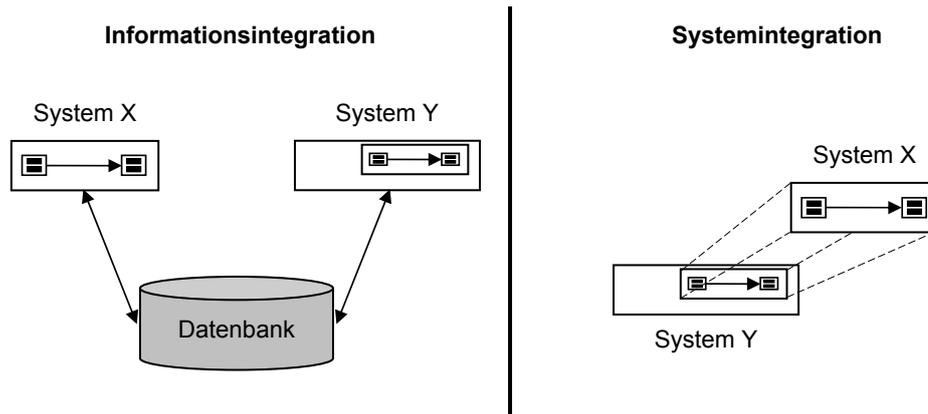


Abbildung 6-1: Unterscheidung von Informationsintegration und Systemintegration nach [Bern00].

6.3 Statische Fertigungssystemmodelle der Digitalen Fabrik

6.3.1 Detaillierungsgrad von statischen Fertigungssystemmodellen und Simulationsmodellen

Die grundlegende Schwierigkeit bei der Automatisierung des Simulationsmodellbaus ist die Differenz des Detaillierungsgrades zwischen dem statischen Fertigungssystemmodell der Digitalen Fabrik und dem Simulationsmodell. In Abbildung 6-2 wird dargestellt, wie das Verhältnis von Detaillierungsgrad und Planungsqualität

- ohne konsequenten Methodeneinsatz,
- durch Einsatz der Digitalen Fabrik und
- durch Einsatz der Simulation

zusammen hängt.

In jedem der genannten Fälle existiert ein optimales Verhältnis von Detaillierungsgrad und Planungsqualität. Eine Abweichung hiervon ergibt sich durch mangelnde Planungsdatenqualität. Genauso ergibt sich eine Abweichung von diesem optimalen Verhältnis durch einen unangepassten Detaillierungsgrad des jeweiligen Modells.

Zur Steigerung des Detaillierungsgrades sind folgende Maßnahmen erforderlich:

- **Disaggregation von Planungsdaten:** Hierzu werden aggregierte Daten durch zusätzliche Angaben detailliert bzw. *disaggregiert*. Ein Beispiel sind Gliederungszahlen (vgl. Abschnitt 5.2.1) wie die technische Verfügbarkeit *TVER*, die das Verhältnis der störungsfreien Laufzeit zur Gesamtlaufzeit einer Station oder Anlage angibt:

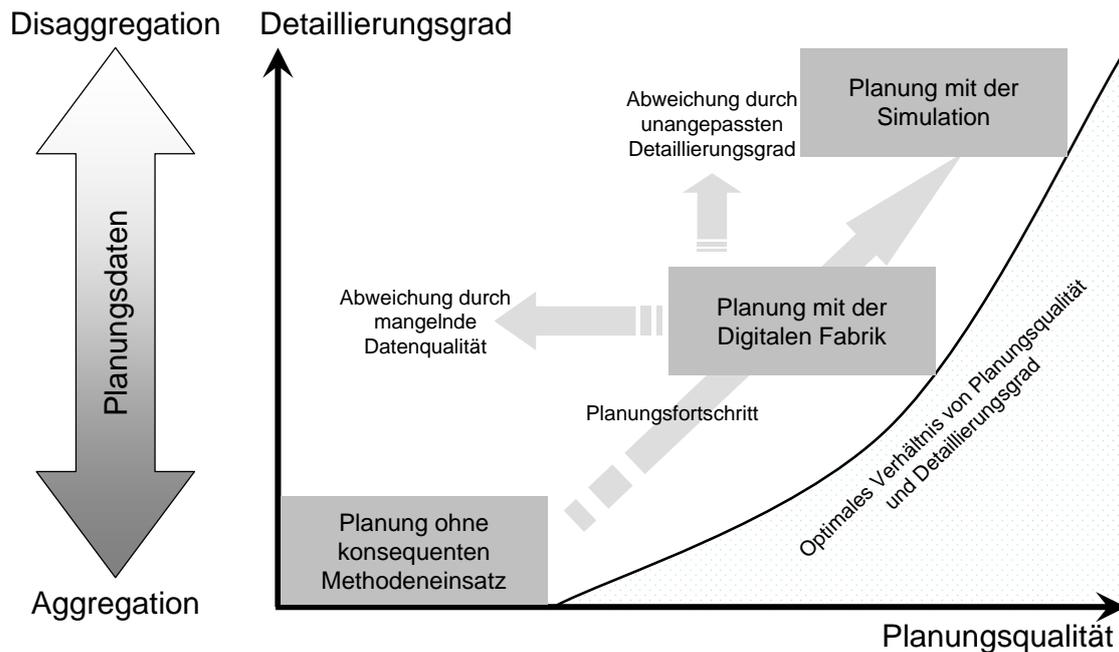


Abbildung 6-2: Zusammenhang von Detaillierungsgrad und erzielbarer Planungsqualität ohne konsequenten Methodeneinsatz, durch Einsatz der Digitalen Fabrik und durch Einsatz der Simulation.

$$\text{TVER} = \frac{\text{störungsfreie Laufzeit}}{\text{Gesamtlaufzeit}} \quad (6.1)$$

Für statische Berechnungen ist es unerheblich, ob sich ein bestimmter Wert der technischen Verfügbarkeit durch wenige und lange oder durch zahlreiche und kurze Stillstände einer Station oder Anlage ergibt. Das mit der Simulation analysierbare, zeitdynamische Verhalten des Systems kann sich jedoch erheblich unterscheiden. Abbildung 6-3 zeigt beispielhaft den unterschiedlichen Verlauf des Bestandes bei gleicher technischer Verfügbarkeit mit wenigen langen und zahlreichen kurzen Stillständen.

- **Hinzufügen von Planungsdaten:** Für die Erstellung der Simulation existieren simulationsrelevante Daten, die bei der Planung mit der Digitalen Fabrik nicht erforderlich sind, sowie mittelbar verwendbare Daten, die vor der Simulationsmodellierung weiter spezifiziert werden müssen. In Abschnitt 6.4.1 wird darauf detailliert eingegangen.

Abbildung 6-4 verdeutlicht das Detaillierungsgrad-Delta, welches für die automatische Simulationsmodellierung überwunden werden muss.

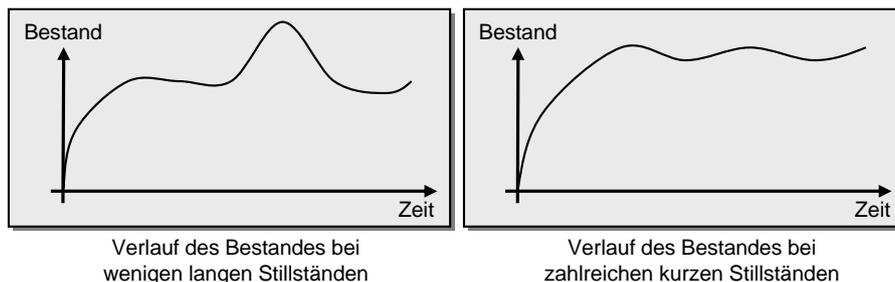


Abbildung 6-3: Zeitdynamisches Verhalten des Bestandes bei identischer technischer Verfügbarkeit und unterschiedlicher Störcharakteristik

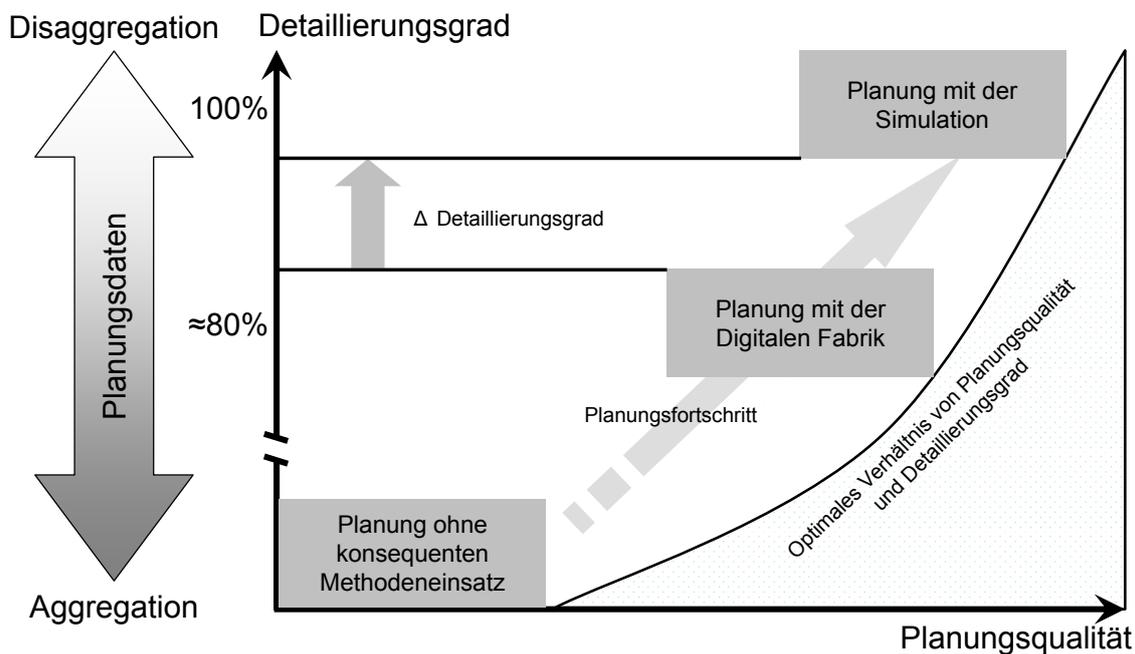


Abbildung 6-4: Kernproblematik beim automatischen Simulationsmodelleraufbau. Die Differenz des Detaillierungsgrades zwischen dem statischen Fertigungssystemmodell und dem Simulationsmodell muss überwunden werden.

6.3.2 Modellierungsleitfaden der Digitalen Fabrik

Für die Durchführung von Planungsaufgaben mit der Digitalen Fabrik ist die Einhaltung eines definierten *Modellierungsleitfadens* bzw. die Einhaltung definierter Workflows erforderlich. Diese Workflows erfordern eine Anpassung an die Planungsvorgehensweisen eines Unternehmens, was auch die Anpassung der verwendeten Software zur Realisierung der Digitalen Fabrik beinhaltet (vgl. Abschnitt 2.2.2). Gleichzeitig werden Planungsprozesse im Unternehmen standardisiert und verankert.

Im so genannten *Modellierungskatalog* werden relevante Modellierungsfälle für statische Fertigungssystemmodelle festgelegt. Der Modellierungskatalog ist ein wichtiger Teil des

Modellierungsleitfadens. An bestimmten, sinnvollen Stellen (Meilensteinen) greift der Modellierungsleitfaden auf den Modellierungskatalog zurück, wie beispielsweise bei der Erstellung der Fertigungskonzepte [Blum06] (vgl. Abbildung 6-5).

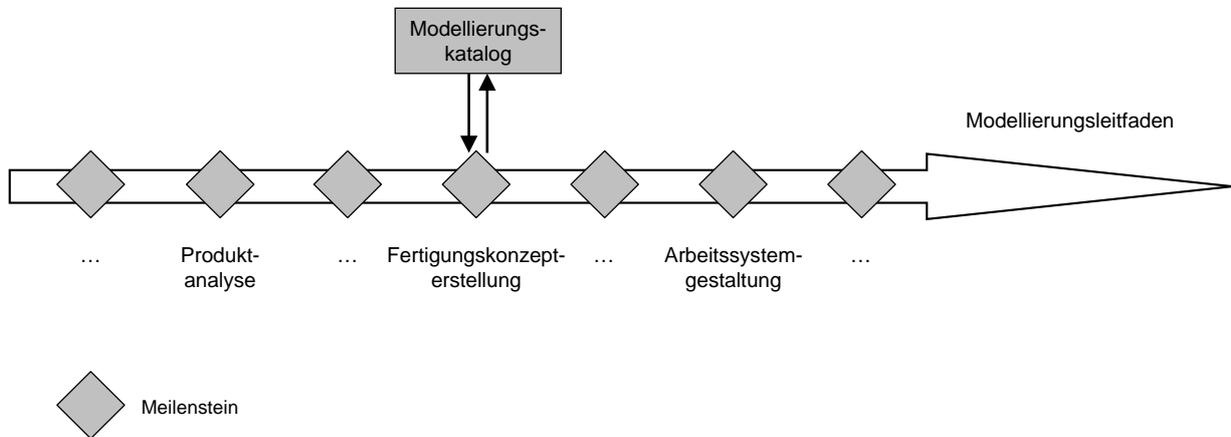


Abbildung 6-5: Modellierungsleitfaden und Modellierungskatalog der Digitalen Fabrik nach [Blum06]

Die unter Einhaltung des Modellierungsleitfadens erstellten statischen Fertigungssystemmodelle sind eine ausgezeichnete Grundlage für die Entwicklung des in Abschnitt 6.4 vorgestellten Schnittstellenkonzeptes.

6.3.3 Modellierungskatalog der Digitalen Fabrik

Die Auswertung der statischen Fertigungssystemmodelle hinsichtlich Kapazität und Kosten verlangt eine Modellierung unter Berücksichtigung des Modellierungskataloges. Durch dessen Anwendung liegen die statischen Fertigungssystemmodelle bereits in einer standardisierten Form vor. Im hier entwickelten Schnittstellenkonzept ist keine generische Einsetzbarkeit vorgesehen. Der Fokus liegt vielmehr darauf, alle statischen Modellierungsfälle des Modellierungskataloges, ohne weitere Einschränkungen bei der statischen Fertigungssystemmodellerstellung in der Digitalen Fabrik, in ein Simulationsmodell übertragen zu können.

Der Ansatz der Verwendung von Modellierungsfällen soll anhand eines Beispiels konkretisiert werden. Häufig ist bei der Planung von Fertigungseinrichtungen eine Parallelbearbeitungsgruppe erforderlich. Diese kann im statischen Fertigungssystemmodell, wie in Abbildung 6-6 dargestellt, sehr einfach modelliert werden.

Für die korrekte Berechnung der Kapazität dieser Parallelbearbeitungsgruppe muss eindeutig festgelegt werden, welche Stationen Teil davon sind. Neben der grafischen Dar-

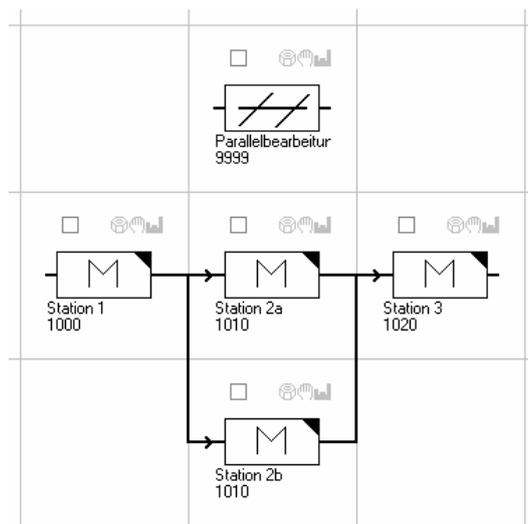


Abbildung 6-6: Statisches Modell einer Parallelbearbeitungsgruppe

stellung für diese Stationen hat deshalb eine Verknüpfung durch Relation mit dem zugehörigen Strukturelement zu erfolgen. Dadurch werden die Stationen festgelegt, welche Teil der Parallelbearbeitungsgruppe sind. Des Weiteren muss durch das Anlegen eines ausführlichen Arbeitsplanes, der Arbeitsvorgänge und Arbeitsschritte detailliert beschreibt, festgelegt werden, ob der Materialfluss produkttypabhängig erfolgt, oder ob jede Station alle Produkttypen fertigen soll. Auch dies wird über entsprechende Relationen eindeutig festgelegt. Die Relationen lassen sich für die automatische Generierung des Simulationsmodells auslesen. Die Eindeutigkeit des Simulationsmodells wird dadurch sichergestellt.

Insgesamt werden zehn Modellierungsfälle berücksichtigt, die auch kombiniert eingesetzt werden können. Im Anhang C.1 befindet sich der Modellierungskatalog, welcher sämtliche Modellierungsfälle zusammenfasst. Lassen sich Fertigungssysteme nicht mit den vorhandenen Modellierungsfällen abbilden, muss der Modellierungskatalog entsprechend erweitert werden. Dadurch kann eine Anpassung oder Erweiterung der Simulationsschnittstelle erforderlich werden (vgl. Abbildung 3-4).

6.4 Konzeption der Simulationsschnittstelle

Im Folgenden wird die Konzeption der Simulationsschnittstelle zur automatischen Modellgenerierung auf Basis von statischen Fertigungssystemmodellen der Digitalen Fabrik detailliert beschrieben. Die Grundlage für dieses Schnittstellenkonzept ist in [FrHe06a] verfügbar.

6.4.1 Datenanalyse

Ausgangspunkt der Entwicklung des Schnittstellenkonzeptes ist eine detaillierte Analyse der im Quellsystem enthaltenen Daten sowie der im Zielsystem benötigten Daten. Das hier verwendete Quellsystem ist der datenbankbasierte *Process Engineer* der Firma DELMIA, im Folgenden kurz als *DPE (DELMIA Process Engineer)* bezeichnet. Das verwendete Zielsystem ist die Simulationssoftware *Plant Simulation* der Firma UGS.

Simulationsmodelle verfügen über einen sehr hohen Detaillierungsgrad. Aus diesem Grund ist ein großer Teil der Daten statischer Fertigungssystemmodelle der Digitalen Fabrik auch für den Aufbau von Simulationsmodellen erforderlich (vgl. Abbildung 6-2). Dabei werden folgende Datenklassen unterschieden:

- Simulationsirrelevante Daten
- Simulationsrelevante Daten
- Unmittelbar einsetzbare Daten
- Mittelbar einsetzbare Daten

In den nächsten Abschnitten wird ausführlicher auf diese Klassen eingegangen.

Simulationsirrelevante Daten

Simulationsirrelevante Daten werden ausschließlich für Berechnungen und Auswertungen der Digitalen Fabrik benötigt. Hierzu gehören:

- **Kostenrelevante Daten:** Simulationsstudien sind häufig kostengetrieben. Dabei werden jedoch nur die technischen Daten, z.B. die Prozesszeiten, für die Simulation benötigt. Die tatsächlich anfallenden Kosten, beispielsweise der zur Auswahl stehenden Fertigungsverfahren oder Ressourcen, sind für die Simulation nicht relevant.
- **Detaillierte Produktdaten:** Hierzu zählen geometrische Daten und Gewichtsdaten des Produktes. Außerdem werden die erforderlichen Transporthilfsmittel angegeben.
- **Verbrauchsmedien:** Beispiele hierfür sind unter anderem Strom, Wasser und Schmierstoffe. Verbrauchsmedien haben keinen Einfluss auf das Simulationsmodell.
- **Fertigungshilfsmittel:** Prüfmittel und Werkzeuge sind typische Beispiele für Fertigungshilfsmittel, die ebenfalls keinen Einfluss auf das Simulationsmodell haben.

- **Prozessgraph:** Der Prozessgraph legt die Prozesse und deren Reihenfolge fest. Er ist lösungsneutral, d.h. die zur Realisierung der Prozesse zu verwendenden Fertigungsverfahren sind noch nicht festgelegt. Der Prozessgraph dient als Grundlage der Erstellung von Fertigungskonzepten und hat dadurch nur indirekten Einfluss auf das Simulationsmodell (vgl. Abschnitt 2.2.2).

Simulationsrelevante Daten

Simulationsrelevante Daten werden ausschließlich für die Erstellung des Simulationsmodells benötigt und sind deshalb nicht in der Digitalen Fabrik hinterlegt. Die Hauptbestandteile simulationsrelevanter Daten sind:

- **Steuerungslogiken:** Der Materialfluss durch ein Fertigungssystem wird wesentlich durch Steuerungslogiken bestimmt. Diese legen beispielsweise die Zuordnung von Produktvarianten zu den Maschinen einer Parallelbearbeitungsgruppe fest.
- **Detaillierte Schichtmodelle:** Bei der statischen Planung wird lediglich die zur Verfügung stehende Gesamtschichtdauer verwendet. Die Berücksichtigung der Dauer und Verteilung der Pausen ist für die Simulation jedoch zwingend erforderlich. Gegebenenfalls muss außerdem der Pausendurchlauf einzelner Ressourcen beachtet werden.
- **Stochastische Verteilungen:** Durch die Verwendung von Mittelwerten wird in statischen Modellen mit deterministischen Werten gerechnet. Im Gegensatz hierzu erlaubt die Simulation die Verwendung von stochastischen Verteilungen. Der Verteilungstyp und die Parameter der entsprechenden Dichtefunktion müssen definiert werden.
- **Ressourcentyp:** Die in der statischen Planung verwendeten Stationen müssen für die Simulation näher spezifiziert werden. Aus diesem Grund ist es erforderlich, sich auf die Abbildung einer Ressource in Form einer Standard-, einer Montage- oder einer Demontagestation festzulegen.
- **Ablaufdaten:** Die Stationenfolge der Produktvarianten (Ablauf) wird durch die Ablaufdaten definiert. Hierbei werden geeignete Steuerungslogiken verwendet.
- **Experimentdaten (Simulationsparameter):** Unter Experimentdaten sind die Daten zusammengefasst, welche für das Fertigungssystem irrelevant sind, jedoch für das Simulationsexperiment berücksichtigt werden müssen. Hierzu zählt die Festlegung der Einschwingphase (transiente Phase) und der Simulationsdauer (stationäre Phase), in der die eigentlichen Statistiken generiert werden. Außerdem muss

die Anzahl der erforderlichen Replikationen festgelegt werden. Die Bestimmung von Simulationsparametern wird in Abschnitt 5.5.2 ausführlich erläutert.

Unmittelbar einsetzbare Daten

Daten, die ohne weitere Manipulation exportiert werden können, werden als unmittelbar einsetzbare Daten bezeichnet. Zu diesen Daten zählen:

- **Produkt Daten:** Die benötigten Produkte, Baugruppen und Bauteile werden mit den erforderlichen Stückzahlfaktoren exportiert. Diese Daten sind für die Umsetzung von produktabhängigen Materialflüssen relevant.
- **Strukturdaten:** Die Stationspositionen, sowie parallele und verkettete Stationen, werden durch die Strukturdaten festgelegt. Außerdem werden in diesen Daten auch die erforderlichen Mitarbeiter berücksichtigt.
- **Deterministische Parameter:** Parameter, die im Simulationsmodell als deterministisch angenommen werden, sind unmittelbar einsetzbar. Hierzu zählen Ausschuss- und Nacharbeitsraten, Rüst- und Ausfallzeiten sowie durchschnittliche Pufferkapazitäten.

Mittelbar einsetzbare Daten

Neben unmittelbar einsetzbaren Daten gibt es mittelbar einsetzbare Daten, die sowohl im statischen Modell der Digitalen Fabrik als auch im Simulationsmodell verwendet werden. Im Simulationsmodell ist bei diesen Daten, im Unterschied zu unmittelbar einsetzbaren Daten, ein höherer Detaillierungsgrad bzw. eine Disaggregation der Daten der statischen Planung erforderlich. Die Daten werden dabei um rein simulationsrelevante Komponenten erweitert. Zu den mittelbar einsetzbaren Daten zählen:

- **Prozess- und Mitarbeiterzeiten:** Diese Daten werden in der statischen Planung lediglich in Form von Mittelwerten berücksichtigt. Vor deren Verwendung in der Simulation muss die Angabe der stochastischen Verteilung und deren Parametrierung erfolgen.
- **Arbeitspläne und Tätigkeitslisten:** Arbeitspläne und Tätigkeitslisten enthalten die ausführliche Beschreibung von automatischen und manuellen Prozesszeiten sowie Füll- und Wegezeiten der Mitarbeiter. Ebenso wie bei Prozess- und Mitarbeiterzeiten muss auch bei diesen Daten die Angabe der stochastischen Verteilung und deren Parametrierung erfolgen.

- **Schichtmodelle:** Die Gesamtschichtdauer ist der einzige Parameter des Schichtmodells, welcher für die statische Planung relevant ist. Das Schichtmodell gehört deshalb überwiegend zu den simulationsrelevanten Daten. Die Gesamtschichtdauer wird jedoch für Plausibilitätsüberprüfungen verwendet. Dadurch kann sichergestellt werden, dass das manuell erstellte Schichtmodell nicht fehlerhaft ist.
- **Produktionsprogramme:** In der statischen Planung wird festgelegt, welche Produkte in welchen Stückzahlen zu fertigen sind. Die zeitliche Einlastung von Aufträgen ist für das Simulationsmodell relevant und muss deshalb detailliert festgelegt werden.

Ergebnis der Datenanalyse

Abbildung 6-7 zeigt eine Übersicht der oben beschriebenen Datentypen. Die Klassifizierung dieser Datentypen ist im Hinblick auf die besonderen Anforderungen des im folgenden Abschnitt dargestellten Schnittstellenkonzeptes entstanden. Weitere sinnvolle Klassifizierungen von Simulationsdaten sind in [Spla95, Coll02] verfügbar.

Die Digitale Fabrik wird kontinuierlich weiterentwickelt. Der Detaillierungsgrad der in der Digitalen Fabrik verwendeten Modelle nimmt dabei weiter zu. Dies führt dazu, dass der Anteil mittelbar nutzbarer Daten und rein simulationsrelevanter Daten weiter abnimmt. Bei der Entwicklung eines geeigneten Schnittstellenkonzeptes muss diese Entwicklung berücksichtigt werden.

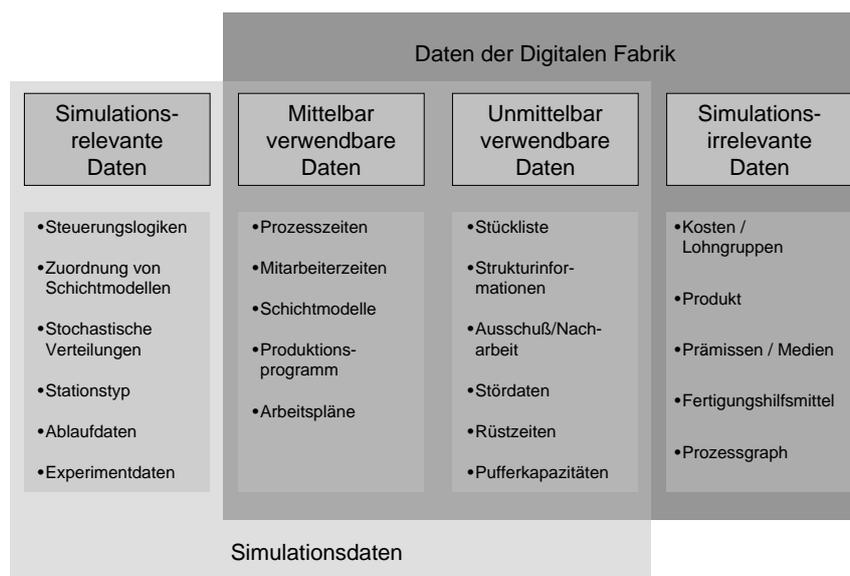


Abbildung 6-7: Datentypen der Digitalen Fabrik und der Simulation

6.4.2 Softwarearchitektur der Schnittstelle

Die sich gegenseitig beeinflussenden Anforderungen an ein geeignetes Schnittstellenkonzept lassen sich wie folgt zusammenfassen:

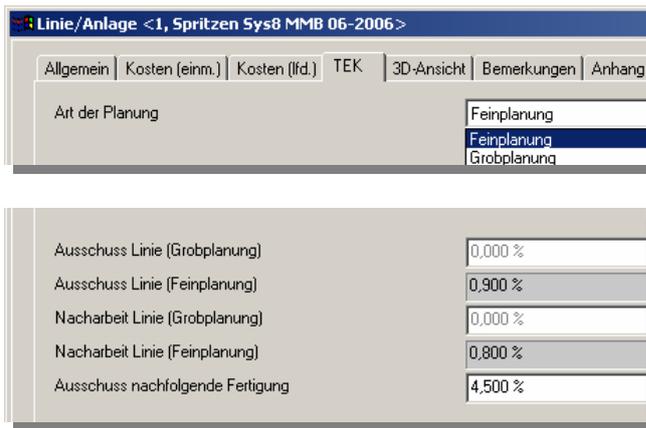
- **Berücksichtigung unterschiedlicher Detaillierungsgrade:** Das in Abbildung 6-4 verdeutlichte Detaillierungsgrad-Delta zwischen dem statischen Fertigungssystemmodell der Digitalen Fabrik und dem Simulationsmodell muss ausgeglichen werden.
- **Berücksichtigung von Workflows:** Das Schnittstellenkonzept muss sich an den in Abschnitt 6.3.2 erläuterten Workflows für die Planung mit der Digitalen Fabrik orientieren. Da bei Einhaltung dieser Workflows eine Beschränkung auf definierte Modellierungsfälle erfolgt, werden die Möglichkeiten der Interpretation der statischen Fertigungssystemmodelle deutlich eingeschränkt und eine automatische Erstellung des Simulationsmodells ermöglicht.
- **Berücksichtigung unterschiedlicher Datentypen:** Das Schnittstellenkonzept muss simulationsrelevante, simulationsirrelevante, unmittelbar und mittelbar nutzbare Daten vorsehen (vgl. Abbildung 6-7). Insbesondere müssen mittelbar nutzbare Daten vor der eigentlichen Simulationsmodellerstellung manipulierbar und simulationsrelevante Daten nachpflegbar sein.

Diese Anforderungen sind mit einer aus drei Schichten bestehenden Softwarearchitektur umsetzbar. Die erste Schicht stellt das statische Fertigungssystemmodell der Digitalen Fabrik dar. Für die Simulationsmodellerstellung ist dabei erforderlich, dass eine detaillierte Planung des statischen Fertigungssystemmodells vorausgegangen ist. Dem Anwender steht hierzu im DPE eine zentrale Einstellmöglichkeit zur Verfügung, welche die Verwendung entsprechend detaillierter Daten sicherstellt und deren Eingabe erzwingt (vgl. Abbildung 6-8).

Die zweite Schicht der Softwarearchitektur ist eine MS Excel-Zwischenschicht. Die Simulationsdaten werden aus dem DPE in eine Excel-Datei exportiert. Durch Anwendung einer Formatvorlage wird diese standardisiert.

Die dritte Schicht der Softwarearchitektur ist das automatisch erstellte Simulationsmodell. Abbildung 6-9 zeigt die dreischichtige Softwarearchitektur.

Die in der automatisch erzeugten Excel-Datei enthaltenen Simulationsdaten sind nicht nur im Fall der anschließenden automatischen Modellerstellung nützlich. Sie unterstützen



Auswahlfeld:

- Feinplanung
- Grobplanung

Beispiel: Ausschuss und Nacharbeit
Dateneingabe und -verwendung abhängig von Auswahlfeld

Abbildung 6-8: Unterscheidung von Grob- und Feinplanung in der Digitalen Fabrik



Abbildung 6-9: Softwarearchitektur bestehend aus drei Schichten

auch deutlich die vollständig manuelle Modellerstellung durch einen Simulationsexperten, da der Aufwand für die Datenbeschaffung entfällt. Abbildung 6-10 zeigt beide Fälle, in denen durch die Zwischenschicht des Schnittstellenkonzeptes ein Nutzen entsteht.

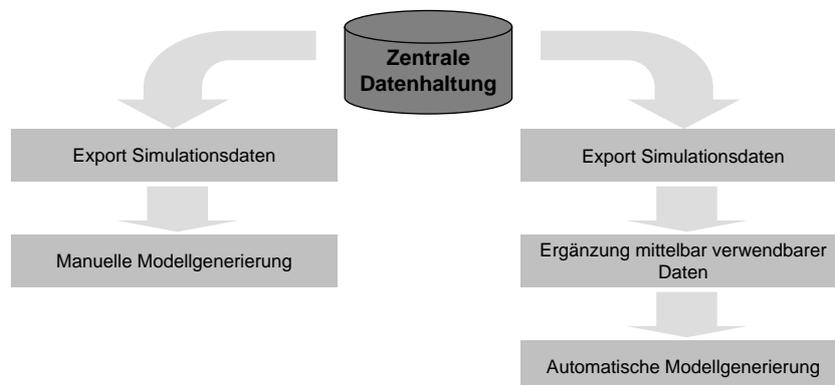


Abbildung 6-10: Fälle, in denen durch die Zwischenschicht des Schnittstellenkonzeptes ein Nutzen entsteht

6.4.3 Protokollierung der Modellerstellung

Bei der automatischen Modellerstellung werden Berichte generiert, welche die Abbildung der Elemente des statischen Modells im Simulationsmodell dokumentieren. Diese Berichte werden als *Mapping-Berichte* bezeichnet.

Eine weitere wichtige Funktionalität sind leistungsfähige *Update-Berichte*. Diese sind aus folgenden Gründen zwingend erforderlich:

- **Weiterverwendung der Simulationsergebnisse:** Simulationsexperimente machen häufig Änderungen des Ursprungsmodells erforderlich, um weitergehende Erkenntnisse über das System zu gewinnen. Diese Änderungen müssen schnell und einfach in das statische Modell der Digitalen Fabrik übertragbar sein. Hierfür sind Update-Berichte erforderlich, welche sämtliche, nach Erstellung des Simulationsmodells durchgeführten Änderungen aufzeichnen. Mit diesen Update-Berichten kann eine sorgfältige, manuelle Aktualisierung des statischen Modells durchgeführt werden. Die manuelle Aktualisierung stellt sicher, dass die Datenbank der Digitalen Fabrik der Master der redundanzfreien Planungsdatenhaltung bleibt und keine aktuellen Planungen automatisch durch Simulationsergebnisse überschrieben werden, die gegebenenfalls auf einem nicht vollständig aktuellen Planungsstand basieren.
- **Aktualisierung der Simulationsmodelle:** Simulationsmodelle, welche nach der automatischen Modellerstellung durch komplexe und aufwändige Änderungen, z.B. durch Steuerungslogiken, erweitert werden, müssen Aktualisierungen von Parametern des statischen Modells der Digitalen Fabrik zulassen. Hierfür sind Update-Berichte erforderlich, die einen Abgleich zwischen dem aktuellen statischen Modell und dem Simulationsmodell ermöglichen.

6.4.4 Simulationsauswertungen

Das wichtigste Ziel, um die Integration der Simulation in die Digitale Fabrik zu erreichen, ist die Verbesserung wichtiger Leistungsgrößen des Fertigungssystems sowie deren Dokumentation in Form standardisierter Auswertungen. Hierfür wird während eines Versuchslaufes ein Simulationsreport im HTML-Format erzeugt. Dieser umfasst die folgenden Kategorien:

- Allgemeine Daten des Simulationsmodells
- Basis-Simulationsauswertungen
- Fertigungskennzahlen

Allgemeine Daten des Simulationsmodells

In dieser Kategorie werden der Modellname, das aktuelle Datum, die Simulationsdauer und die Dauer der Einschwingphase angezeigt.

Basis-Simulationsauswertungen

Diese Kategorie umfasst die folgenden Auswertungen:

- Anlagenkapazität
- Durchlaufzeiten der Produktvarianten (Mittelwerte und Standardabweichungen)
- Losgrößen
- NIO-Raten (Ausschuss- und Nacharbeitsraten der Anlage)
- Mittlere Auslastung der Mitarbeiter und Puffer
- Auslastungsdiagramme der Ressourcen (Stationen und Mitarbeiter)
- Histogramme
 - Puffer
 - Durchlaufzeiten
 - Losgrößen

Bei den in dieser Kategorie erzeugten Auswertungen handelt es sich um typische Auswertungen von Simulationsexperimenten. Durch die automatische und dadurch standardisierte Generierung dieser Auswertungen sind diese für den Fertigungsplaner sofort nachvollziehbar.

Fertigungskennzahlen

In Abschnitt 2.2.3 werden die Prinzipien der Entwicklung schlanker Produktionssysteme ausführlich beschrieben. Ein wichtiges Element des dabei verfolgten Prinzips der Standardisierung ist die einheitliche Berechnung wichtiger Kennzahlen von Fertigungssystemen.

Die Simulation ermöglicht gegenüber der statischen Fertigungsplanung der Digitalen Fabrik eine deutlich genauere Bestimmung dieser Kennzahlen auf Stations- und insbesondere auf Fertigungssystemebene.

Folgende Kennzahlen werden in dieser Kategorie des Simulationsreports erzeugt:

- **Nutzungsgrad (NU):** Der Nutzungsgrad ist ein Maß für die Effizienz einer Station oder Anlage. Die zur Verfügung stehende Produktionszeit, abzüglich der Verluste durch Rüsten, Störungen, Ausschuss und Nacharbeit, wird dabei mit der in einer Schicht zur Verfügung stehenden Zeit ins Verhältnis gesetzt.
- **Overall Equipment Effectiveness (OEE):** Overall Equipment Effectiveness ist wie der Nutzungsgrad ein Maß für die Effizienz einer Station oder Anlage. Der einzige Unterschied zum Nutzungsgrad ist, dass bei dieser Kennzahl geplante Stillstände und Instandhaltungen von der Schichtzeit abgezogen werden. Fallen während der Schichtzeit keine geplanten Stillstände und Instandhaltungen an, sind der Nutzungsgrad und die Overall Equipment Effectiveness identisch.
- **Arbeitseffizienz:** Die Arbeitseffizienz beschreibt das Verhältnis der Anlagenkapazität zu den erforderlichen Mitarbeiterstunden im betrachteten Fertigungssystem. Diese Kennzahl ist nur für Fertigungssysteme relevant, in denen Mitarbeiter eingesetzt werden.
- **First Time Through Capability (FTT):** Die First Time Through Capability gibt den Anteil der Anlagenkapazität an, der ohne Nacharbeit erzielt wird.
- **Every Part Every Interval (EPEI):** Every Part Every Interval ist ein Maß für die Losgröße und beschreibt das Zeitintervall, in dem ein definiertes Produktionsprogramm abgearbeitet wird.

6.5 Implementierung der Simulationsschnittstelle

6.5.1 Softwaretechnische Umsetzung

Das zentrale Element für die Implementierung des Schnittstellenkonzeptes ist die in Abschnitt 6.4 beschriebene MS Excel-Zwischenschicht. Diese stellt den Ausgangspunkt der Spezifikation des Datenexports und des Algorithmus zur automatischen Modellerstellung dar. Die Zwischenschicht besteht aus den im Folgenden näher beschriebenen zehn Tabellen, die sämtliche simulationsrelevanten Daten enthalten:

- **Stückliste:** In der Stückliste werden die für das Fertigungssystem relevanten Produkte, Baugruppen und Bauteile mit den zu berücksichtigenden Stückzahlfaktoren festgelegt.

- **Strukturinformationen:** Neben den Stationspositionen wird die Struktur eines Fertigungssystems im Wesentlichen durch die Angabe von Verkettungen und Parallelbearbeitungsgruppen bestimmt. Unter Verkettung wird hier jede elastische Kopplung, d.h. jede durch endliche Pufferung entstehende Kopplung, von Stationen verstanden. Ein Fertigungssystem kann auch hierarchische Strukturen aufweisen. Beispielsweise können verkettete Stationen parallel zu anderen Stationen angeordnet sein.
- **Schichtmodelle:** Für die Erzeugung eines Simulationsmodells sind detaillierte Schichtmodelle erforderlich, welche deshalb in der Zwischenschicht spezifizierbar sein müssen.
- **Produktionsprogramm:** In dieser Tabelle werden simulationsrelevante Daten des Produktionsprogramms definiert. Die Produkte und deren Bezeichnung, das zu simulierende Produktionsjahr und die technische Planzahl werden aus dem statischen Fertigungssystemmodell exportiert. Diese Angaben unterstützen die Festlegung des Einlastungsabstandes und dessen stochastische Verteilung. Zusätzlich werden die Losgröße und deren zu berücksichtigende stochastische Verteilung angegeben.
- **Stationen:** Diese Tabelle ist von zentraler Bedeutung für die Simulationsmodell-erstellung, da sie sämtliche Stationsparameter festlegt. Zu Stationsparametern zählen Stationspositionen, Stationstypen, die Zuordnung von Mitarbeitern zu Stationen, die technische Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Stationen, mittlere Stördauern *MTTR* und Störabstände *MTBF*, Ausschuss- und Nacharbeitsraten, Rüstzeiten und die Zuordnung der in der Tabelle *Schichtmodelle* definierten detaillierten Schichtmodelle. Außerdem werden die Stationen in dieser Tabelle einer Parallelbearbeitungsgruppe zugeordnet.
- **Typabhängige Bearbeitungszeiten:** Produktvarianten haben meist unterschiedliche Bearbeitungszeiten an den Stationen zur Folge. In diese Tabelle werden die Bearbeitungszeiten an den Stationen typabhängig eingefügt.
- **Typabhängige Rüstzeiten:** Analog zu typabhängigen Bearbeitungszeiten werden in dieser Tabelle die Rüstzeiten typabhängig eingefügt.
- **Nachfolgebeziehungen:** In dieser Tabelle wird der Materialfluss im Fertigungssystem durch die Angabe von Nachfolgebeziehungen für jede Produktvariante separat definiert. Dadurch kann ein typabhängiger Materialfluss abgebildet werden. Darüber hinaus erfolgt hier die detaillierte Parametrierung der Verkettungsstrukturen durch Angabe von durchschnittlichen Pufferkapazitäten und Verzögerungszeiten in

den Puffern. Außerdem ist in dieser Tabelle die binäre Angabe *One-piece-flow* erforderlich, wodurch die Einschränkung auf die Modellierung von Chaku-Chaku-Linien möglich ist (vgl. Anhang C.1).

- **Mitarbeiter:** Inhalt dieser Tabelle ist die genaue Beschreibung der Mitarbeiterklassen. Dabei erfolgt die Zuordnung eines Schichtmodells, die Verfügbarkeit, die Anzahl Mitarbeiter im Fall einer *One-piece-flow*-Linie sowie Mitarbeiterfüll- und -wegezeiten.
- **Versionsinformation:** Zu dieser Tabelle gehören die Bezeichnung des Fertigungskonzeptes im DPE, Datum und Uhrzeit des Datenexports, eine Versionsnummer und das DPE-Projekt, welches das exportierte Fertigungskonzept enthält. Diese Informationen sind für die Erstellung von Update-Berichten erforderlich.

Bei der Spezifikation dieser Tabellen müssen die Modellierungsfälle bereits berücksichtigt werden. In der Digitalen Fabrik existieren Datenfelder oder Kombinationen von Datenfeldern, welche die eindeutige Identifikation von Modellierungsfällen zulassen.

Ein Beispiel hierfür ist das Feld *One-piece-flow* des Verkettungs-Strukturelements. Mit diesem Feld wird ein binärer Wert ausgelesen, wodurch die Einschränkung auf lediglich zwei Modellierungsfälle möglich ist. Durch die Einstellung *Mitarbeiter in Verfolgung* und die Mitarbeiter-Stationen-Zuordnung ist eine eindeutige Identifikation des Modellierungsfalles und damit eine vollständig automatische Modellerstellung möglich.

Tabellenspalten, die simulationsrelevante Daten enthalten und eine manuelle Bearbeitung vor der Simulationsmodellerstellung erfordern, werden hervorgehoben. Der Anwender wird dadurch optimal unterstützt.

Für die Erzeugung der MS Excel-Zwischenschicht stellt der DPE eine sehr flexible VBA Skripting-Funktionalität zur Verfügung, welche den Export von Strukturelementen, einzelner Datenfelder und relevanter Relationen ermöglicht.

Um die Eindeutigkeit der Strukturelemente und Relationen sicherzustellen, wird zusätzlich deren Datenbank-Identifikationsnummer exportiert.

Die MS Excel-Zwischenschicht erfüllt die wichtige Anforderung, mittelbar verwendbare Daten nach erfolgtem Datenexport manipulieren sowie deren Detaillierungs- bzw. Aggregationsgrad anpassen zu können. Ein weiterer Vorteil der Realisierung der Zwischenschicht in MS Excel ist die einfache Lesbarkeit und Editierbarkeit auf sämtlichen Rechnern ohne

weitere Lizenzkosten und Installationsaufwände. Aus diesen Gründen wird von der Verwendung des XML-Standards abgesehen. Dieser bietet andere Vorzüge und ist bei dem in Abschnitt 6.1 angesprochenen Ansatz der automatischen Simulationsmodellerstellung basierend auf Verbindungselementen ebenfalls erfolgreich erprobt [BlZe05, Zenn06].

Abbildung 6-11 verdeutlicht den detaillierten Ablauf der automatischen Simulationsmodellerstellung.

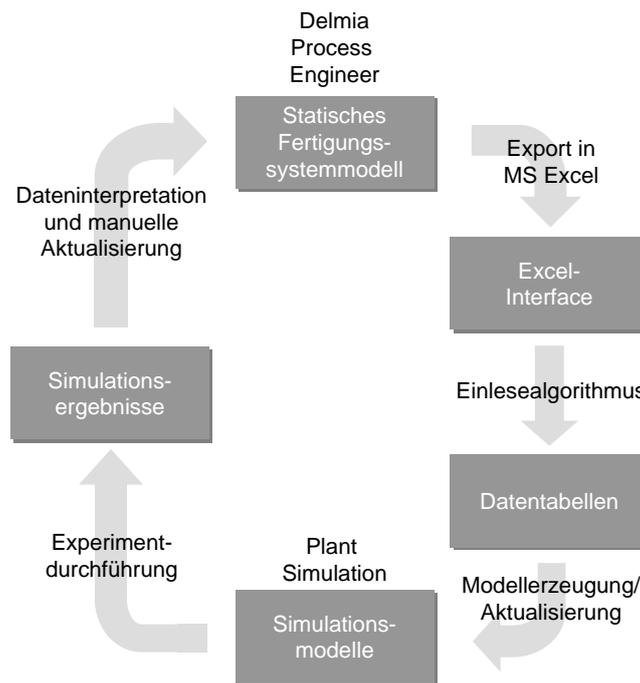


Abbildung 6-11: Detaillierte Softwarearchitektur der Schnittstelle und für die automatische Simulationsmodellerstellung benötigter Ablauf

Die MS Excel-Zwischenschicht dient als Ausgangspunkt der automatischen Modellgenerierung. Die Simulationsdaten werden durch einen geeigneten Algorithmus zunächst in eine interne Tabellendarstellung umgeschrieben. Dieser Algorithmus ist in der *Plant Simulation*-spezifischen Programmiersprache *SimTalk* umgesetzt. Das kommerziell verfügbare Modul *Automated Model Generation (AMG)*, welches die Simulationssoftware *Plant Simulation* um die Funktionalität der automatischen Simulationsmodellerstellung erweitert, erfordert diese interne Tabellendarstellung für die automatische Erstellung des Simulationsmodells. Die im nächsten Schritt zur Modellerstellung erforderlichen Algorithmen sind ebenfalls in *SimTalk* realisiert und greifen auf eine Bibliothek von Bausteinen zu, die zur Umsetzung der spezifischen Anforderungen der Modellierungsfälle benötigt werden. Die Bausteinbibliothek ist auszugsweise in Abbildung 6-12 dargestellt.

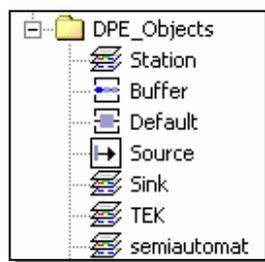


Abbildung 6-12: Bausteinbibliothek für die automatische Simulationsmodellerstellung

Nach der Modellgenerierung werden die erforderlichen Experimente durchgeführt. Im letzten Schritt werden die Simulationsergebnisse interpretiert und das statische Fertigungssystemmodell wird aktualisiert. Wie in Abschnitt 6.4.3 aufgezeigt, muss die Aktualisierung manuell und in enger Abstimmung mit dem Fertigungsplaner durchgeführt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die bei den Versuchsläufen gewonnenen Erkenntnisse auf dem aktuellen Planungsstand basieren und die zielführenden Szenarien umgesetzt werden.

In Anhang C.2 werden die für den Anwender erforderlichen Schritte der automatischen Modellgenerierung anhand mehrerer Abbildungen ausführlich dargestellt.

Das hier entwickelte Schnittstellenkonzept kann unabhängig von der verwendeten Software realisiert werden. Voraussetzungen hierfür sind zum einen der mögliche Planungsdatenexport nach MS Excel, sowie zum anderen die Möglichkeit, diese Daten in das verwendete Simulationswerkzeug übertragen zu können.

Der Einsatz von Plant Simulation mit dem durch das AMG-Modul erweiterten Funktionsumfang bietet jedoch insbesondere für die Anwendung in der Praxis erhebliche Vorteile. Künftige Weiterentwicklungen erfordern lediglich eine Anpassung des Datenexports sowie des Algorithmus zur Umsetzung der Zwischenschicht in die in Abbildung 6-11 gezeigte interne Tabellendarstellung. Erweiterungen und Verbesserungen der automatischen Modellgenerierung und Anpassungen an aktuelle Versionen der Simulationssoftware werden durch den Softwareanbieter sichergestellt.

6.5.2 Verifikation und Validierung des Schnittstellenkonzeptes

Abschließend muss das Schnittstellenkonzept verifiziert und validiert werden. Die Verifikation ist sehr einfach. Dabei wird geprüft, ob die Parameterwerte des statischen Fertigungssystemmodells korrekt in das Simulationsmodell übertragen werden.

Die Validierung ist deutlich aufwändiger. Es muss dabei sichergestellt werden, dass das Schnittstellenkonzept die *Struktur* und den *Mitarbeitereinsatz* der statischen Fertigungssystemmodelle korrekt in den Simulationsmodellen abbildet. Zu diesem Zweck werden statische Fertigungssystemmodelle entwickelt, die auf den in Anhang C.1 detailliert beschriebenen Modellierungsfällen des Modellierungskataloges basieren.

Im ersten Schritt wird geprüft, ob die Übertragung der Strukturen in das Simulationsmodell korrekt abläuft. Hierfür werden folgende Modellierungsfälle aus statischen Fertigungssystemmodellen in Simulationsmodelle übertragen:

- Verkettung aller Stationen einer Linie
- Teilweise Verkettung von Stationen einer Linie
- Maschinenpool - Parallelbearbeitungsgruppe
- Maschinenpool - Typabhängiger Teilefluss
- Linie mit integrierter Auswahlprüfung

In Abbildung 6-13 ist die Validierung exemplarisch am Modellierungsfall „Teilweise Verkettung von Stationen einer Linie“ dargestellt.

Die teilweise Verkettung der Stationen wird hierarchisch durch das in Abbildung 6-13 gezeigte *Unternetzwerk* aufgebaut, welches Plant Simulation zur verbesserten Übersichtlichkeit bietet. Der Modellierungsfall wird korrekt in das Simulationsmodell übertragen. Dieses Ergebnis bestätigt sich für alle hauptsächlich die Struktur betreffenden Modellierungsfälle.

Neben der Struktur muss die korrekte Modellierung des Mitarbeitereinsatzes in der Simulation sichergestellt werden. Folgende Modellierungsfälle sind für den Mitarbeitereinsatz relevant:

- Anlagenführer
- Maschinenbediener an Station
- Mehrmaschinenbedienung
- Chaku-Chaku-Linie - Kreisläufe
- Chaku-Chaku-Linie - Verfolgung

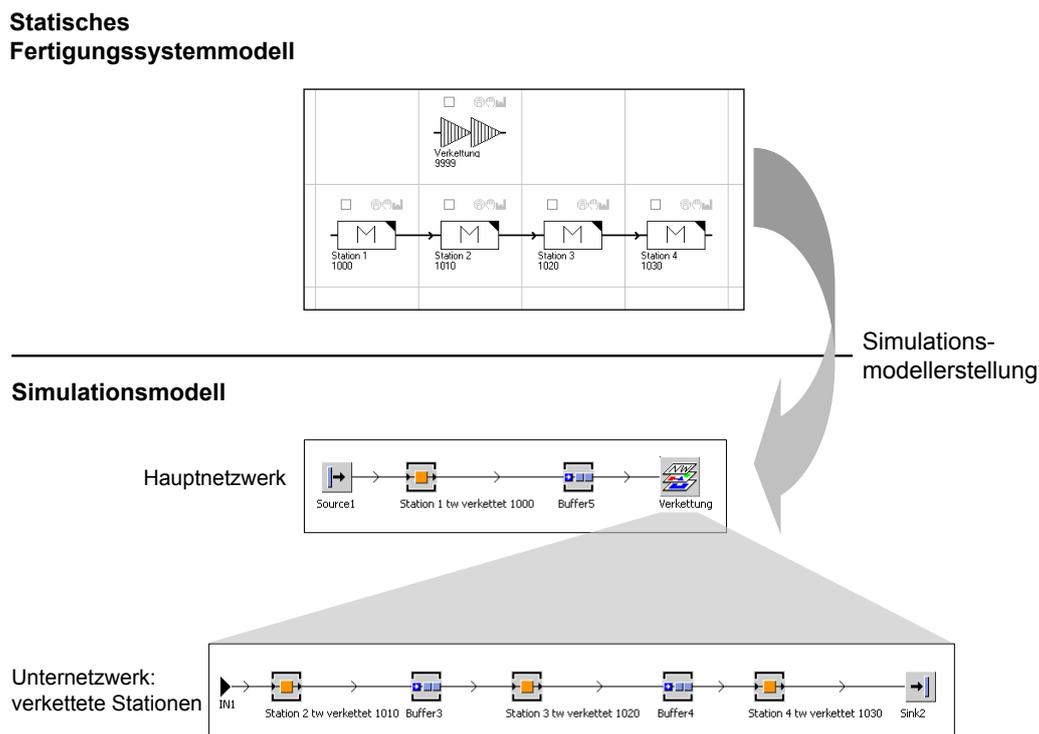


Abbildung 6-13: Validierung des Schnittstellenkonzeptes anhand des Modellierungsfalles „Teilweise Verkettung von Stationen einer Linie“

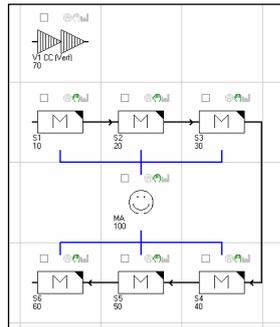
In Abbildung 6-14 wird die Validierung der Modellierung des Mitarbeiterereinsatzes exemplarisch am Modellierungsfalle „Chaku-Chaku-Linie - Verfolgung“ verdeutlicht.

Auch beim Mitarbeiterereinsatz werden die statischen Fertigungssystemmodelle durch die Schnittstelle richtig interpretiert und die Simulationsmodelle korrekt aufgebaut.

Ergebnisse der Verifikation und Validierung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich das Schnittstellenkonzept eignet, sämtliche Modellierungsfälle automatisch in ein valides Simulationsmodell zu überführen. Außerdem zeigt sich bei der Validierung, dass alle Parameterwerte richtig übertragen werden. Dadurch wird die Richtigkeit der bei der Implementierung erforderlichen Algorithmen verifiziert.

Statisches Fertigungssystemmodell



Simulations-
modellerstellung

Simulationsmodell

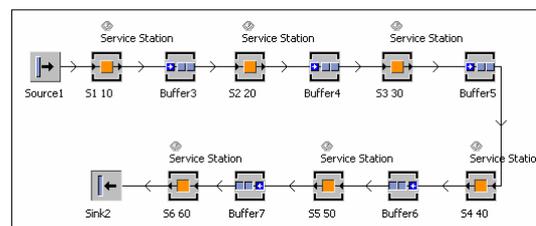


Abbildung 6-14: Validierung des Schnittstellenkonzeptes anhand des Modellierungsfalles „Chaku-Chaku-Linie - Verfolgung“

6.6 Einsatz der Schnittstelle an einem realistischen Fertigungssystem

Das Schnittstellenkonzept wird auf ein realistisches Fertigungssystem angewandt. Abbildung 6-15 zeigt das statische Modell des Fertigungssystems. Dieses besteht aus insgesamt sieben Stationen, die hierarchisch aus Verkettungen und Parallelbearbeitungsgruppen aufgebaut sind. Beispielsweise ist parallel zur Station $S3$ die Verkettung $V2$ angeordnet, welche aus den Stationen $S4$ und $S5$ besteht.

In Abbildung 6-16 ist das aus dem statischen Modell der Abbildung 6-15 automatisch generierte Simulationsmodell dargestellt. Die Verkettungen und die Parallelbearbeitungsgruppen werden in Unternetzwerken modelliert. Dadurch wird die Übersichtlichkeit erheblich gesteigert.

Mit dem Schnittstellenkonzept kann das realistische Fertigungssystem automatisch in ein valides Simulationsmodell überführt werden, welches direkt ausgeführt werden kann und Grundlage einer Simulationsstudie ist. Dieses Beispiel zeigt, dass das Schnittstellenkonzept auch dann funktioniert, wenn die Modellierungsfälle in einem komplexen Modell hierarchisch kombiniert werden.

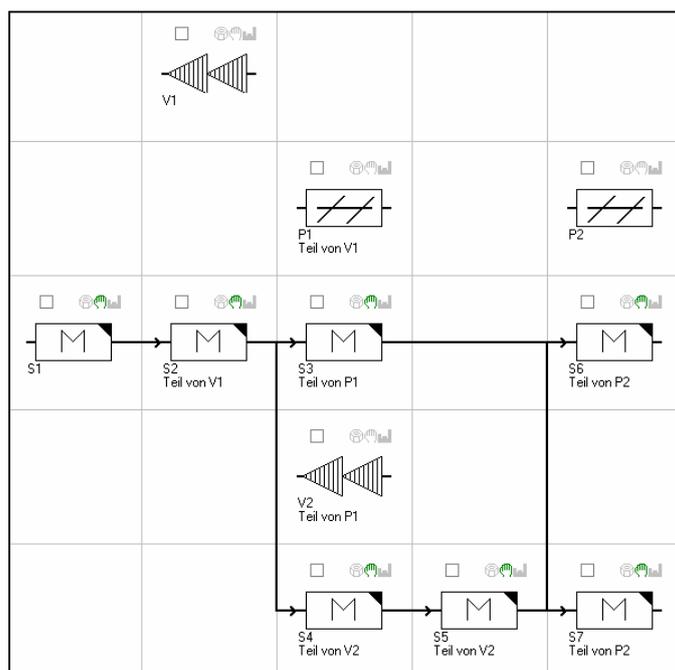


Abbildung 6-15: Statisches Fertigungssystemmodell zur Validierung des Schnittstellenkonzeptes

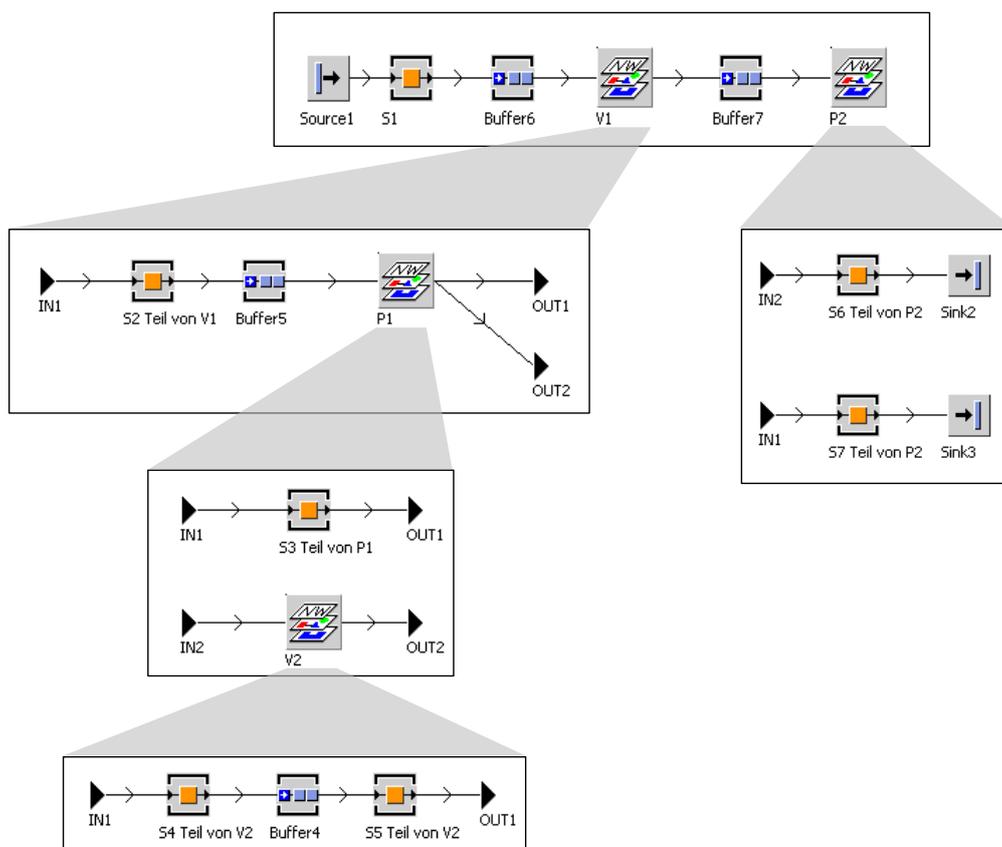


Abbildung 6-16: Automatisch generiertes Simulationsmodell des statischen Fertigungssystemmodells der Abbildung 6-15

6.7 Zusammenfassung und Fazit

Bei Analyseproblemen geringer Häufigkeit, die eine hohe Detaillierung erfordern, ist ein teilautomatischer Simulationsmodellbau notwendig. Dieser kann durch einen geeigneten Export von Daten aus dem Planungswerkzeug der Digitalen Fabrik oder durch eine geeignete Schnittstelle zwischen dem Planungswerkzeug und dem Simulationswerkzeug unterstützt werden.

Die Kernproblematik beim teilautomatischen Simulationsmodellbau wird durch die Differenz des Detaillierungsgrades zwischen dem statischen Fertigungssystemmodell der Digitalen Fabrik und dem Simulationsmodell gebildet. Diese Differenz kann durch Disaggregation von Planungsdaten des statischen Fertigungssystemmodells und Hinzufügen weiterer Planungsdaten verringert werden. Der Modellierungsleitfaden der Digitalen Fabrik schränkt die Interpretationsmöglichkeiten statischer Fertigungssystemmodelle durch Modellierungsfälle ein, welche in einem Modellierungskatalog definiert sind.

Unter Berücksichtigung dieser Voraussetzungen kann ein geeignetes, dreischichtiges Schnittstellenkonzept entwickelt werden. Nach dem Export von Simulationsdaten aus dem Planungswerkzeug ermöglicht eine les- und editierbare Zwischenschicht die Eingabe weiterer Daten. Dadurch kann die Differenz des Detaillierungsgrades vollständig ausgeglichen werden, wodurch eine automatische Simulationsmodellerstellung möglich wird.

Das Schnittstellenkonzept wird implementiert, verifiziert und validiert. Für die Verifikation und Validierung werden sämtliche Modellierungsfälle des Modellierungskataloges verwendet und erfolgreich in die Simulation übertragen. Die Anwendung auf ein realistisches Fertigungssystemmodell bestätigt dieses Ergebnis bei komplexen, hierarchisch aufgebauten Strukturen.

7 Zusammenfassung der Arbeit und kritische Bewertung der Ergebnisse

Das turbulente Umfeld der Fabrik- und Fertigungsplanung erfordert eine dynamische Adaption an veränderte Anforderungen sowie eine ständige Optimierung. Da Planungsfehler zum verspäteten Markteintritt führen und damit für den Produkterfolg entscheidend sein können, muss das Planungsergebnis qualitativ gesteigert werden. Dynamische Zusammenhänge und stochastische Parameter von Fertigungssystemen sind deshalb schon frühzeitig in der Planung zu berücksichtigen.

Hierfür stellt die Materialflusssimulation ein etabliertes und flexibles Werkzeug dar. Allerdings ist der damit verbundene Aufwand sehr hoch. Eine zielführende Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen durch Einsatz alternativer und ergänzender Verfahren ist deshalb zwingend erforderlich.

Zur Bewältigung der äußerst hohen Anforderungen an produzierende Unternehmen werden organisatorische und softwaretechnische Maßnahmen ergriffen. Organisatorisch bedeutet dies die unternehmensspezifische Entwicklung und Anpassung von Produktionssystemen zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme. Softwaretechnisch wird die Fabrik- und Fertigungsplanung durch die Einführung der Digitalen Fabrik unterstützt.

Bei eingehender Betrachtung zahlreicher Analyseprobleme der Fabrik- und Fertigungsplanung fällt auf, dass diese sich durch den für die Modellerstellung erforderlichen Detaillierungsgrad und die zu beobachtende Untersuchungshäufigkeit der zugrunde liegenden Fragestellung unterscheiden. Mit diesen Kriterien wird das so genannte Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeits-Portfolio entwickelt. Es besteht aus vier Quadranten und ordnet in Abhängigkeit beider Kriterien folgende Analysemethoden zu:

- Simulationsmodellbau
- Alternative Methoden und Werkzeuge
- Simulationsbasierte Kennfelder
- Teilautomatischer Simulationsmodellbau

Das Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeits-Portfolio ist Grundlage der Entwicklung einer Heuristik zur Auswahl zielführender Methoden für die Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen. Der Kern dieser Heuristik ist ein Flussdiagramm. Dieses unterstützt die Entscheidungsfindung für die Auswahl einer geeigneten Analysemethode des Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeits-Portfolios, beschreibt das dabei erforderliche detaillierte Vorgehen und identifiziert fehlende Methoden und Werkzeuge.

Wesentliche Ansprüche dieser Arbeit sind die Bereitstellung der Heuristik für die zielführende Modellierung und Analyse, sowie die Entwicklung fehlender Methoden und Werkzeuge, welche für die Anwendung der Analysemethoden des Portfolios erforderlich sind. Dies betrifft mit Ausnahme des *Simulationsmodellbaus* alle Analysemethoden. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abschnitten zusammengefasst und werden kritisch reflektiert.

7.1 Alternative Methoden und Werkzeuge

Alternative Methoden und Werkzeuge werden bei Analyseproblemen verwendet, die einen geringen Detaillierungsgrad bei der Modellierung erfordern und deren Fragestellung eine geringe Untersuchungshäufigkeit aufweist.

Unter alternativen Methoden und Werkzeugen werden statische Abschätzungen und warteschlangenbasierte Verfahren bzw. Warteschlangenmodelle verstanden. Mit statischen Abschätzungen können dynamische und stochastische Einflüsse nur in Form pauschaler Zuschläge berücksichtigt werden. Diese beinhalten deshalb deutliche Unschärfen. Mit Warteschlangenmodellen lassen sich im Vergleich zu Simulationsmodellen gleichwertige Ergebnisse erzielen.

Die Modellerstellung mit warteschlangenbasierten Verfahren kann sehr einfach durchgeführt werden. Die Analyse eines Warteschlangenmodells erfolgt sehr schnell und ermöglicht dadurch auch die Anwendung von Optimierungsverfahren.

In dieser Arbeit werden mehrere Einsatzgebiete von Warteschlangenmodellen vorgestellt. Durch die schnelle Modellierung und Analyse können Warteschlangenmodelle erstmalig begleitend zu einem Workshop erfolgreich angewandt werden. Außerdem werden zwei Kombinationsansätze von Simulations- und Warteschlangenmodellen aufgezeigt. Der erste Ansatz verwendet Warteschlangenmodellen in Grobplanungsphasen. Dadurch wird der

Lösungsraum von Simulationsuntersuchungen in der Feinplanung erheblich eingeschränkt. Beim zweiten Ansatz wird ein Warteschlangenmodell für die Optimierung eines Teilsystems angewandt. So können Warteschlangenmodelle erstmalig auch in der Feinplanung eingesetzt werden. Die Einsatzgebiete der Warteschlangenmodelle werden anhand ausgewählter Praxisbeispiele konkretisiert und evaluiert.

Warteschlangenmodelle bestehen aus aufwändigen, problemspezifischen Algorithmen. Die initiale und einmalige Erstellung dieser Algorithmen ist äußerst komplex und zeitaufwändig. Bei bestehenden Algorithmen können der Modellaufbau und die Analyse von Warteschlangenmodellen sehr schnell und einfach durchgeführt werden. Für die Arbeit mit Warteschlangenmodellen müssen die erforderlichen Algorithmen in einfach handhabbaren Softwarewerkzeugen verfügbar sein. Dies schränkt die Anwendbarkeit von Warteschlangenmodellen auf bestimmte Strukturen ein.

Sind die einschränkenden Voraussetzungen für den Einsatz der Warteschlangenmodelle erfüllt, eignen diese sich dazu, eine schnelle Modellierung und Analyse mit einer hohen Ergebnisqualität durchzuführen.

7.2 Simulationsbasierte Kennfelder

Simulationsbasierte Kennfelder werden bei Analyseproblemen verwendet, die einen geringen Detaillierungsgrad der Modellierung erfordern und deren Fragestellung eine hohe Untersuchungshäufigkeit aufweist.

Es lassen sich systemspezifische und systemneutrale simulationsbasierte Kennfelder unterscheiden. Systemspezifische Kennfelder sind nur für ein bestimmtes Fertigungssystem gültig. Hingegen haben systemneutrale Kennfelder für eine Anlagenklasse Gültigkeit.

Simulationsbasierte Kennfelder ermöglichen insbesondere eine schnelle und einfache Analyse sowie die Visualisierung von Zusammenhängen wichtiger Modellparameter. Ein wesentlicher Nachteil simulationsbasierter Kennfelder ist der hohe Initialaufwand, der für deren Erzeugung anfällt. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine Methodik für die effiziente Erzeugung simulationsbasierter Kennfelder entwickelt. Sie umfasst die folgenden fünf Hauptschritte:

- Aufbau eines generischen Simulationsmodells
- Festlegung der Simulationsdaten

- Durchführung von Sensitivitätsanalysen
- Entwicklung geeigneter Kennzahlen
- Erstellung des Kennfeldes

Diese Methodik wird für die Erzeugung von systemspezifischen und systemneutralen simulationsbasierten Kennfeldern angewandt, wodurch deren Einsetzbarkeit evaluiert und bestätigt wird. Da die Erzeugung insbesondere eines systemneutralen Kennfeldes durch eine hohe Versuchsanzahl sehr groß ist, wird der Nutzen durch Anwendung dieser Methodik hier besonders deutlich. Neben einer durchgängigen Anwendung der Methodik ist es ebenfalls möglich, einzelne Methoden für spezifische Simulationsuntersuchungen anzuwenden, um deren Effizienz zu steigern.

Vor der Anwendung simulationsbasierter Kennfelder muss sichergestellt werden, dass die getroffenen Annahmen sowie die Vereinfachungen durch Reduktion und Abstrahierung beim Aufbau des generischen Simulationsmodells auf das zu analysierende Fertigungssystem übertragbar sind. Die Heuristik für die zielführende Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen leistet hier bereits einen wesentlichen Beitrag, kann jedoch eine genaue Prüfung des betrachteten Fertigungssystems nur ergänzen. Gegebenenfalls müssen andere Analysemethoden zur Problemlösung in Betracht gezogen werden.

Sind die Voraussetzungen für simulationsbasierte Kennfelder erfüllt, ist die Hürde für deren Anwendung sehr gering, da sie ohne Softwarewerkzeuge direkt zur Verfügung stehen. Eine Kurzbeschreibung der dargestellten Zusammenhänge reicht aus, um die Kennfelder in der Planung anwenden zu können. Der Fertigungsplaner muss somit über kein Spezialwissen verfügen.

7.3 Teilautomatischer Simulationsmodellenaufbau

Ein teilautomatischer oder automatischer Simulationsmodellenaufbau wird dann als Analysemethode verwendet, wenn ein hoher Detaillierungsgrad erforderlich ist und die Fragestellung nur eine geringe Untersuchungshäufigkeit aufweist. Jedoch ist hierfür die Einhaltung von so genannten Modellierungsfällen zwingend erforderlich.

In dieser Arbeit wird eine Schnittstelle entwickelt, welche auf die Daten der Digitalen Fabrik zugreift und automatisch ein Simulationsmodell erstellt. Die Hauptschwierigkeit dabei ist, den für ein Simulationsmodell erforderlichen Detaillierungsgrad zu erreichen.

Durch ein geeignetes Schnittstellenkonzept, das im Wesentlichen auf einer offenen, dreischichtigen Softwarearchitektur und der Orientierung am Modellierungsleitfaden der Digitalen Fabrik basiert, ist eine automatische Simulationsmodellerstellung dennoch möglich. Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist die Konzeption und Implementierung dieser Schnittstelle. Durch die Anwendung auf ein realistisches Beispiel wird deren Funktion evaluiert und bestätigt.

Die Schnittstelle ermöglicht prinzipiell eine automatische Simulationsmodellerstellung, da deren Offenheit eine Manipulation der exportierten Daten der Digitalen Fabrik ermöglicht. Eine richtige Manipulation der Daten erfordert jedoch bereits ein Grundverständnis über Simulationmethoden seitens des Anwenders. Darüber hinaus muss dieser über Kenntnisse des Simulationssystems verfügen, um in der Experimentierphase Parametervariationen durchführen zu können.

Neben der signifikanten Aufwandsreduktion bei der Modellerstellung bietet die Verwendung der Simulationsschnittstelle weitere Vorteile. Die automatisch generierten Modelle müssen nicht erneut verifiziert werden, da deren Richtigkeit durch die Verwendung der Schnittstelle gewährleistet werden kann. Außerdem wird durch die Orientierung am Modellierungsleitfaden sichergestellt, dass die automatisch erstellten Simulationsmodelle valide sind.

8 Ausblick

Die Entwicklung erforderlicher Methoden und Werkzeuge für die zielführende Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen sind wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit. Hierfür werden Rand- und Rahmenbedingungen einerseits sowie alternative und ergänzende Verfahren der Materialflusssimulation andererseits umfassend berücksichtigt. Weiterentwicklungen in diesen Bereichen erfordern zwingend eine Anpassung der Ergebnisse, welche diese Arbeit beinhaltet. Das betrifft im Besonderen die rasante Entwicklung in der Informationstechnologie. Jedoch müssen auch Weiterentwicklungen der Produktionssysteme zur Gestaltung schlanker Fertigungssysteme und weitere Veränderungen des äußerst dynamischen Marktumfeldes in Betracht gezogen werden.

Neben der ausschließlichen Anpassung an sich ändernde Rand- und Rahmenbedingungen ergeben sich zahlreiche weitere Ansätze für zukünftige Entwicklungs- und Forschungsaktivitäten, die im Folgenden beschrieben werden.

Bislang gibt es nur wenige Algorithmen für *Warteschlangenmodelle*, die in einfach handhabbaren Softwarewerkzeugen zur Verfügung stehen. Die Entwicklung und Implementierung weiterer Algorithmen stellt deshalb ein wichtiges Feld weiterer Aktivitäten dar.

Die weitere Standardisierung, insbesondere die von Fertigungseinrichtungen, ermöglicht vielfältige Einsatzmöglichkeiten *simulationsbasierter Kennfelder*. Die Grundlage für deren effiziente Erstellung ist mit der in dieser Arbeit entwickelten Methodik verfügbar. Aufgrund der notwendigen Anpassung von Standards durch den Prozess der ständigen Verbesserung wird durch diese Methodik auch der Aufwand für die damit erforderlichen Änderungen der simulationsbasierten Kennfelder deutlich reduziert. Künftig muss auch geprüft werden, ob sich aus den Zusammenhängen und Erkenntnissen, die sich durch die Erstellung und Anwendung simulationsbasierter Kennfelder ergeben, allgemeine und eindeutige Gesetzmäßigkeiten formulieren lassen.

Die Softwarearchitektur der *Simulationsschnittstelle* ermöglicht durch die flexible Zwischenschicht eine sehr einfache Anpassung und Erweiterung bei Änderungen sowohl des Quell- als auch des Zielsystems. Um den Aufwand der Datenmanipulation in der Zwischenschicht zu verringern und gleichzeitig den Anteil redundanzfreier Daten zu steigern, muss künftig eine Möglichkeit geschaffen werden, simulationsrelevante Daten im statischen

Fertigungssystemmodell der Digitalen Fabrik zu hinterlegen. Durch das mit der Standardisierung von Fertigungseinrichtungen eng verknüpfte Ziel der Modularisierung von Maschinen kann die Bausteinbibliothek erweitert werden. Der Aufwand von Datenmanipulationen wird dadurch weiter deutlich verringert und das resultierende Simulationsmodell qualitativ verbessert. Zunehmend werden 3D-Animationen von Simulationsabläufen gefordert. Für weitere Forschungsaktivitäten hierzu stellt die vorliegende Schnittstelle eine solide Basis entsprechender Erweiterungen dar.

Die zunehmend erforderliche hohe Flexibilität von Fertigungssystemen schränkt die Möglichkeiten hochautomatisierter Lösungen deutlich ein. Dadurch wird es immer wichtiger, den Mitbeeinfluss, insbesondere bei Mehrmaschinenbedienung, zu berücksichtigen. Bislang wird dem Mitbeeinfluss in der modellbasierten Analyse nur unzureichend Beachtung geschenkt. Aus diesem Grund sind Mitbeeinflussmodelle ein Ansatzpunkt für weitere Forschungsaktivitäten. Diese müssen auch den Einfluss des Mitarbeiters auf die Produktqualität in Betracht ziehen und quantifizieren. Die Forschungsaktivitäten in diesem Bereich stehen derzeit noch am Anfang.

Neben der Schnittstellenentwicklung zur Vernetzung von Softwarewerkzeugen der Digitalen Fabrik untereinander ist auch die Anbindung von Softwarewerkzeugen der Produktentwicklung und der operativen Produktionsplanung ein viel versprechendes Forschungsfeld. Im konkreten Fall der Simulation ist eine Schnittstelle denkbar, welche die operative Auftragseinplanung unterstützt.

Wachsende Vernetzungen von Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette verlangen den Transfer von Methoden und Werkzeugen, aber auch die Austauschbarkeit von Fertigungssystemmodellen. Hierfür existieren bislang keine geeigneten Konzepte.

Ein entscheidender Aspekt für die Akzeptanz der Rechnerunterstützung, insbesondere in der Fabrik- und Fertigungsplanung, sowie die Möglichkeit der breiten Einsetzbarkeit, ist die Steigerung der Benutzerfreundlichkeit der Werkzeuge. Dies betrifft insbesondere die Planungswerkzeuge der Digitalen Fabrik, deren Komplexität und Funktionsumfang bislang überwiegend Spezialisten vorbehalten ist.

Literaturverzeichnis

- [Acel96] Acel, P. P.: *Methode zur Durchführung betrieblicher Simulationen*, Dissertation, Eidgenössische TH Zürich, 1996.
- [Alex95] Alexopoulos, C.: Advanced methods for simulation output analysis, in: Alexopoulos, C.; Kang, K.; Lilegdon, W. R.; Goldsman, D. (Hrsg.), *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*, S. 101–109, 1995.
- [AnMo69] Anderson, D.; Moodie, C.: A quick way to calculate minimum in-process inventory, *ie industrial engineering*, S. 50–51, 1969.
- [Armb04] Armbruster, D.: Dynamical systems and production systems, *Nonlinear Dynamics of Production Systems*, S. 5–24, 2004.
- [ArRa99] Arnold, D.; Rall, B.: Analytische Grobplanung von Materialflusssystemen, *Logistik im Unternehmen*, 13(3):66–69, 1999.
- [ArWe04] Arnemann, S.; Werner, G.: Sichere Basis für Investitionsentscheidungen - Simulationsstudien ermöglichen Kostentransparenz und zeigen Verbesserungspotenziale auf, *MM Das Industrie-Magazin*, S. 28–29, 2004.
- [AsSt93] Askin, R. G.; Standridge, C. R.: *Modeling and analysis of manufacturing systems*, John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [AWF60] AWF - Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung: *Begriffserklärungen Fertigungsplanung - Fertigungssteuerung*, 1960.
- [AWF68] AWF - Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung: *Handbuch der Arbeitsvorbereitung: Teil I - Arbeitsplanung*, 1968.
- [Azad99] Azadivar, F.: Simulation optimization methodologies, in: Farrington, P. A.; Nembhard, H. B.; Sturrock, D. T.; Evans, G. W. (Hrsg.), *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference*, S. 93–100, 1999.
- [Balc98] Balci, O.: Verification, validation and accreditation, in: Medeiros, D. J.; Watson, E. F.; Carson, J. S.; Manivannan, M. S. (Hrsg.), *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, S. 41–48, 1998.

- [Balc03] Balci, O.: Verification, validation and certification of modeling and simulation applications, in: Chick, S.; Sánchez, P. J.; Ferrin, D.; Morrice, D. J. (Hrsg.), *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, S. 150–158, 2003.
- [Bank98] Banks, J.: *Handbook of simulation*, A Wiley Interscience Publication : John Wiley & Sons, 1998.
- [BaWe00] Baer, D.; Wermke, M.: *Duden - Das große Fremdwörterbuch*, Duden Verlag, 2000.
- [BBHZ02] Bär, T.; Bley, H.; Haasis, S.; Zenner, C.: Verschmelzen digitale Prozessplanung und Ablaufsimulation?, *CAD-CAM Report*, S. 34–38, 2002.
- [BCMS04] Berger, P.; Carnevale, M.; Müller, S.; Schack, R.: Digitale Fabrik: von der Idee zur Einführung, *iwb Seminarberichte*, 74, 2004.
- [BCNN01] Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. L.; Nicol, D. M.: *Discrete-event system simulation*, Prentice-Hall, Inc., 2001.
- [Bern00] Bernard, B.: *Integration of manufacturing simulation tools with information sources*, Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden, 2000.
- [BeSc02] Beyer, H.-G.; Schwefel, H.-P.: *Evolution strategies: A comprehensive introduction*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [BFOW00] Bley, H.; Franke, C.; Ostermann, A.; Wuttke, C. C.: Methods and tools for the building of huge simulation models, in: *Proceedings of the 2nd CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME 2000)*, S. 33–41, Capri, Italy, 2000.
- [BFWG00] Bley, H.; Franke, C.; Wuttke, C. C.; Gross, A.: Automation of simulation studies, in: *Proceedings of the 2nd CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME 2000)*, S. 89–94, Capri, Italy, 2000.
- [Bier03] Bierwirth, T.: *Virtuelle Logistikplanung für die Automobilindustrie*, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2003.
- [BiSp03] Bierwirth, T.; Spieckermann, S.: Schnelle Analyse und Optimierung von Fertigungslinien, *Sonderdruck aus VDI-Z Integrierte Produktion*, 03:22–24, 2003.

- [BlFr01] Bley, H.; Franke, C.: Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik, *wt Werkstattstechnik online*, 91(4):214–220, 2001.
- [BlFr04] Bley, H.; Franke, C.: Integration of product design and assembly planning in the Digital Factory, in: *Proceedings of the 54th General Assembly of CIRP*, Krakau, Polen, 2004.
- [BlFr06] Blumenau, J.-C.; Fritz, J.: Modellierung und Auswertung in Sekunden-schnelle - Kombination analytischer und simulationsbasierter Verfahren, *wt Werkstattstechnik online*, 96(1-2):30–35, 2006.
- [BlFZ06] Bley, H.; Fritz, J.; Zenner, C.: Die zwei Seiten der Digitalen Fabrik - Software-Werkzeug und Methode, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 101(1-2):19–23, 2006.
- [BlKW04] Blumenau, J.-C.; Kotz, T.; Wuttke, C. C.: Digital Factory vs. Lean Production applied to logistics- and layout planning of production systems, in: *Proceedings of the 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Budapest, Ungarn, 2004.
- [Blum06] Blumenau, J.-C.: *Lean Planning unter besonderer Berücksichtigung der Skalierung wandlungsfähiger Produktionssysteme*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2006.
- [BlWK98] Bley, H.; Wuttke, C. C.; Kontz, M.: Automatic solution generator for complex planning problems, in: *Proceedings of CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, S. 297–302, Capri, Italy, 1998.
- [BlZe05] Bley, H.; Zenner, C.: Coupling of assembly planning and material flow simulation based on an unambiguous process graph, in: *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2005)*, Montréal, Canada, 2005.
- [Bolt89] Bolt, G.: *Leistungsbewertung von Rechensystemen mittels analytischer Warteschlangenmodelle*, B.G. Teubner Stuttgart, 1989.
- [Brat99] Brath, J.: *Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1999.

- [Broc03] Brocke, J. von: *Advances in Information Systems and Management Science, Band 4*, Referenzmodellierung - Gestaltung und Verteilung von Konstruktionsprozessen, 2003.
- [BrPV93] Brussel, H. Van; Peng, Y.; Valckenaers, P.: Modelling flexible systems based on petri nets, *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1:479–484, 1993.
- [Brus04] Brussel, H. Van.: Manufacturing and product paradigm shifts, in: *Proceedings of COMA'04 International Conference on Competitive Manufacturing*, S. 3–20, 2004.
- [BuRE93] Bullinger, H.-J.; Rieth, D.; Euler, H.-P.: *Planung entkoppelter Montage-systeme*, B.G. Teubner Stuttgart, 1993.
- [BuSh93] Buzacott, J. A.; Shanthikumar, J. G.: *Stochastic models of manufacturing systems*, Prentice-Hall, Inc., 1993.
- [CCKV02] Christoph, F.; Collisi, T.; Kohlbauer, R.; Völkl, R.; Effert, C.; Oertli, T.; Siggenauer, T.: Durchgängiger Einsatz der Simulationstechnik - Integration unterschiedlicher Simulationstechnologien verringert Aufwand, *VDI-Z*, 144(3):30–33, 2002.
- [CFHO00a] Collisi, T.; Fahlbusch, M.; Hagmann, M.; Ostermann, A.; Weiß, M.; Wuttke, C. C.: Hierarchische Simulationsmodelle - Teil 1, *Logistik für Unternehmen*, (4-5):79–81, 2000.
- [CFHO00b] Collisi, T.; Fahlbusch, M.; Hagmann, M.; Ostermann, A.; Weiß, M.; Wuttke, C.C.: Hierarchische Simulationsmodelle - Teil 2, *Logistik für Unternehmen*, (6):71–73, 2000.
- [CiHN02] Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 97:441–445, 2002.
- [Coll02] Collisi, T.: *Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.
- [Conw63] Conway, R. W.: Some tactical problems in digital simulation, *Management Science*, 10(1):47–61, 1963.
- [CoTo05] Colledani, M.; Tolio, T.: A decomposition method to support the configuration / reconfiguration of production systems, *Annals of the CIRP*, Vol. 54/1, August 21-27, 2005.

- [DaGe92] Dallery, Y.; Gershwin, S. B.: Manufacturing flow line systems: a review of models and analytical results, *Queueing Systems*, S. 3–94, 1992.
- [DaHu02] Daenzer, W. F.; Huber, F. (Hrsg.): *Systems Engineering - Methodik und Praxis*, Verlag Industrielle Produktion, 2002.
- [Davi00] Davis, P. K.: Exploratory analysis enabled by multiresolution, multiperspective modeling, in: Joines, J. A.; Barton, R. R.; Kang, K.; Fishwick, P. A. (Hrsg.), *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, S. 293–302, 2000.
- [DaWJ04] Dachkovski, S.; Wirth, F.; Jagalski, T.: Autonomous control in shop floor logistics: Analytic models, *Preprints IFAC-MIM'04 - Conference on Manufacturing, Modelling, Management and Control*, October 21-22, 2004.
- [DoHS06] Dombrowski, U.; Hennersdorf, S.; Schmidt, S.: Grundlagen ganzheitlicher Produktionssysteme, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 101(4):172–177, 2006.
- [DoTB01] Dombrowski, U.; Tiedemann, H.; Bothe, T.: Auf dem Weg zur Digitalen Fabrik, *Carolo-Wilhelmina*, 1:44–49, 2001.
- [Dörn76] Dörner, D.: *Problemlösen als Informationsverarbeitung*, Kohlhammer Verlag, 1976.
- [DrWo04] Drabow, G.; Woelk, P.-O.: Wandlungsfähige Fabrik der Zukunft, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 99(3):90–94, 2004.
- [EmSi70] Emshoff, J. R.; Sisson, R. L.: *Design and use of computer simulation models*, The Macmillan Company, 1970.
- [Ever97] Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik - Arbeitsvorbereitung*, Springer-Verlag, 1997.
- [FACG00] Fu, M. C.; Andradottir, S.; Carson, J. S.; Glover, F.; Harrell, C. R.; Ho, Y.-C.; Kelly, J. P.; Robinson, S. M.: Integrating optimization and simulation: research and practice, in: Joines, J. A.; Barton, R. R.; Kang, K.; Fishwick, P. A. (Hrsg.), *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, S. 610–616, 2000.
- [Fast97] Fastabend, H.: *Kennliniengestützte Synchronisation von Fertigungs- und Montageprozessen*, Dissertation, Universität Hannover, 1997.

- [FeLo04] Fettke, P.; Loos, P.: *ISYM - Information Systems & Management. Working Papers of the Research Group Information Systems & Management*, Referenzmodellierungsforschung - Langfassung eines Aufsatzes, 2004.
- [FeNe02] Feggeler, A.; Neuhaus, R.: *Ganzheitliche Produktionssysteme - Gestaltungsprinzipien und deren Verknüpfung*, Wirtschaftsverlag Bachem, 2002.
- [Fish96] Fishman, G. S.: *Monte Carlo: concepts, algorithms and applications*, Springer-Verlag, 1996.
- [Fish01] Fishman, G. S.: *Discrete-event simulation - modeling, programming and analysis*, Springer-Verlag, 2001.
- [Fran03] Franke, C.: *Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2003.
- [FrHe06a] Fritz, J.; Hellener, G.: Planning Data Preparation - Key Requirement for Automated Simulation Modeling, in: *Proceedings of the 39th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, S. 261–267, Ljubljana, Slowenien, 2006.
- [FrHe06b] Fritz, J.; Hellener, G.: Simulation-based characteristic diagrams - Improving planning quality of frequent planning tasks during lean production planning processes, in: *Proceedings of the 1st CIRP International Seminar on Assembly Systems*, S. 73–78, Stuttgart, 2006.
- [FrHe06c] Fritz, J.; Hellener, G.: Wissensmanagement mit Ansätzen der digitalen Planung, in: *Tagungsband Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart 2006*, S. 571–583, Stuttgart, 2006.
- [FrRe88] Franzen, H.; Relewicz, C.: *Simulation in der Fertigungstechnik - Fachberichte Simulationstechnik*, Systemanalyse und Modellaufbau mit Petri-Netzen, S. 363–376. Springer-Verlag, 1988.
- [Früh90] Frühwald, C.: *Analyse und Planung produktionstechnischer Rüstabläufe*, Dissertation, Universität Hannover, 1990.
- [GaFS96] Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: *Szenario-Management - Planen und Führen mit Szenarien*, Carl Hanser Verlag, 1996.
- [Gang03] Ganghoff, P.: Fertigungssimulation als Bosch-interne Dienstleistung, in: *Fabriklogistik auf dem Prüfstand: Simulation gestaltet "best in class" Logistik*, 2003.

- [GeRe04] Geckler, D.; Rehnelt, C.: Die „Digitale Fabrik“ als neue Wissensdrehscheibe zwischen OEM und Zulieferer, *Projektmanagement aktuell*, 1:26–30, 2004.
- [Glas91] Glasserman, P.: *Gradient estimation via perturbation analysis*, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [GMSW03] Gibson, R.; Medeiros, D. J.; Sudar, A.; Waite, B.; Rohrer, M. W.: Increasing return on investment from simulation (panel), in: Chick, S.; Sánchez, P. J.; Ferrin, D.; Morrice, D. J. (Hrsg.), *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, S. 2027–2032, 2003.
- [GoKö04] Gottschalk, L.; König, R.: Bedarfsunsicherheiten durch flexible Kapazitäten beherrschen, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 99(12):715–719, 2004.
- [Gord78] Gordon, G.: *System simulation*, Prentice-Hall, Inc., 1978.
- [Gste98] Gstettner, S.: *Leistungsanalyse von Produktionssteuerungssystemen*, Dissertation, Universität zu Köln, 1998.
- [Günz93] Günzel, U.: *Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1993.
- [Gute01] Gutenschwager, K.: Simulation in der Lagerlogistik: Anforderungen und Möglichkeiten, *F+H Fördern und Heben*, 51(5):336–338, 2001.
- [HaMP04] Harrison, G. A.; Maynard, D. S.; Pollak, E.: Automated database and schema-based data interchange for modeling and simulation, in: Ingalls, R. G.; Rossetti, M. D.; Smith, J. S.; Peters, B. A. (Hrsg.), *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, S. 191–197, 2004.
- [Harl92] Harland, J.: *Logistikorientierte Materialflussregelung - Ein Beitrag zur ganzheitlichen, permanenten Gestaltung von Fertigungssystemen*, Dissertation, Universität Dortmund, 1992.
- [Haus03] Hauser, S.: *Ganzheitlich produzieren - Innovative Organisation und Führung*, Die Bandbreite möglicher Lösungen - Die Konzepte der Unternehmensmodelle, S. 187–194. LOG_X Verlag, 2003.
- [Hege03] Hegenscheidt, M.: *Kennliniengestützte Leistungsprognose verketteter Produktionssysteme*, Dissertation, Universität Hannover, 2003.

- [HeMi03] Heisel, U.; Michaelis, M.: *Neue Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management*, Rekonfiguration von Produktionssystemen, S. 526–542. Springer-Verlag, 2003.
- [Hild02] Hildebrandt, E.: *Quantenoptische Zufallsgeneratoren - Methoden und Analysen*, Dissertation, Universität Frankfurt, 2002.
- [HoCa91] Ho, Y.-C.; Cao, X.-R.: *Perturbation analysis of discrete event dynamic systems*, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [Hoit93] Hoitsch, H.-J.: *Produktionswirtschaft*, Verlag Vahlen, 1993.
- [Inma99] Inman, R. R.: Empirical evaluation of exponential and independence assumptions in queueing models of manufacturing systems, *Production and Operations Management*, 8(4):409–432, 1999.
- [Jürg03] Jürgens, U.: Aktueller Stand von Produktionssystemen - ein globaler Überblick, *Angewandte Arbeitswissenschaft - Zeitschrift für die Unternehmenspraxis*, 176:25–36, 2003.
- [KaWW06] Kapp, R.; Weimer, T.; Westkämper, E.: Factory cockpit: A factory simulator for the entire factory life cycle, in: *Proceedings of the 39th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, S. 203–208, Ljubljana, Slowenien, 2006.
- [KeSG84] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: *Leitfaden der systematischen Fabrikplanung*, Carl Hanser Verlag, 1984.
- [Klep03] Kleppmann, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung*, Hanser Verlag, 2003.
- [KLWW03] Kapp, R.; Löffler, B.; Wiendahl, H.-H.; Westkämper, E.: Der Logistik-Prüfstand - Skalierbare Logistiksimulation von der Lieferkette bis zum Arbeitstag, *wt Werkstattstechnik online*, 93(1-2):31–38, 2003.
- [KnSu86] Knott, K.; Sury, R. J.: A study of work-time distributions on unpaced tasks, *IIE Transactions*, 18(1):50–55, 1986.
- [KoGr95] Kosturiak, J.; Gregor, M.: *Simulation von Produktionssystemen*, Springer-Verlag, 1995.
- [Koxh67] Koxholt, R.: *Die Simulation, ein Hilfsmittel der Unternehmensforschung*, R. Oldenbourg, 1967.

- [Kraf03] Krafcik, J. F.: *Operations management: Critical perspectives on business and management*, Triumph of the Lean Production System, S. 193–210. Routledge, London, 2003.
- [Kuhn97] Kuhn, A.: *Logistik-Jahrbuch 1997*, Konstruktionssystematik für Logistikmodelle, S. 270–274. Verlagsgruppe Handelsblatt, 1997.
- [LaKe00] Law, A. M.; Kelton, W. D.: *Simulation modeling and analysis*, McGraw-Hill, 2000.
- [Lars93] Larsen, N. E.: Effects from use of alternative routings, *Manufacturing Systems*, 22:243–253, 1993.
- [LaSc01] Lay, G.; Schirrmeister, E.: Sackgasse Hochautomatisierung? - Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion, *Fraunhofer ISI - Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung*, 22, 2001.
- [Lave83] Lavenberg, S. S.: *Computer performance modeling handbook*, Academic Press, Inc., 1983.
- [Lent77] Lenten, H.-P.: Verfahren zur Nutzungsgradberechnung von Montagelinien, *Kurzberichte der Hochschulgruppe Fertigungstechnik der Technischen Hochschulen und Universitäten der Bundesrepublik Deutschland*, 1977.
- [Like03] Liker, J. K.: *The Toyota Way*, McGraw-Hill, 2003.
- [Lore84] Lorenz, W.: *Entwicklung eines arbeitsstundenorientierten Warteschlangenmodells zur Prozeßabbildung der Werkstattfertigung*, Dissertation, Universität Hannover, 1984.
- [Luca00] Lucas, T. W.: The stochastic versus deterministic argument for combat simulations: Tales of when the average won't do, *Military Operations Research*, V5 N3:8–28, 2000.
- [Ludw94] Ludwig, E.: *Modellgestützte Diagnose logistischer Produktionsabläufe*, Dissertation, Universität Hannover, 1994.
- [Lutz02] Lutz, S.: *Kennliniengestütztes Lagermanagement*, Dissertation, Universität Hannover, 2002.
- [Marc04] Marczinski, G.: Digitale Fabrik - anspruchsvolle Technologien sinnvoll einsetzen, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 99(11):666–669, 2004.

- [Marc06] Marczinski, G.: Zur Bedeutung der Digitalen Fabrik, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 101:218–221, 2006.
- [Meie95] Meier, K.-J.: Bestandsoptimierung durch Fertigungsablaufsimation, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 90(4):157–160, 1995.
- [Möll96] Möller, J.: *Kennliniengestützte Auslegung von Fabrikstrukturen*, Dissertation, Universität Hannover, 1996.
- [Mont01] Montgomery, D. C.: *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [Müll94] Müller, A.: *Leitlinie zur Problemdefinition bei der Entwicklung von komplexen Montagesystemen*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 1994.
- [NIST94] NIST: *Federal Information Processing Standards Publication 140-1: Security Requirements for Cryptographic Modules*, 1994.
- [Noch93] Noche, B.: Strategische Unternehmensentscheidungen, in: *Fortschritte in der Simulationstechnik - ASIM Simulationstechnik*, S. 299–302, September 1993.
- [NyWi03] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Logistische Kennlinien - Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*, Springer Verlag, 2003.
- [Oert77] Oertli-Cajacob, P.: *Praktische Wirtschaftskybernetik*, Carl Hanser Verlag, 1977.
- [Ohno93] Ohno, T.: *Das Toyota Produktionssystem*, Campus Verlag, 1993.
- [PaHe96] Papadopoulos, H. T.; Heavey, C.: Queueing theory in manufacturing systems analysis and design: A classification of models for production and transfer lines, *European Journal Of Operational Research*, 92(1):1–27, 1996.
- [PeNK96] Perme, T.; Noe, D.; Kopacek, P.: Computer aided assembly planning: Modeling and simulation with petri nets, in: *Proceedings of the 28th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, S. 70–75, May 15-17 1996.
- [Petr62] Petri, C. A.: *Kommunikation mit Automaten*, Dissertation, Universität Bonn, 1962.
- [Pfei01] Pfeiler, T.: *Qualitätsmanagement*, Hanser Verlag, 2001.

- [Piep98] Pieper, K. P.: *Prüf- und Arbeitsplanung sowie Prozessdokumentation mit Petrinetzen*, Dissertation, RWTH Aachen, 1998.
- [Ples88] Pleschak, F.: *Flexible Automatisierung - Wirtschaftliche Gestaltung und Einsatzvorbereitung*, Verlag Industrielle Organisation, 1988.
- [PrDu96] Prabhu, V. V.; Duffie, N. A.: Modelling and analysis of heterarchical manufacturing systems using discontinuous differential equations, *Annals of the CIRP*, Vol. 45/1:445–448, August 25-31, 1996.
- [RaBo01] Randell, L. G.; Bolmsjö, G. S.: Database driven factory simulation: A proof-of-concept demonstrator, in: Peters, B. A.; Smith, J. S.; Medeiros, D. J.; Rohrer, M. W. (Hrsg.), *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, S. 977–983, 2001.
- [RDHS99] Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Hirschberg, A.; Selke, C.: Wandel - Bedrohung oder Chance?, *io management*, 68(5):20–24, 1999.
- [ReFe97] Reinhart, G.; Feldmann, K.: *Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft? Stand und Perspektiven*, Herbert Utz Verlag, 1997.
- [Rein03] Reinfelder, A.: Die Digitale Fabrik als Wettbewerbsfaktor?, in: *FBK Industrietag 2003*, Universität Kaiserslautern, 2003.
- [Reis92] Reiss, M.: Lean Management ist Heavy Management, *Office Management*, (5):38–41, 1992.
- [ReJa81] Redeker, G.; Janisch, H.: Pufferoptimierung bei verketteten Fertigungssystemen, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 76:579–585, 1981.
- [ReKo02] Reinfelder, A.; Kotz, T.: 40 Prozent weniger Planungszeit, *Automobil-Produktion*, (5):24–36, 2002.
- [ReSe02] Reinhart, G.; Selke, C.: Automatic building of simulation models - information becomes knowledge, in: *Proceedings of the 35th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, S. 414–417, Seoul, Korea, May 13-15, 2002.
- [RiGr90] Rice, J. W.; Gross, J. R.: Simulation techniques and the WIPAC curve for balancing capacity against inventory, in: *33rd International Conference Proceedings of the American Production and Inventory Control Society*, S. 284–288, 1990.

- [RiMä01] Richter, H.; März, L.: Generic simulation: Creating the model's structure from a data base, in: Hamza, M. H. (Hrsg.), *Proceedings of the IASTED International Conference MODELLING, IDENTIFICATION AND CONTROL*, S. 740–744, 2001.
- [RoNT02] Roser, C.; Nakano, M.; Tanaka, M.: Throughput sensitivity analysis using a single simulation, in: Yücesan, E.; Chen, C.-H.; Snowdon, J. L.; Charnes, J. M. (Hrsg.), *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, S. 1087–1094, 2002.
- [Rubi81] Rubinstein, R. Y.: *Simulation and the Monte Carlo method*, John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [Sarg03] Sargent, R. G.: Verification and validation of simulation models, in: Chick, S.; Sánchez, P. J.; Ferrin, D.; Morrice, D. J. (Hrsg.), *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, S. 37–48, 2003.
- [ScBr03] Schriber, T. J.; Brunner, D. T.: Inside discrete-event simulation software: How it works and why it matters, in: Chick, S.; Sánchez, P. J.; Ferrin, D.; Morrice, D. J. (Hrsg.), *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, S. 113–123, 2003.
- [Schö06] Schöttle, M.: Alltagsnutzen muss überzeugen, *Automobil-Produktion*, S. 48–49, 2006.
- [Sche97] Scheffler, E.: *Statistische Versuchsplanung und -auswertung - Eine Einführung für den Praktiker*, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1997.
- [ScHR02] Schultmann, F.; Heese, H. S.; Rentz, O.: Leistungsanalyse elastische gekoppelter Fließproduktionssysteme - Vergleich simulationsbasierter und analytischer Verfahren, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 97(4):195–204, 2002.
- [Schl88] Schlüter, K.: *Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 1988.
- [Schn04] Schneider, M.: *Logistische Fertigungsbereichskennlinien*, Dissertation, Universität Hannover, 2004.
- [Schr03] Schraft, R. D.: Von der Vision zur Realität durch die Digitale Fabrik, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 98(6):268–269, 2003.

- [Seil04] Seila, A. F.: Spreadsheet simulation, in: Ingalls, R. G.; Rossetti, M. D.; Smith, J. S.; Peters, B. A. (Hrsg.), *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, S. 41–48, 2004.
- [SFBJ05] Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; de Beer, Ch.; Jagalski, T.: Modelling dynamics of autonomous logistic processes: Discrete-event versus continuous approaches, *Annals of the CIRP*, Vol. 54/1, August 21-27, 2005.
- [SGHT85] Staudt, E.; Groeters, U.; Hafkesbrink, J.; Treichel, H.-R.: *Kennzahlen und Kennzahlssysteme*, Erich Schmidt Verlag, 1985.
- [Shir06] Shirouzu, N.: Toyota may delay new models to address rising quality issues, *The Wall Street Journal*, 25.08.2006.
- [Spat03] Spath, D.: *Ganzheitlich produzieren - Innovative Organisation und Führung*, Revolution durch Evolution, S. 15–44. LOG_X Verlag, 2003.
- [Spie02] Spieckermann, S.: *Neue Lösungsansätze für ausgewählte Planungsprobleme in Automobilrohbau und -lackiererei*, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2002.
- [Spla95] Splanemann, R.: *Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen aus systemneutral definierten Unternehmensdaten*, Dissertation, Universität Bremen, 1995.
- [Spur95] Spur, G.: The change in production technology, *CIRP Journal of Manufacturing Systems*, 24(1):5–16, 1995.
- [Star91] Starr, P. J.: Integration of simulation and analytical submodels for supporting manufacturing decisions, *International Journal of Production Research*, 29(9):1733–1746, 1991.
- [Stel04] Steland, A.: *Mathematische Grundlagen der empirischen Forschung*, Springer-Verlag, 2004.
- [Stra02] Strate, O.: *Logistische Analyse und kennlinienunterstützte Planung von Fertigungssystemen*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2002.
- [Stri93] Strickland, S. G.: Gradient/sensitivity estimation in discrete-event simulation, in: *Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference*, S. 97–105, 1993.

- [Temp03] Tempelmeier, H.: Practical considerations in the optimization of flow production systems, *International Journal of Production Research*, 41(1):149–170, 2003.
- [TeSS06] Tempelmeier, H.; Schröer, K.; Schwarz, M.: Simultane Optimierung der Taktzeiten und Puffergrößen im Karosseriebau, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 101(1-2):35–41, 2006.
- [Thir04] Thiriez, H.: *La modélisation du risque*, Economica, 2004.
- [UIPr88] Ulrich, H.; Probst, G.: *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln*, Verlag Paul Haupt Bern, 1988.
- [VDI3633a] VDI, Düsseldorf: *Richtlinie VDI 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen: Grundlagen*, 1993.
- [VDI3633b] VDI, Düsseldorf: *Richtlinie VDI 3633, Blatt 3: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen: Grundlagen*, 1997.
- [VDI4008] VDI, Düsseldorf: *Richtlinie VDI 4008: Monte-Carlo-Simulation*, 1999.
- [VDI4499] VDI, Düsseldorf: *Richtlinie VDI 4499, Blatt 1: Digitale Fabrik - Grundlagen (Entwurf)*, 2006.
- [WaBl03] Wagner, T.; Blumenau, J.-C.: The Digital Factory, more than a planning environment, in: *Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Saarbrücken, Deutschland, 2003.
- [Wale91] Walenda, H.: *Analyse des Betriebsverhaltens elastisch verketteter automatischer Montageanlagen*, Dissertation, Universität Hannover, 1991.
- [WAQH99] Westkämper, E.; Arreguit, X.; Queisser, H. J.; Hocken, B.; Shimada, S.; Meixner, H.: The relevance of natural sciences to production engineering, in: *49th General Assembly of CIRP - Internal Documents and Reports*, S. 17–25, Montreux, Switzerland, 1999.
- [Warn96] Warnecke, H.-J.: *Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb*, Springer-Verlag, 1996.
- [WeBK03] Westkämper, E.; Bierschenk, S.; Kuhlmann, T.: Digitale Fabrik - nur was für die Großen?, *wt Werkstattstechnik online*, 93(1/2):22–26, 2003.
- [Wehl01] Wehlan, H.: *Dynamik ereignisdiskreter Systeme*, Vorlesungsumdruck Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, 2001.

- [WeSt89] Wenzel, S.; Stenkamp, B.: Klassifikationen entwickeln, *Maschinenmarkt*, 95:32–34, 1989.
- [West03] Westkämper, E.: Fabriksimulation - Trends und aktuelle Herausforderungen, in: *Fabriklogistik auf dem Prüfstand: Simulation gestaltet "best in class"* *Logistik*, 2003.
- [Whit95] White Junior, K. P.: A simple rule for mitigating initialization bias in simulation: Comparative results, in: *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vancouver, Canada, 1995.
- [Wien05] Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*, Hanser Verlag, 2005.
- [WiHe02a] Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.: Engpassanalyse von Produktionssystemen mit Kennlinien, *wt Werkstattstechnik online*, 92(9):441–446, 2002.
- [WiHe02b] Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.: Reliability and availability of complex production systems, *Advanced Manufacturing Systems and Technology, CISM Courses and Lectures*, (437):225–232, 2002.
- [WiHG02] Wiendahl, H.-P.; Hernández, R.; Grienitz, V.: Planung wandlungsfähiger Fabriken, *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 97(1-2):12–17, 2002.
- [WiHN04] Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.; Nyhuis, P.: Forecasting the performance of interlinked production systems with availability curves, *Production Engineering*, XI/2:155–160, 2004.
- [Wilk05] Wilk, C.: Digitale Fabrik - KMU nutzen Potenziale noch kaum aus, *Produktion Management*, (14):17, April 2005.
- [WiSc02] Wiendahl, H.-P.; Schneider, M.: Die logistische Prozesskennlinie - Ein neues Werkzeug zur Modellierung des logistischen Leistungsverhaltens eines Fertigungsbereiches, in: *Wissenschaftssymposium Logistik der BVL*, S. 157–170, Magdeburg, 2002.
- [WiSc06] Winter, R.; Schelp, J.: Reference modeling and method construction: a design science perspective, in: ACM Press (Hrsg.), *Proceedings of the 2006 ACM symposium on Applied computing*, S. 1561–1562, New York, USA, 2006.
- [WoJR90] Womack, J. P.; Jones, D. T.; Roos, D.: *The machine that changed the world*, Macmillian books, 1990.

- [Wutt00] Wuttke, C. C.: *Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen in der Produktionslogistik*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2000.
- [Yu02] Yu, K.-W.: *Terminkennlinie - Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich*, Dissertation, Universität Hannover, 2002.
- [ZäHö92] Zäpfel, G.; Hödlmoser, P.: Lässt sich das KANBAN-Konzept bei einer Variantenfertigung wirtschaftlich einsetzen?, *ZfB - Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 62(4):437–458, 1992.
- [ZäMK92] Zäpfel, G.; Missbauer, H.; Kappel, W.: PPS-Systeme mit belastungsorientierter Auftragsfreigabe, *ZfB - Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 62(8):897–919, 1992.
- [ZCSM05] Zäh, M. F.; Carnevale, M.; Schack, R.; Müller, S.: Methode zur Umsetzung der Digitalen Fabrik in der Luftfahrtindustrie, *Industrie Management*, 21:15–18, 2005.
- [Zenn06] Zenner, C.: *Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2006.
- [ZMAS05] Zäh, M. F.; Müller, N.; Aull, F.; Sudhoff, W.: Digitale Planungswerkzeuge - Methodik zur Bewertung von Potentialen und Risiken, *wt Werkstattstechnik online*, 95(4):175–180, 2005.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Spannungsfeld aus Rand- und Rahmenbedingungen sowie alternativer und ergänzender Verfahren der Materialflusssimulation . . .	3
Abbildung 2-1:	Abgrenzung und Zusammenhänge der in dieser Arbeit verwendeten Begrifflichkeiten	6
Abbildung 2-2:	Entwicklung der Produktvielfalt und des Produktionsvolumens in Anlehnung an [WoJR90].	8
Abbildung 2-3:	Anforderungen an produzierende Unternehmen nach [DoTB01] . . .	9
Abbildung 2-4:	Rechnerunterstützung im Fertigungs- und Produktionsumfeld . . .	11
Abbildung 2-5:	Veränderung der Tätigkeitsinhalte zu Gunsten der Planung	13
Abbildung 2-6:	Methoden, Planungsergebnisse und benötigte Schnittstellen der Digitalen Fabrik	15
Abbildung 2-7:	Entwicklung von Produktionssystemen nach [DoHS06]	16
Abbildung 2-8:	Toyota Produktionssystem nach [Haus03]	17
Abbildung 2-9:	Grundbegriffe der Systemanalyse nach [DaHu02]	20
Abbildung 2-10:	Klassifizierung von Methoden der Validierung und Verifikation . . .	22
Abbildung 2-11:	Modellbasierter Analyseprozess als Regelkreis	24
Abbildung 2-12:	Zusammenhänge zwischen Kompliziertheit und Komplexität. Darstellung nach [UIPr88].	26
Abbildung 2-13:	Modellhierarchie von kontinuierlichen, hybriden und ereignisdiskreten Systemen	28
Abbildung 2-14:	Bausteine von Petri-Netzen	30
Abbildung 2-15:	Bedienstation mit m Bedieneinheiten [Bolt89]	32
Abbildung 2-16:	Mit Warteschlangenmodellen abbildbare lineare (a.) und konvergente (b.) Fertigungssystemstrukturen.	33
Abbildung 2-17:	Dekomposition eines Fertigungssystems in Subsysteme bestehend aus zwei durch einen Puffer entkoppelte Maschinen. Darstellung nach [DaGe92].	35
Abbildung 2-18:	Betrachtung der Durchlaufzeit in Abhängigkeit der Belegung eines Fertigungssystems	36
Abbildung 2-19:	Arten der Simulation im fertigungstechnischen Umfeld	38
Abbildung 2-20:	Anwendungsgebiete der Simulation nach [ReFe97]	39

Abbildung 2-21:	Entwicklung von Aufwand und Nutzen bei einer Simulationsstudie nach [Wutt00]	41
Abbildung 2-22:	Einfluss der Simulation auf die Kosten und Änderungskosten in den einzelnen Entwicklungsphasen eines Fertigungssystems. Darstellung nach [KoGr95].	43
Abbildung 3-1:	Definition eines Problem es nach [Müll94]	45
Abbildung 3-2:	Detaillierungsgrad-Untersuchungshäufigkeit-Portfolio	47
Abbildung 3-3:	Prinzipieller Aufbau der generischen Simulation nach [RaBo01]	48
Abbildung 3-4:	Flussdiagramm für den teilautomatischen Modellaufbau	50
Abbildung 3-5:	Flussdiagramm für den Einsatz alternativer Methoden und Werkzeuge	51
Abbildung 3-6:	Flussdiagramm für den Einsatz simulationsbasierter Kennfelder	52
Abbildung 3-7:	Spannungsfeld unter Berücksichtigung einer geeigneten Klassifizierung der Analyseprobleme	53
Abbildung 3-8:	Heuristik zur Auswahl zielführender Methoden für die Modellierung und Analyse von Fertigungssystemen	54
Abbildung 4-1:	Gegenüberstellung von Zeitaufwand und Abbildungsgüte von statischen Abschätzungen, Warteschlangenmodellen und Simulationsmodellen. Darstellung nach [ArRa99].	56
Abbildung 4-2:	Ergebnisvergleich für Modell 1	58
Abbildung 4-3:	Ergebnis der möglichen Optimierungszielsetzungen im Vergleich zur Puffergleichverteilung	60
Abbildung 4-4:	Im Workshop erarbeitetes Layout und schematische Darstellung der Arbeitsplätze	61
Abbildung 4-5:	Mitarbeiterauslastung nach der Verlagerung von Arbeitsinhalten von Mitarbeiter 1 auf Mitarbeiter 2	62
Abbildung 4-6:	Taktzeitverkürzung durch Umverteilung der Arbeitsinhalte	63
Abbildung 4-7:	Schematische Darstellung der Kombination von Warteschlangen- und Simulationsmodellen	64
Abbildung 4-8:	Ausschnitt des Gesamtsimulationsmodells	66
Abbildung 4-9:	Schematische Darstellung eines Teilbereichs der Montagelinie (a) sowie der untersuchten Alternative (b)	67
Abbildung 4-10:	Verbesserungspotenziale von Ausbringung, Bestand und Durchlaufzeit	68
Abbildung 5-1:	Mögliche Darstellungsformen für Kennlinien und Kennfelder	73
Abbildung 5-2:	Ideale Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinie nach [NyWi03]	75

Abbildung 5-3:	Bisheriger Ansatz: Spezifische Modelle für Anlagen einer Anlagenklasse	78
Abbildung 5-4:	Ansatz simulationsbasierter Kennfelder: Generisches Modell einer Anlagenklasse zur Kennfelderzeugung	78
Abbildung 5-5:	Methodik für die Erzeugung simulationsbasierter Kennfelder . . .	83
Abbildung 5-6:	Verwendung eines generischen Modells	84
Abbildung 5-7:	Darstellung der Welch-Methode	89
Abbildung 5-8:	Anwendung des Batch-Verfahrens	91
Abbildung 5-9:	Erstellung der binären Reihe	92
Abbildung 5-10:	Intensitäts-Beziehungsmatrix	101
Abbildung 5-11:	Aktiv-/Passiv-Diagramm der Intensitäts-Beziehungsmatrix	102
Abbildung 5-12:	Normierung der Faktorstufen. Darstellung nach [Sche97].	104
Abbildung 5-13:	Unproblematische Nichtlineariät bei einem 2^k -Factor Design of Experiment	106
Abbildung 5-14:	Problematische Nichtlineariät bei einem 2^k -Factor Design of Experiment	106
Abbildung 5-15:	Nullversuch zur Ergänzung des 2^k -Versuchsplan. Darstellung in Anlehnung an [Acel96].	107
Abbildung 5-16:	Teilfaktorieller Versuchsplan	108
Abbildung 5-17:	Funktionsweise der COM-Schnittstelle	112
Abbildung 5-18:	Gliederung des Rüstvorgangs nach [Früh90]	113
Abbildung 5-19:	Schematische Darstellung des Rüstmodells	114
Abbildung 5-20:	Anwendung des Kennfeldes zur Bestimmung der Rüstlücke	118
Abbildung 5-21:	Verkettungsarten von Maschinen bzw. Stationen	119
Abbildung 5-22:	Simulationsbasiertes Kennfeld zur Bestimmung der technischen Zuverlässigkeit eines elastisch entkoppelten Fertigungssystems . .	121
Abbildung 5-23:	Statisches Fertigungssystemmodell und ein Auszug der Eingabemaske für kapazitätsrelevante Daten	122
Abbildung 5-24:	Schematische Darstellung des Fertigungsablaufes für das betrachtete Bauteil	123
Abbildung 5-25:	Kennfeld für das Produktionsprogramm 1	125
Abbildung 6-1:	Unterscheidung von Informations- und Systemintegration	129
Abbildung 6-2:	Zusammenhang von Detaillierungsgrad und erzielbarer Planungsqualität	130
Abbildung 6-3:	Zeitdynamisches Verhalten des Bestandes bei identischer technischer Verfügbarkeit und unterschiedlicher Störcharakteristik . . .	131
Abbildung 6-4:	Kernproblematik beim automatischen Simulationsmodelleraufbau .	131

Abbildung 6-5:	Modellierungsleitfaden und Modellierungskatalog der Digitalen Fabrik nach [Blum06]	132
Abbildung 6-6:	Statisches Modell einer Parallelbearbeitungsgruppe	133
Abbildung 6-7:	Datentypen der Digitalen Fabrik und der Simulation	137
Abbildung 6-8:	Grob- und Feinplanung in der Digitalen Fabrik	139
Abbildung 6-9:	Softwarearchitektur bestehend aus drei Schichten	139
Abbildung 6-10:	Fälle, in denen durch die Zwischenschicht des Schnittstellenkonzeptes ein Nutzen entsteht	139
Abbildung 6-11:	Detaillierte Softwarearchitektur der Schnittstelle und für die automatische Simulationsmodellerstellung benötigter Ablauf	145
Abbildung 6-12:	Bausteinbibliothek für die automatische Simulationsmodellerstellung	146
Abbildung 6-13:	Validierung des Schnittstellenkonzeptes anhand des Modellierungsfalls „Teilweise Verkettung von Stationen einer Linie“	148
Abbildung 6-14:	Validierung des Schnittstellenkonzeptes anhand des Modellierungsfalls „Chaku-Chaku-Linie - Verfolgung“	149
Abbildung 6-15:	Statisches Fertigungssystemmodell zur Validierung des Schnittstellenkonzeptes	150
Abbildung 6-16:	Automatisch generiertes Simulationsmodell des statischen Fertigungssystemmodells der Abbildung 6-15	150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Zusammenfassung der mit Modell 1 durchgeführten Experimente . . .	57
Tabelle 4-2:	Zusammenfassung der für die Verifikation und Validierung verwendeten Modelle	58
Tabelle 4-3:	Gegenüberstellung des herkömmlichen Ansatzes und der Hierarchisierung des Gesamtsystems unter Anwendung von Warteschlangen- und Simulationsmodellen	65
Tabelle 5-1:	Vergleich der Modellierungsansätze Simulation, Warteschlangenmodell und Kennlinientheorie nach [NyWi03]	77
Tabelle 5-2:	Gegenüberstellung systemspezifischer und systemneutraler simulationsbasierter Kennfelder	80
Tabelle 5-3:	Nach- und Vorteile simulationsbasierter Kennfelder	82
Tabelle 5-4:	Methoden zur Bestimmung der Einschwingphase	90
Tabelle 5-5:	Akzeptanzintervalle der Läufe	94
Tabelle 5-6:	Einträge in der Intensitäts-Beziehungsmatrix	101
Tabelle 5-7:	Faktorstufen eines 2^2 -Versuchsplans	103
Tabelle 5-8:	Gesamtmatrix für einen vollfaktoriellen 2^2 -Versuchsplan	104
Tabelle 5-9:	Gegenüberstellung der Methoden zur Sensitivitätsanalyse	109
Tabelle 5-10:	Steuerparameter mit Ober- und Untergrenzen	115
Tabelle 5-11:	Für die Kennfelderzeugung zu berücksichtigende Produktionsprogramme	124

Abkürzungsverzeichnis

AMG	Automatische Modellgenerierung
AP	Arbeitsplan
ARIS	Architektur integrierter Informationssysteme
AS	Arbeitsschritt
AT	Arbeitstag
AVO	Arbeitsvorgang
BKT	Betriebskalendertag
BPS	Bosch Produktionssystem
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CIM	Computer Integrated Manufacturing
COM	Component Object Model
DELMIA	Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Applications
DLZ	Durchlaufzeit
DoE	Design of Experiments
DPE	DELMIA Process Engineer
EDM	Engineering Data Management
EPEI	Every Part Every Interval
ERP	Enterprise Resource Planning
FG	Flussgrad
FIPS	Federal Information Processing Standards

FTT	First Time Through
HEK	Herstellkosten
HTML	Hypertext Markup Language
IGRIP	Interactive Graphics Robot Instruction Program
IMVP	International Motor Vehicle Program
IPA	Infinitesimal Perturbation Analysis
LG	Systemleistungsgröße
MA	Mitarbeiter
MS	Microsoft
MTBF	Mean Time Between Failure (Mittlere störungsfreie Laufzeit)
MTTR	Mean Time To Repair (Mittlere Reparaturzeit bzw. Stördauer)
NC	Numerical Control
NIO	Nicht in Ordnung
NIST	National Institute of Standards and Technology
NU	Nutzungsgrad
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PDM	Produktdatenmanagement
PLZP	Produktlebenszyklusplanung
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RB	Randbedingungen
RL	Rüstkücke
SAP	Systemanalyse und Programmentwicklung
TEK	Technische Kapazität
TEM	Thermal Explosion Machining
TVER	Technische Verfügbarkeit

TZUV	Technische Zuverlässigkeit
UGS	Unigraphics Solutions
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VK	Variationskoeffizient
VRE	Virtual Reality Engineering
VT	Vorgabezeit
XML	Extensible Markup Language

A Begriffe aus der Warteschlangentheorie

A.1 Kurzschreibweise

Zur einheitlichen Beschreibung elementarer Wartesysteme hat sich folgende, als *Kendall'sche Notation* bezeichnete Kurzschreibweise durchgesetzt [Bolt89]:

A/B/m – Warteschlangendisziplin

Hierin kennzeichnet A die Verteilung der Zwischenankunftszeiten und B die Verteilung der Bedienzeiten des Wartesystems, während m die Anzahl der identischen Bedieneinheiten angibt ($m \geq 1$). Für A und B werden die folgenden Symbole verwendet:

M	Exponentialverteilung
E_k	Erlang-Verteilung mit k Phasen
H_k	Hyperexponentialverteilung mit k Phasen
C_k	Cox-Verteilung mit k Phasen
D	Deterministische Verteilung, d.h. die Zwischenankunfts- bzw. Bedienzeiten sind konstant
G	Allgemeine Verteilung
GI	Allgemeine unabhängige Verteilung

Die Warteschlangendisziplin (Bedienstrategie) legt fest, welcher Auftrag aus der Warteschlange als nächstes zur Bedienung ansteht.

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Warteschlangendisziplinen. Die wichtigsten sind:

- *FCFS* (First-Come-First-Served): Die Aufträge werden in der Reihenfolge ihrer Ankunft bedient. Ist in der Kendall'schen Notation keine Disziplin angegeben, so impliziert dies FCFS.
- *LCFS* (Last-Come-First-Served): Der zuletzt angekommene Auftrag wird als nächster bedient.
- Weitere wichtige Warteschlangendisziplinen sind in [Bolt89] aufgeführt.

A.2 Gammaverteilung

Die Dichtefunktion der Gammaverteilung ist definiert als:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } x < 0 \\ \frac{\lambda}{\Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} e^{-\lambda x} & \text{wenn } x \geq 0 \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

mit:

$$\Gamma(\alpha) \quad \dots \quad \text{Eulersche Gammaverteilung}$$

Der Erwartungswert und die Varianz sind folgendermaßen definiert:

$$E(X) = \frac{\alpha}{\lambda}, \quad \text{Var}(X) = \frac{\alpha}{\lambda^2} \quad (\text{A.2})$$

Durch die Parameter α und λ ist die Dichtefunktion vollständig definiert. Ein Maß für die Streuung der Verteilung ist der Variationskoeffizient, der Quotient aus Standardabweichung und Erwartungswert. Es ist:

$$\begin{aligned} \text{VK} & \dots \text{ Variationskoeffizient} \\ m & \dots \text{ Erwartungswert} \end{aligned}$$

Dann gilt für die Parameter:

$$\alpha = \frac{1}{\text{VK}^2}, \quad \lambda = \frac{1}{m \cdot \text{VK}^2} \quad (\text{A.3})$$

Für $\alpha = 1$ entspricht die Gammaverteilung der Exponentialverteilung. Für $\alpha \rightarrow \infty$ nähert sie sich der Normalverteilung. Dadurch kann die Gammaverteilung für ein breites Anwendungsgebiet verwendet werden. In der Literatur und in Plant Simulation wird eine andere Parametrierung der Verteilungsfunktion gebraucht. Anstatt λ wird

$$\beta = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{A.4})$$

definiert.

B Simulationsbasierte Kennfelder

B.1 Mittelwerte

B.1.1 Berechnung des laufenden Mittelwertes

Als Laufender Mittelwert wird bezeichnet, wenn bei einem einzelnen Datensatz zu jedem Zeitpunkt i der Mittelwert aller (Mess-) Werte vom Beginn ($t = 0$) bis zum Zeitpunkt $t = t(i)$ gebildet wird:

$$\bar{Y}(i)_{\text{laufend}} = \frac{\sum_{s=1}^i Y(s)}{i} \quad (\text{B.1})$$

B.1.2 Berechnung des gleitenden Mittelwertes

Als gleitender Mittelwert wird bezeichnet, wenn bei einem einzelnen Datensatz zu jeden Zeitpunkt i der Mittelwert von i und den w vorangegangenen und w nachfolgenden Werten gebildet wird:

$$\bar{Y}(i)_{\text{gleitend}} = \frac{\sum_{s=-w}^w Y(i+s)}{2w+1} \quad (\text{B.2})$$

B.2 Systemneutrale Kennfelder: Rüstlücke

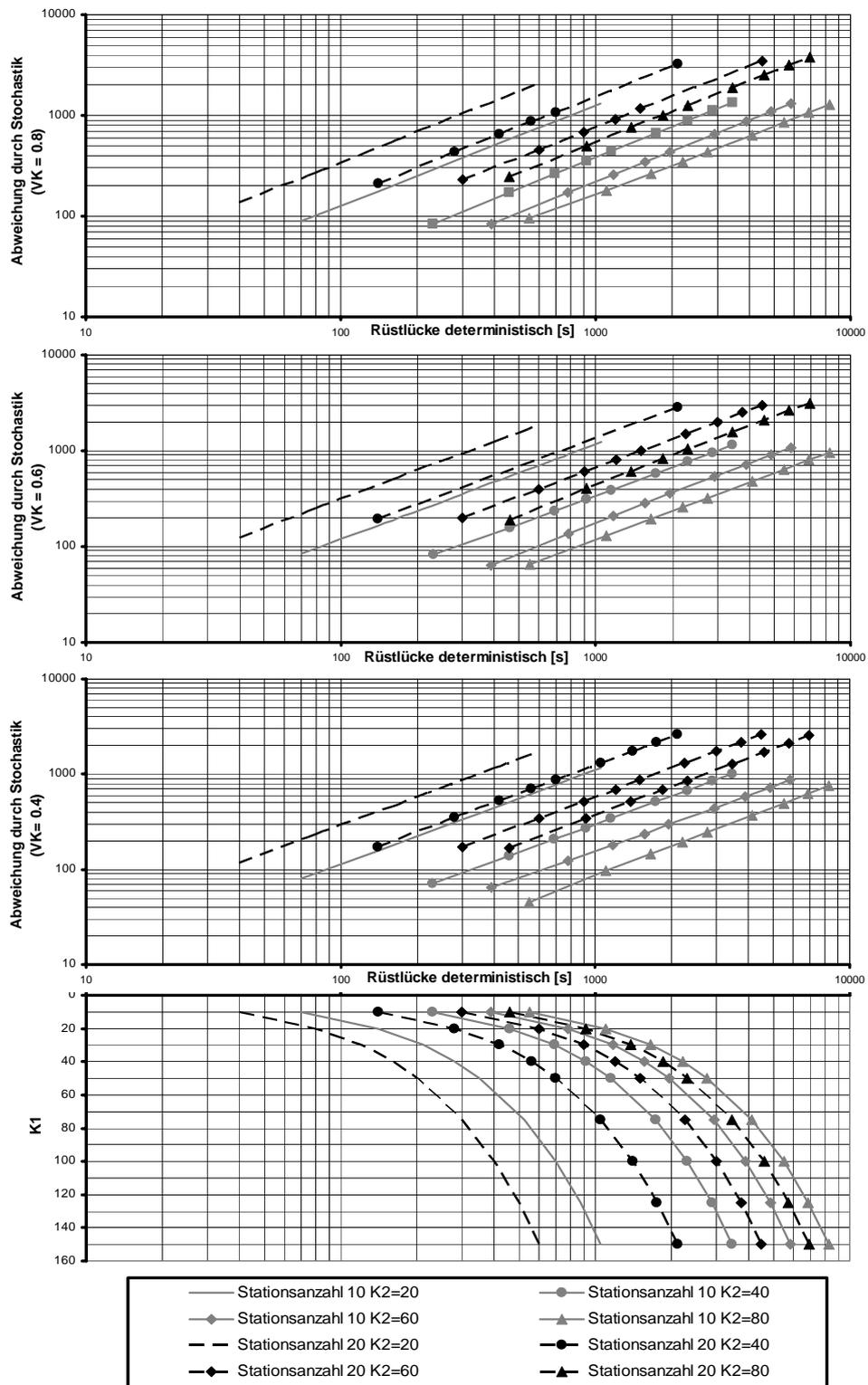


Abbildung B-1: Kennfeld zur Bestimmung der Rüstlücke

B.3 Systemspezifische Kennfelder: Produktionsprogrammplanung

Das in Abschnitt 5.6.2 beschriebene Beispiel führt zu den folgenden drei Kennfeldern:

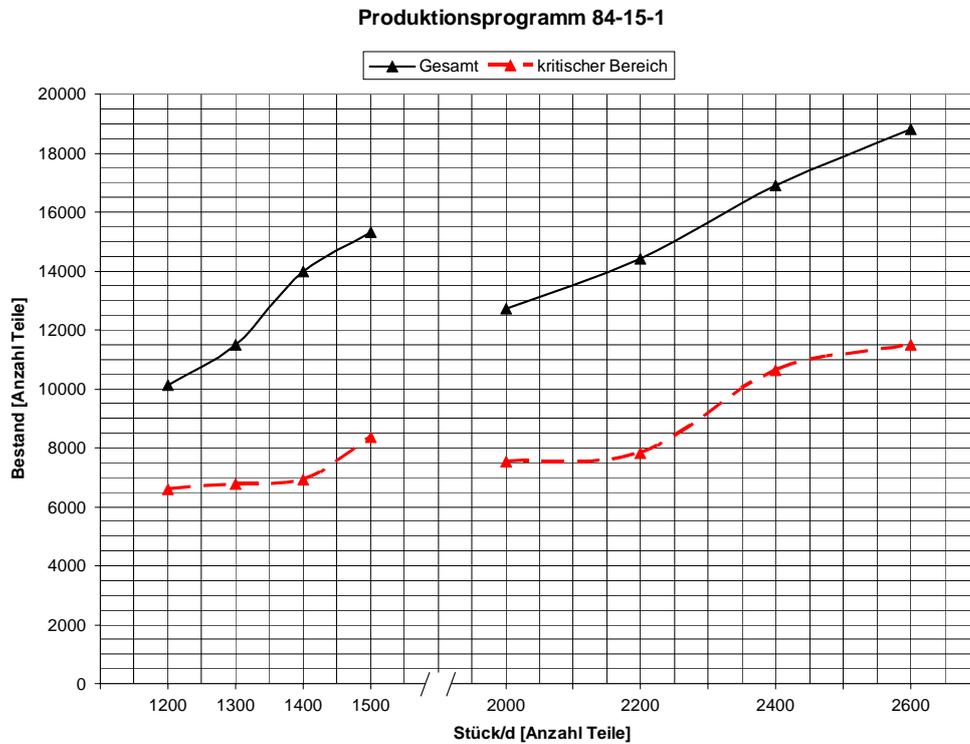


Abbildung B-2: Kennfeld für das Produktionsprogramm 1

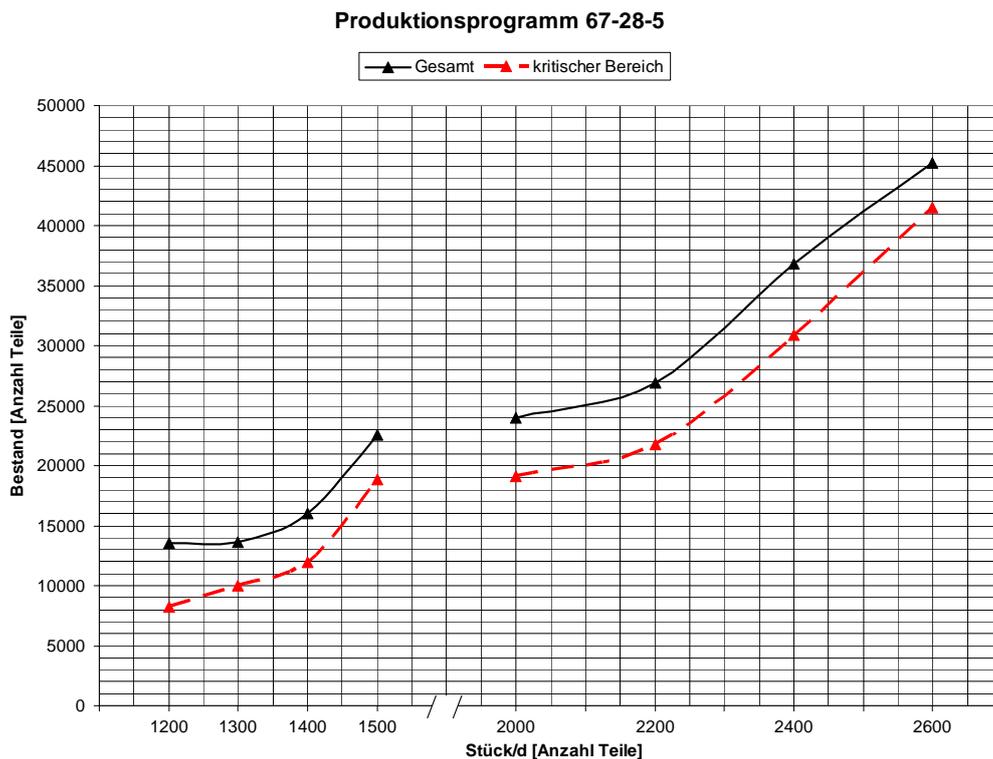


Abbildung B-3: Kennfeld für das Produktionsprogramm 2

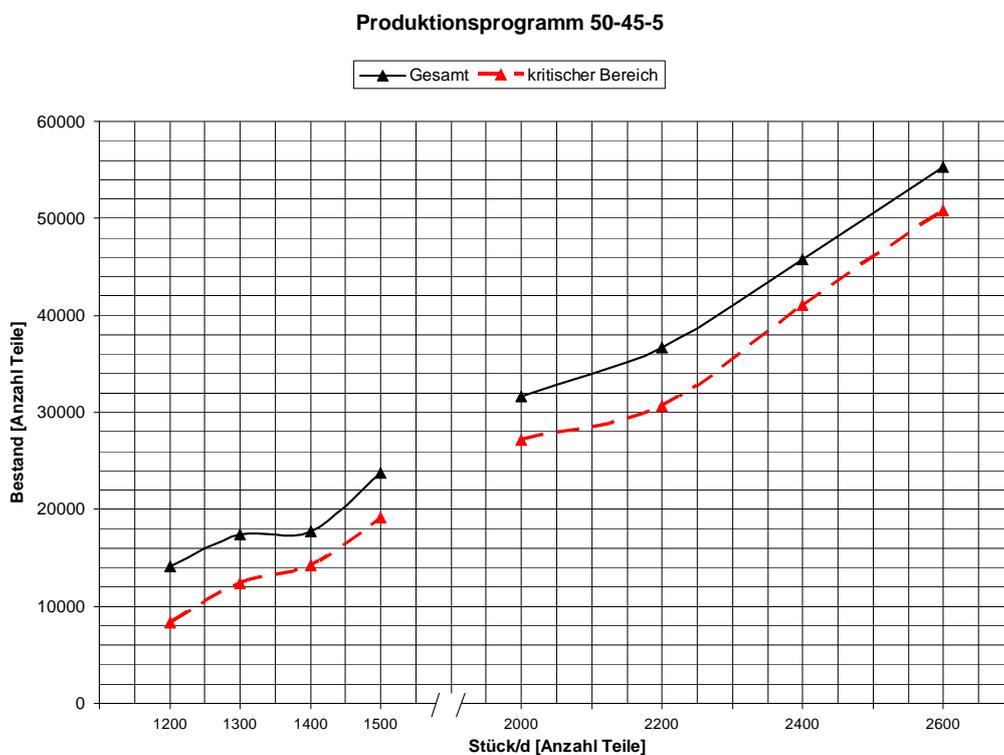


Abbildung B-4: Kennfeld für das Produktionsprogramm 3

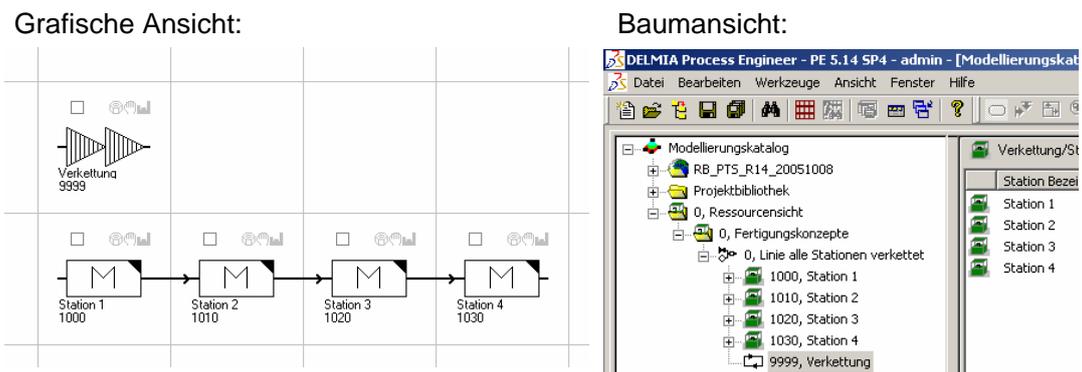
C Simulationsschnittstelle

C.1 Modellierungskatalog

Der in Abschnitt 6.3.2 beschriebene Modellierungsleitfaden beinhaltet einen Modellierungskatalog. In diesem werden relevante Modellierungsfälle für statische Fertigungssystemmodelle festgelegt. Damit liegen die statischen Fertigungssystemmodelle in einer standardisierten Form vor. Die zehn zu unterscheidenden Modellierungsfälle werden im Folgenden ausführlich anhand eines einfachen Beispiels beschrieben.

C.1.1 Verkettung aller Stationen einer Linie

Beschreibung: Alle Stationen sind durch eine begrenzte Pufferkapazität elastisch entkoppelt. Die Stationen 1-4 werden im DPE mit dem Strukturelement *Verkettung* verknüpft.



Relation der Stationen mit dem Strukturelement Verkettung:

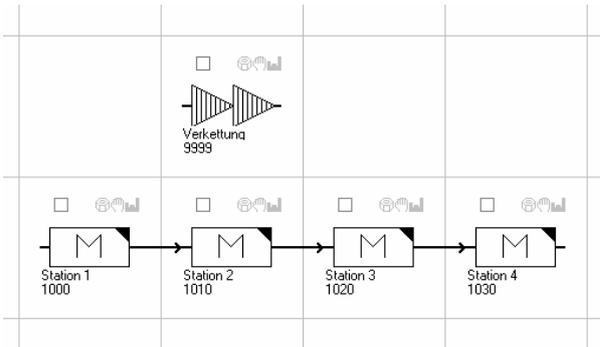


Abbildung C-1: Modellierungsfall: Alle Stationen verkettet

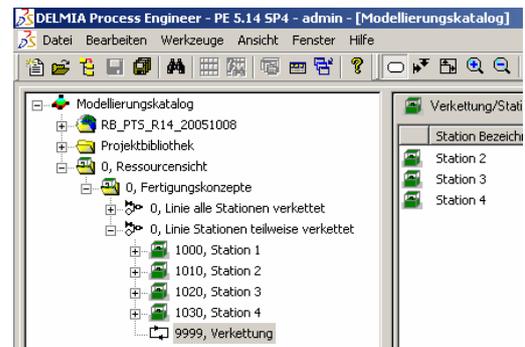
C.1.2 Teilweise Verkettung von Stationen einer Linie

Beschreibung: Die Stationen 2-4 sind durch eine begrenzte Pufferkapazität elastisch entkoppelt und werden in der statischen Berechnung durch eine Verkettung in aggregierter Form betrachtet. Station 1 ist vollständig entkoppelt und wird separat berechnet.

Grafische Ansicht:



Baumansicht:



Relation der Stationen 2 – 4 mit dem Strukturelement Verkettung:



Abbildung C-2: Modellierungsfall: Stationen teilweise verkettet

C.1.3 Maschinenpool - Parallelbearbeitungsgruppe

Beschreibung: Die parallelen Stationen 2a und 2b werden in der statischen Berechnung durch eine Parallelbearbeitungsgruppe modelliert. Beide Stationen werden mit dem Strukturelement *Parallelbearbeitungsgruppe* verknüpft. Ein typabhängiger Fertigungsfluss wird nicht vorgegeben.

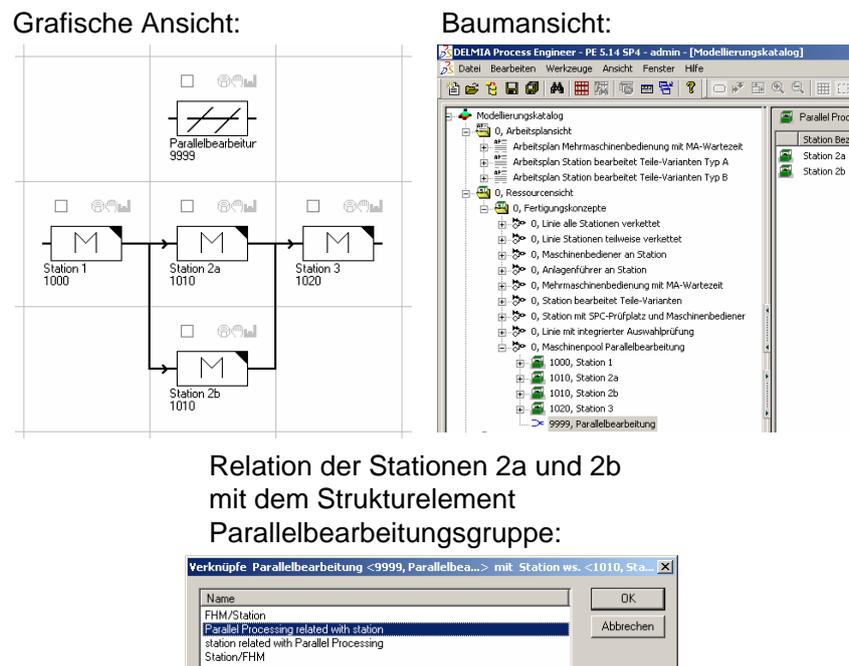
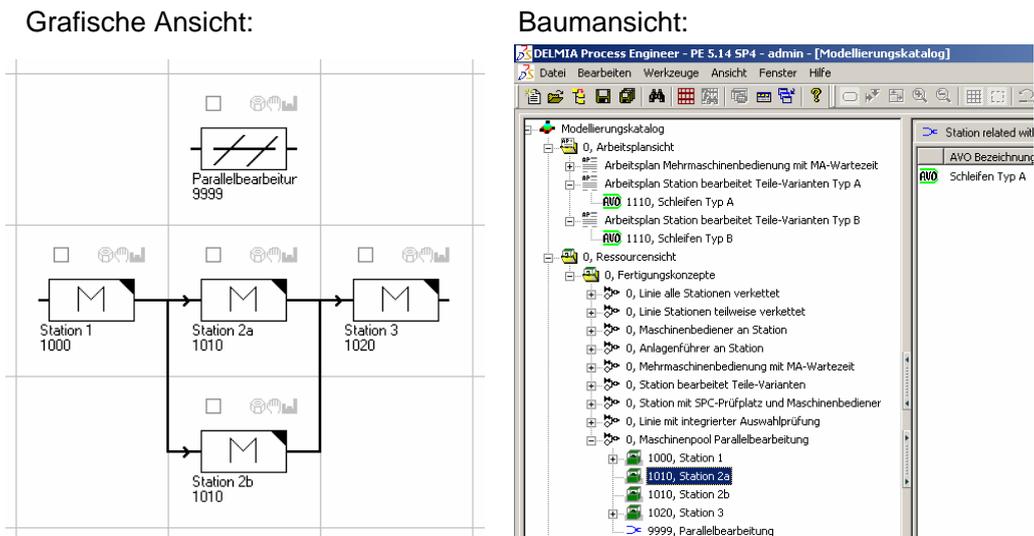


Abbildung C-3: Modellierungsfall: Parallelbearbeitung

C.1.4 Maschinenpool - Typabhängiger Fertigungsfluss

Beschreibung: Die parallelen Stationen 2a und 2b werden in der statischen Berechnung durch eine Parallelbearbeitungsgruppe modelliert. Beide Stationen werden mit dem Strukturelement *Parallelbearbeitungsgruppe* verknüpft. Durch Zuordnung von Arbeitsvorgängen (AVO) aus den Arbeitsplänen der Produkttypen wird ein typabhängiger Fertigungsfluss vorgegeben.



Station 2a ist mit dem Arbeitsvorgang aus dem Arbeitsplan Produkttyp A,
Station 2b mit dem Arbeitsvorgang aus dem Arbeitsplan Produkttyp B zugeordnet

Abbildung C-4: Parallelbearbeitung mit typabhängigem Fertigungsfluss

C.1.5 Linie mit integrierter Auswahlprüfung

Beschreibung: Prüfstation 2 ist eine in die Linie integrierte Auswahlprüfung, die nur 10% der Teile prüft. Die restlichen 90% der Teile müssen an dieser Station vorbeigeführt werden.

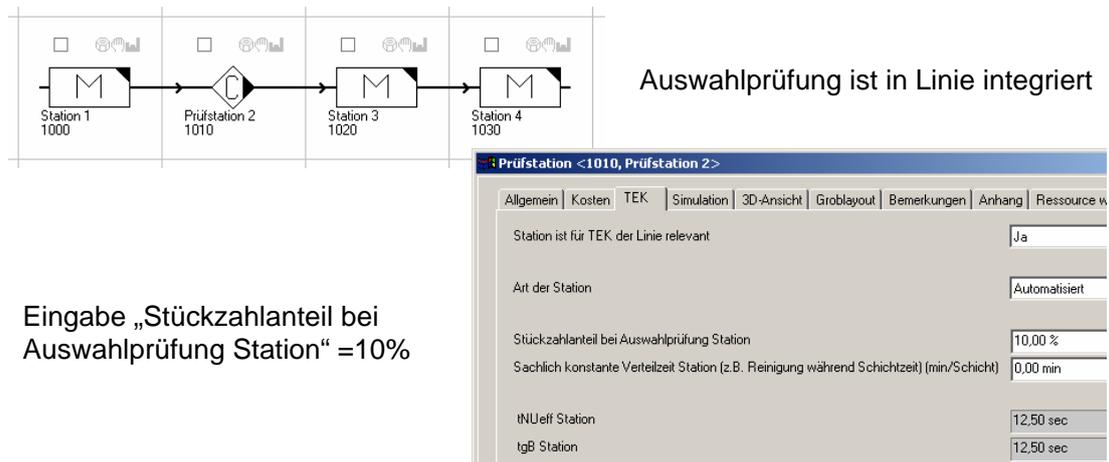


Abbildung C-5: Linie mit integrierter Auswahlprüfung

C.1.6 Anlagenführer

Beschreibung: Der indirekte Mitarbeiter (Anlagenführer) ist im Modell vorhanden, aber keiner Station zugeordnet. Der Anlagenführer hat keinen direkten Einfluss auf die Leistungsgrößen des Fertigungssystems. Er wird jedoch für die Kostenberechnung und die Berechnung der Kennzahl *Arbeitseffizienz* benötigt.

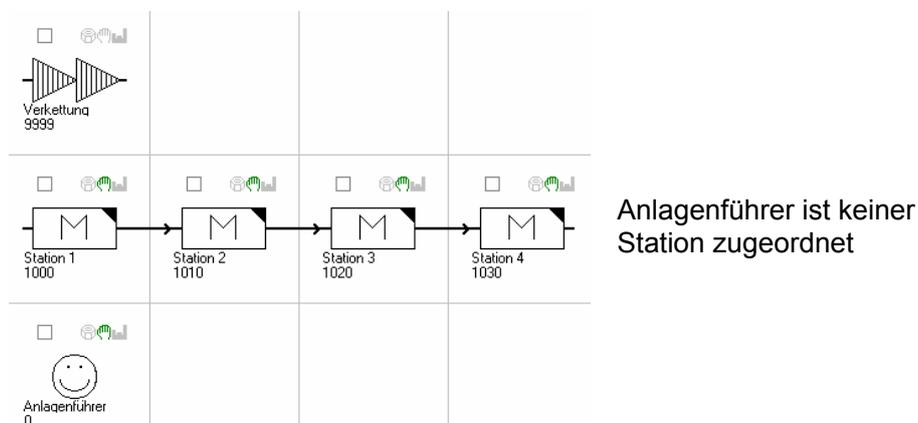


Abbildung C-6: Anlagenführer

C.1.7 Maschinenbediener an Station

Beschreibung: Der direkte Mitarbeiter (Maschinenbediener) ist Station 1 zugeordnet. Dadurch nimmt er Einfluss auf die Leistungsgrößen des Fertigungssystems.

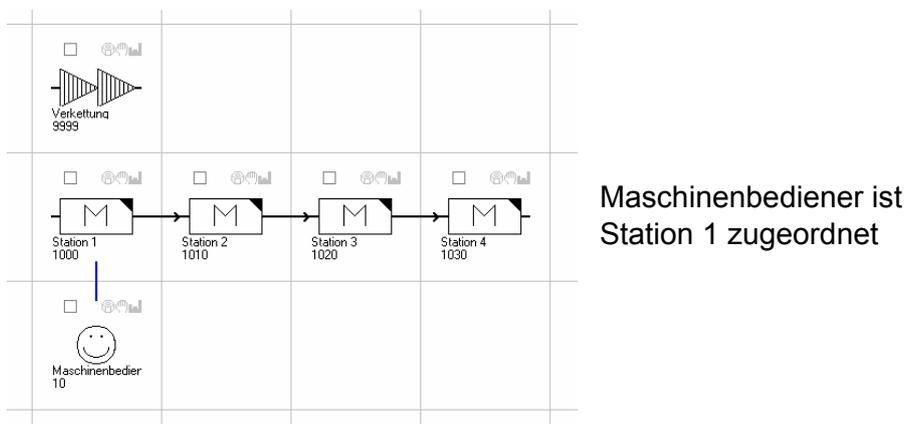
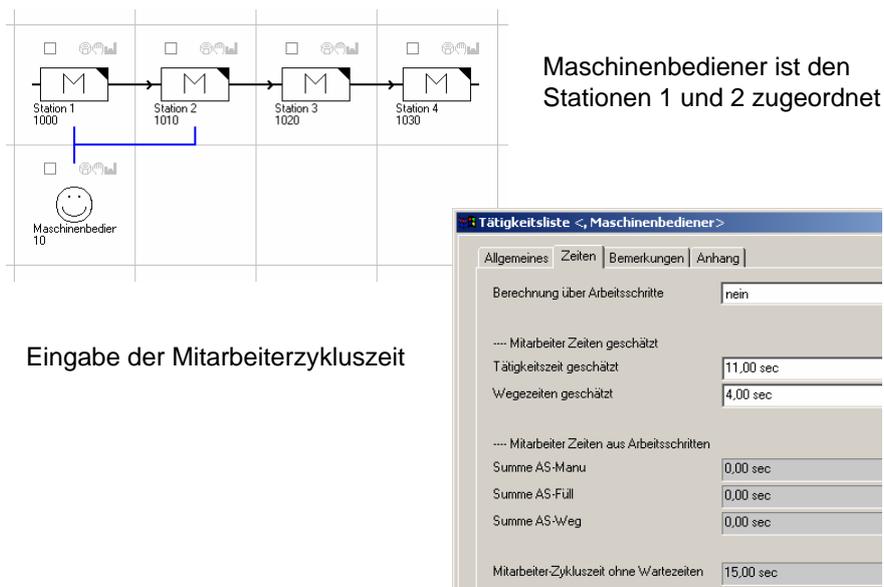


Abbildung C-7: Maschinenbediener an Station

C.1.8 Mehrmaschinenbedienung

Beschreibung: Der direkte Mitarbeiter (Maschinenbediener) ist den Stationen 1 und 2 zugeordnet. Die Mitarbeiterzykluszeit beeinflusst direkt die Leistungsgrößen des Fertigungssystems.

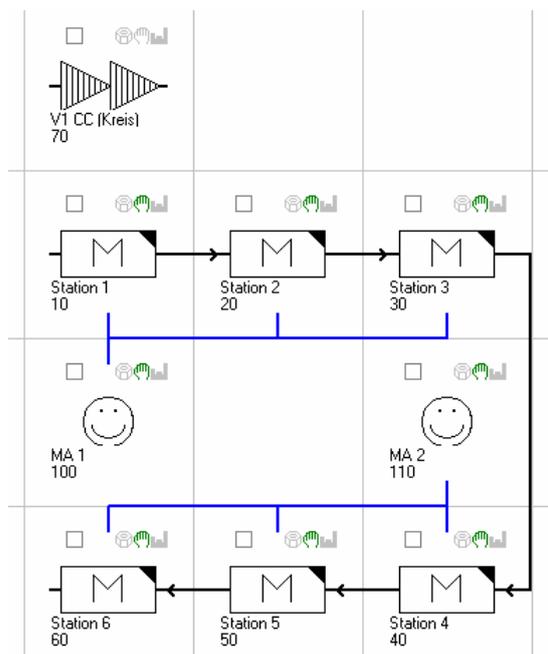


Eingabe der Mitarbeiterzykluszeit

Abbildung C-8: Modellierungsfall: Mehrmaschinenbedienung

C.1.9 Chaku-Chaku-Linie - Unterkreise

Beschreibung: Eine *Chaku-Chaku-Linie* (chaku-chaku (jap.)= laden-laden) ist eine meist U-förmig angeordnete Linie, in der die Stationen die Teile automatisch entladen und der Mitarbeiter in einer definierten Reihenfolge zwischen den Stationen den Transport vornimmt. Bei der Variante *Chaku-Chaku-Linie - Unterkreise* gibt es mindestens zwei so genannte *Unterkreise*, welchen jeweils ein Mitarbeiter zugeordnet ist. Alle Stationen sind elastisch entkoppelt und deshalb zusätzlich mit dem Strukturelement Verkettung verknüpft.



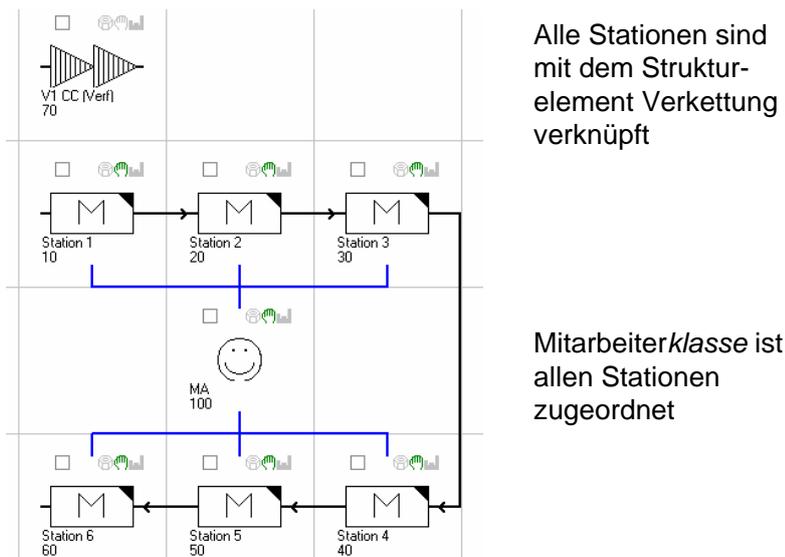
Alle Stationen sind mit dem Strukturelement Verkettung verknüpft.

Mitarbeiter 1 ist den Stationen 1-3, Mitarbeiter 2 den Stationen 4-6 zugeordnet.

Abbildung C-9: Modellierungsfall: Chaku-Chaku-Linie - Kreisläufe

C.1.10 Chaku-Chaku-Linie - Verfolgung

Beschreibung: Bei dieser Variante der Chaku-Chaku-Linie gibt es nur einen Mitarbeiterkreislauf, dem eine Mitarbeiterklasse zugeordnet ist. Durch die Angabe der Mitarbeiter in der Verfolgung wird festgelegt, aus wie viele Mitarbeitern die Mitarbeiterklasse besteht und wie viele Mitarbeiter sich damit in dem Mitarbeiterkreislauf in der Verfolgung befinden. Alle Stationen sind elastisch entkoppelt und deshalb zusätzlich mit dem Strukturelement Verkettung verknüpft.



Angabe „Anzahl Mitarbeiter in Verfolgung“ = 2

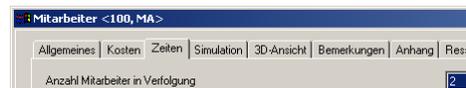


Abbildung C-10: Modellierungsfall: Chaku-Chaku-Linie - Verfolgung

C.2 Detaillierter Ablauf der automatischen Modellgenerierung

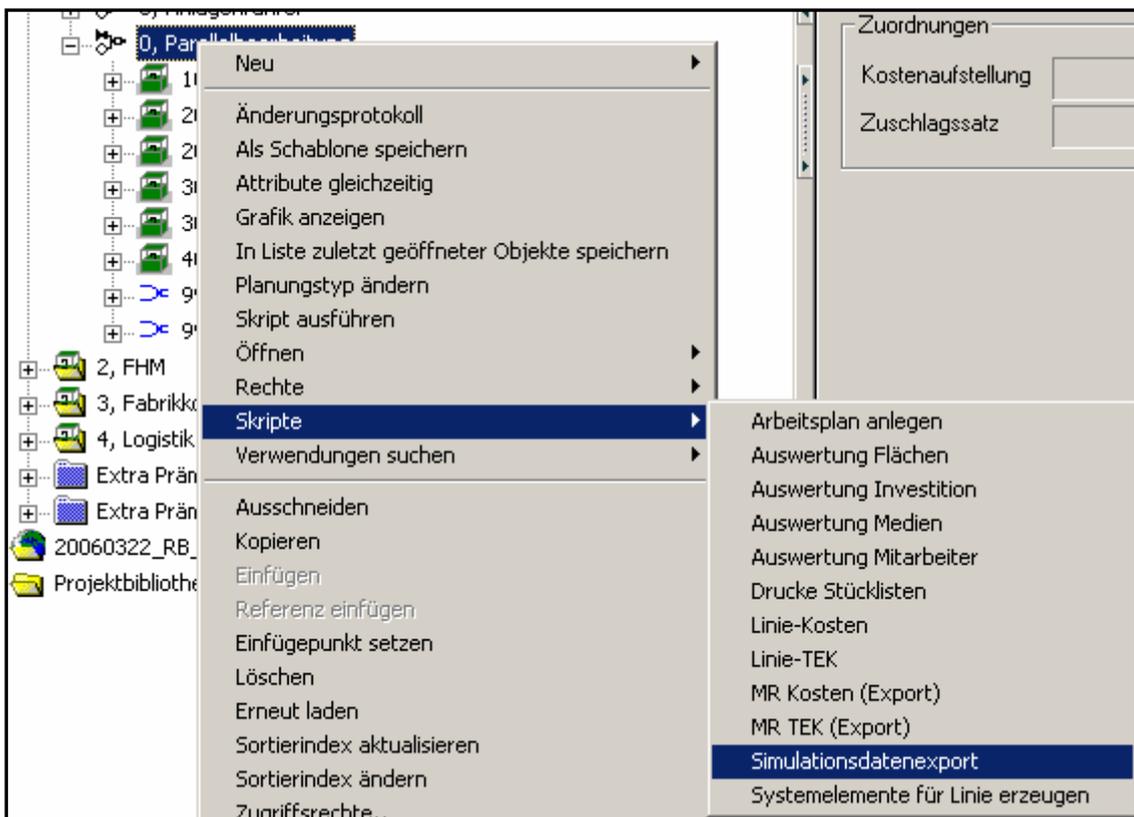


Abbildung C-11: Schritt 1: Export von Simulationsdaten aus dem DPE

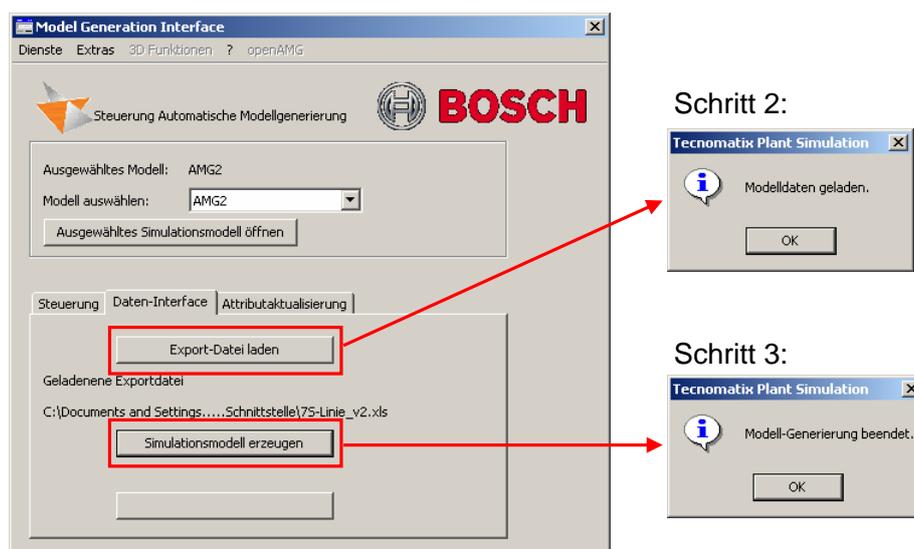


Abbildung C-12: Schritt 2 und 3: Laden der Daten und Modellgenerierung

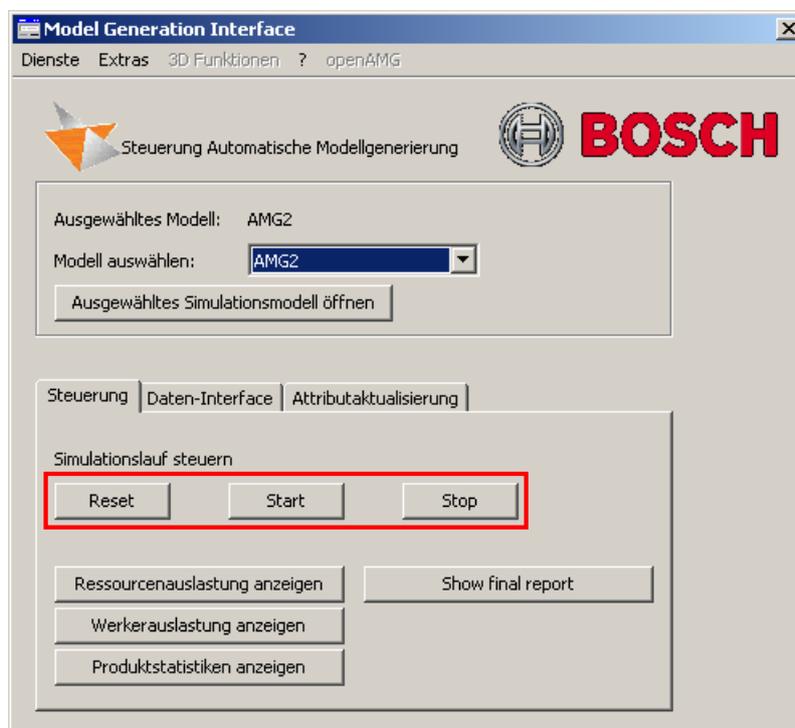


Abbildung C-13: Schritt 4: Steuerung des automatisch generierten Modells

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name	Jürgen Ulrich Fritz
Geburtsdatum	15. Februar 1979
Geburtsort	Stuttgart-Bad Cannstatt
Familienstand	verheiratet

Schulische Ausbildung:

09.1985 - 07.1994	Hohewart Grund- und Realschule, Stuttgart
08.1994 - 07.1995	Schloßrealschule, Stuttgart
09.1995 - 06.1998	Technisches Gymnasium der Max-Eyth-Schule, Stuttgart

Studium:

09.1999 - 07.2004	Studium der Technischen Kybernetik, Universität Stuttgart
08.2004 - 08.2007	Promotionsstudium, Universität des Saarlandes

Praktika:

09.2003 - 11.2003	Praktikum bei GlaxoSmithKline Biologicals, Rixensart, Belgien
05.2004 - 07.2004	Praktikum bei der Robert Bosch GmbH, Schwieberdingen

Berufstätigkeit:

05.2001 - 07.2001	Wissenschaftliche Hilfskraft am Fraunhofer IAO (Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation), Stuttgart
08.2004 - 07.2007	Doktorandentätigkeit bei der Robert Bosch GmbH in der Abteilung „Produktionsgestaltung“ des Zentralbereiches Forschung und Voraufwicklung, Schwieberdingen und in der Zentralabteilung „Fertigungsplanung, Entwicklung Produktionssysteme und Investitionsplanung“, Stuttgart-Feuerbach
Ab 08.2007	Produktingenieur bei der Bosch Sensortec GmbH

Universität des Saarlandes

Schriftenreihe Produktionstechnik

Herausgeber: H. Bley und C. Weber

ISSN 0945-6244

Verzeichnis der bisher erschienenen Bände (Stand: Juli 2007)

- Band 1** Schulte, Michael: *Grundlagen der automatischen funktionsorientierten Klassifizierung technischer Gegenstände im Rahmen intelligenter Konstruktionsunterstützungssysteme (CAD-Systeme)*.
ISBN 3-930429-30-6 (1993)
- Band 2** Schulte, Michael; Stark, Rainer: *Definition und Anwendung höherwertiger Konstruktionselemente (Design Features) am Beispiel von Wellenkonstruktionen*.
ISBN 3-930429-31-4 (1993)
- Band 3** Mischo, Armin: *Modellbasierte Akquisition und Implementierung des technologischen Wissens für die NC-Detailplanung*.
ISBN 3-930429-32-2 (1993)
- Band 4** Rech, Karsten: *Regelungsmodell zur Konzipierung der Informationsverarbeitung in der Produktionslogistik*.
ISBN 3-930429-33-0 (1994)
- Band 5** Stark, Rainer: *Entwicklung eines mathematischen Toleranzmodells zur Integration in (3D-) CAD-Systeme*.
ISBN 3-930429-34-9 (1994)
- Band 6** Dietz, Stefan: *Wissen zur Auswahl von Montagemitteln, seine Aufbereitung und Verarbeitung in CA-Systemen*.
ISBN 3-930429-35-7 (1994)
- Band 7** Muth, Michael: *Repräsentation von Konstruktionswissen unter Verwendung des objektorientierten Paradigmas*.
ISBN 3-930429-36-5 (1994)
- Band 8** Stadelmeyer, Volker: *Entscheidungsunterstützung zur technischen Planung im Fertigungsbereich*.
ISBN 3-930429-37-3 (1994)
- Band 9** Jostock, Jürgen: *Aufbau eines hierarchisch organisierten, wissensunterstützten Fertigungsregelungssystems*.
ISBN 3-930429-38-1 (1994)
- Band 10** Müller, Andreas: *Leitlinie zur Problemdefinition bei der Entwicklung von komplexen Montagesystemen*.
ISBN 3-930429-39-X (1994)

- Band 11** Labisch, Susanna: *Untersuchung des Kaltpressens pulverförmiger Stoffe mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung der Trockenpressung von Sekundärkornmassen.*
ISBN 3-930429-40-3 (1995)
- Band 12** Schmidt, Jürgen: *Untersuchung zur Reinheit spanend bearbeiteter Oberflächen unter besonderer Berücksichtigung des erzeugenden Prozesses.*
ISBN 3-930429-41-1 (1996)
- Band 13** Cuber, Michael: *Entwicklung einer Strategie zur qualitätsgerechten Modellierung des Entwicklungs-/Konstruktionsprozesses.*
ISBN 3-930429-42-X (1996)
- Band 14** Avgoustinov, Nicolay: *Minimizing the Labour for Exchange of Product Definition Data Among N CAx-Systems.*
ISBN 3-930429-43-8 (1997)
- Band 15** Bär, Thomas: *Einsatz der Feature-Technologie für die Integration von Berechnungen in die frühen Phasen des Konstruktionsprozesses.*
ISBN 3-930429-44-6 (1998)
- Band 16** Seel, Uwe: *Robotergestützte Zellenkalibrierung als Basis einer Feature-basierten Montageplanung.*
ISBN 3-930429-45-4 (1999)
- Band 17** Britten, Werner: *CAD-basierte Übersetzung geometrischer Toleranzen in vektorielle Darstellungen.*
ISBN 3-930429-46-2 (1999)
- Band 18** Jung, Dieter: *Praxis- und Prozessnahes Optimierungsmodell (PPO-Modell) zur systematischen, kontinuierlichen Verbesserung komplexer industrieller Prozesse.*
ISBN 3-930429-47-0 (2000)
- Band 19** Muth, Michael: *CAD-M(COMPUTER AIDED DESIGN using MULTIMEDIA)-Repräsentation und Nutzung von Konstruktionswissen in verteilten Entwicklungsumgebungen.*
ISBN 3-903429-48-9 (2000)
- Band 20** Wuttke, Claas Christian: *Mehrfachnutzung von Simulationsmodellen in der Produktionslogistik.*
ISBN 3-930429-49-7 (2000)
- Band 21** Oltermann, Ralf: *Systematik zur Abschätzung von Fertigungstoleranzen auf Grundlage einer Auswertung der laufenden Fertigung.*
ISBN 3-93042-50-0 (2000)
- Band 22** Werner, Horst: *Integration von CAx-Funktionalitäten in einem neuartigen Konstruktionssystem.*
ISBN 3-930429-51-9 (2001)

- Band 23** Behring, Stefan: *Messungen von Belegungen durch Fertigungshilfsstoffe auf metallenen Werkstücken mittels mIR-Fasersonde.*
ISBN 3-930429-52-7 (2001)
- Band 24** Thome, Oliver: *Durchgängige Erfassung und Verarbeitung von Toleranzinformationen.*
ISBN 3-930429-53-5 (2001)
- Band 25** Junk, Stefan: *Inkrementelle Blechumformung mit CNC-Werkzeugmaschinen: Verfahrensgrenzen und Umformstrategien.*
ISBN 3-930429-54-3 (2003)
- Band 26** Braun, Peter: *Entwicklung einer Methodik zur Untersuchung des Einflusses von Kühlschmierstoffen auf das Härteverhalten von Einsatzstählen am Beispiel des Kühlschmierstoffs ARAL Sarol 470 EP und der Einsatzstähle C15, 16MnCr5, 9SMnPb28.*
ISBN 3-930429-55-1 (2003)
- Band 27** Rattay, Bernd: *Untersuchung der Einflußgrößen auf die Formfüllung und die Werkzeugbelastungen beim Prägen von Mikrokanalstrukturen in Metallische Bleche.*
ISBN 3-930429-56-X (2003)
- Band 28** Franke, Christina: *Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik.*
ISBN 3-930429-57-8 (2003)
- Band 29** 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems
ISBN 3-930429-58-6 (2003)
- Band 30** Korne, Thomas: *Fertigungsorientierte Analyse und Optimierung von Gruppenarbeit in der Automobil-Endmontage unter besonderer Berücksichtigung von Informationstechnologie und Digitaler Fabrik.*
ISBN 3-930429-59-4 (2004)
- Band 31** Fischer, Nikolaus: *Messungen geringster organischer Belegungen auf diffus reflektierenden Oberflächen mit einem mIR-faseroptischen Prüfkopf.*
ISBN: 3-930429-60-8 (2005)
- Band 32** Bernardi, Markus: *Gestaltung eines mechatronikorientierten Entwicklungsprozesses für mobile Arbeitsmaschinen und des dazugehörigen Entwicklungsumfeldes.*
ISBN 3-930429-61-6 (2005)
- Band 33** Ryu, Shi-Bok: *Development of a Microklystrode Vacuum Tube: A Focus on the Improvement of Modeling and Manufacturing Processes.*
ISBN 3-930429-62-4 (2005)

- Band 34** Vielhaber, Michael: *Zusammenbauorientiertes Konstruieren im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie am besonderen Beispiel des Karosserierohbaus.*
ISBN 3-930429-63-2 (2005)
- Band 35** Steinbach, Michael: *Systematische Gestaltung von Product-Service Systems.*
ISBN 3-930429-64-0 (2005)
- Band 36** Blumenau, Jean-Claude: *Lean Planning unter besonderer Berücksichtigung der Skalierung wandlungsfähiger Produktionssysteme.*
ISBN 3-930429-65-9 (2006)
- Band 37** Zenner, Christian: *Durchgängiges Variantenmanagement in der Technischen Produktionsplanung.*
ISBN 3-930429-66-7 (2006)
- Band 38** Bossmann, Marc: *Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung*
ISBN 978-3-930429-67-7 (2007)
- Band 39** Deubel, Till: *Anforderungs-, kosten- und wertgetriebene Steuerung des Produktentwicklungsprozesse.*
ISBN 978-3-930429-68-4 (2007)
- Band 40** Oberhausen, Michael: *Der Einsatz laserinduzierter Fluoreszenzmessungen zur Detektion geringster organischer Belegungen auf Oberflächen.*
ISBN 978-3-930429-69-1 (2007)
- Band 41** Fritz, Jürgen: *Zielführende Modellierung und Analyse schlanker Fertigungssysteme mit der Digitalen Fabrik.*
ISBN 978-3-930429-70-7 (2007)