

Monika Trost

**Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und  
-analyse auf Basis stochastischer  
Netzverfahren**

**D 93**  
**ISBN 3-936100-29-2**

**Institut für Maschinenelemente**

Antriebstechnik • CAD • Dichtungen • Zuverlässigkeit

Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9  
70569 Stuttgart  
Tel. (0711) 685 – 66170

Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche, Ordinarius und Direktor

# **Gesamtheitliche Anlagenmodellierung und -analyse auf Basis stochastischer Netzverfahren**

Von der Fakultät

Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik

der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Monika Trost**

geboren in Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. B. Bertsche

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. E. Schnieder

Tag der Einreichung: 19.12.2007

Tag der mündlichen Prüfung: 25.09.2008

Institut für Maschinenelemente

2008



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Leiter des Instituts für Maschinenelemente, für die Ermöglichung und die ständige Förderung der Arbeit sowie für das mir stets entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Eckehard Schnieder, Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik der Technische Universität Braunschweig, danke ich für die Übernahme des Mitberichts, die kritische Durchsicht und die konstruktiven Hinweise.

Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeitern des Instituts für das menschlich sehr angenehme und wissenschaftlich produktive Arbeitsklima. Insbesondere danke ich den Mitgliedern des „Zuv-Teams“ für die ständige kollegiale Unterstützung und die vielen gemeinsame Aktivitäten. Ebenso danke ich allen wissenschaftlichen Hilfskräften sowie Studien- und Diplomarbeitern für Ihr Engagement und Ihren Beitrag zu dieser Arbeit.



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Ziele der Arbeit .....	2
1.2	Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung und Technik.....</b>	<b>5</b>
2.1	Structured Analysis and Design Technique (SADT).....	7
2.2	Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK).....	8
2.3	Programmablaufplan (Flussdiagramm) .....	8
2.4	UML (Unified Modeling Language) .....	9
2.5	Warteschlangenmodelle .....	11
2.6	Markovmodelle .....	13
2.7	Petrinetze.....	14
<b>3</b>	<b>Grundlagen.....</b>	<b>18</b>
3.1	Definitionen .....	18
3.2	Statistische Verteilungsfunktionen .....	19
3.2.1	Normalverteilung .....	19
3.2.2	Exponentialverteilung .....	20
3.2.3	Weibullverteilung.....	20
3.2.4	Logarithmische Normalverteilung .....	21
3.2.5	Gammaverteilung.....	21
3.2.6	Erlangverteilung.....	21
3.3	Modellbildung und -analyse .....	22
<b>4</b>	<b>Systemabgrenzung und -beschreibung .....</b>	<b>27</b>
4.1	Abgrenzung des Systems Produktion .....	27
4.1.1	Bearbeitungs- bzw. Montagesystem .....	28
4.1.2	Materialflusssystem .....	28
4.1.3	Informationssystem.....	29
4.2	Systemanalyse des Systems Produktion .....	29
4.2.1	Hierarchie.....	30
4.2.2	Elemente.....	31
4.2.3	Relationen und Struktur .....	32

4.2.4	Attribute.....	34
4.3	Bewertung einer Produktionsanlage .....	40
4.3.1	Kennwerte .....	40
4.3.2	Kostenrechnung.....	41
4.3.3	Finanzielles Risiko .....	43
4.3.4	Reparaturwürdigkeit.....	46
<b>5</b>	<b>Datenerfassung und -aufbereitung.....</b>	<b>49</b>
5.1	Unschärfe Daten .....	51
5.1.1	Mathematische Grundlagen unsicherer Daten .....	52
5.1.2	Expertenwissen.....	53
5.1.3	Datenbanken, Herstellerangaben und ähnliche Produkte.....	57
5.1.4	Berechnungen.....	57
5.2	Kombination der Daten .....	58
5.2.1	Medianbildung .....	58
5.2.2	Mittelung (BLUE).....	59
5.2.3	Bayes Theorem.....	60
5.3	Berücksichtigung unscharfer Eingangsdaten .....	63
<b>6</b>	<b>Modellbildung und -analyse.....</b>	<b>64</b>
6.1	Anforderungen an Analyseverfahren .....	64
6.1.1	Allgemeine Anforderungen.....	64
6.1.2	Spezielle Anforderungen.....	65
6.1.3	Bewertung .....	65
6.2	Petrinetze .....	67
6.2.1	Statische Elemente .....	67
6.2.2	Dynamik der Petrinetze .....	68
6.3	ECSPN .....	70
6.3.1	Erweiterungen .....	70
6.3.2	Definition des ECSPN.....	72
6.3.3	Beispiel eines ECSPN .....	81
6.4	Analyse des Modells .....	86
6.4.1	Grundlagen der Monte-Carlo-Simulation .....	86
6.4.2	Erzeugung von Pseudozufallszahlen.....	87
6.4.3	Ablauf der Simulation .....	88
6.5	Programmpaket REALIST.....	94
<b>7</b>	<b>Beispielhafte Anwendung.....</b>	<b>100</b>
7.1	Bandsägenfertigung (Job-Shop).....	100



7.1.1	Fertigungsprozess.....	101
7.1.2	Verlustquellen .....	105
7.1.3	Instandhaltung .....	106
7.1.4	Kostenbewertung .....	107
7.1.5	Bewertung der Ergebnisse .....	111
7.2	Zahnradfertigung (Flow-Shop) .....	114
7.2.1	Fertigungsprozess.....	114
7.2.2	Verlustquellen .....	115
7.2.3	Instandhaltung .....	116
7.2.4	Kostenbewertung .....	117
7.2.5	Bewertung der Ergebnisse .....	119
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>122</b>

## Bezeichnungen und Formelzeichen

$A$	Kante, Maßstabsparameter der Gammaverteilung und Erlangverteilung, unterer Grenzwert der Dreieckverteilung
$A$	Menge der Kanten, Anzahl Ausschussteile
$AE$	Zuweisungsfunktion des Kantenausdrucks
$AF$	Zuweisungsfunktion der Kantenfunktion
$Age$	Alterung, Ausfallwahrscheinlichkeit
$AT$	Zuweisungsfunktion der Kanteneigenschaft
$B$	Formparameter der Weibullverteilung, Formparameter der Gammaverteilung und Erlangverteilung, oberer Grenzwert der Dreieckverteilung
$C$	Modalwert der Dreieckverteilung
$Cc$	Kostenvariable
$CC$	Menge der Kostenvariablen
$CF$	Kostenfaktorfunktion
$CV$	Zuweisungsfunktion der Kostenvariablen
$CVar(\bullet)$	Conditional Value at Risk von $\bullet$
$D$	Zuweisungsfunktion der Schaltverzögerung
$E(\bullet)$	Erwartungswert von $\bullet$
$ES(\bullet)$	Expected Shortfall von $\bullet$
$f(\bullet)$	Dichtefunktion von $\bullet$
$f(\bullet 0)$	Bedingte Dichtefunktion von $\bullet$
$F(\bullet)$	Verteilungsfunktion von $\bullet$
$F^{-1}(\bullet)$	Inverse der Verteilungsfunktion von $\bullet$
$F(\bullet 0)$	Bedingte Verteilungsfunktion von $\bullet$
$FP$	Zuweisungsfunktion des Schaltverfahrens
$g(\bullet)$	Dichtefunktion von $\bullet$
$g(\bullet 0)$	Bedingte Dichtefunktion von $\bullet$
$gv$	Globale Variable
$GV$	Menge der globalen Variablen
$i$	Laufparameter
$ICC$	Initialisierungsfunktion der Kostenvariablen
$IGV$	Initialisierungsfunktion der globalen Variablen
$IP$	Initialisierungsfunktion der Stellen
$G$	Wächterfunktion
$H$	Eintrittswahrscheinlichkeit

$L(\bullet 0)$	Likelihoodfunktion von $\bullet$
$M$	Markierung
$M_0$	Anfangsmarkierung
$\overline{M}$	Gemittelter Markenbestand
$\hat{M}(t)$	Gemittelter Markenbestand zum Zeitpunkt $t$
$MTTF$	Mean Time to Failure
$n$	Anzahl
$N$	Anzahl Replikationen
$NA$	Teileanzahl zur Nacharbeit
$OEE$	Overall Equipment Effectiveness
$p$	Stelle
$P$	Menge der Stellen, Preis
$PC$	Farbenfunktion
$Pr(\bullet)$	Wahrscheinlichkeit von $\bullet$
$Q_\alpha$	$\alpha$ -Quantil
$QP$	Warteschlangenfunktion
$R$	Risiko
$rp$	Referenzstelle
$RP$	Menge der Referenzstellen
$RPP$	Zuweisungsfunktion der Referenzstellen
$rt$	Referenztransition
$RT$	Menge der Referenztransitionen
$RTTR$	Zuweisungsfunktion der Referenztransitionen
$S$	Schadenhöhe
$t$	Statistische Variable (Beanspruchungszeit, Lastwechsel, Anzahl der Betätigungen, ...)
$T$	Charakteristische Lebensdauer (Lageparameter) der Weibullverteilung, Inspektionsintervall
$t_0$	Ausfallfreie Zeit
$T_B$	Planbelegungszeit
$tr$	Transition
$TR$	Menge der Transitionen
$v$	Variable
$V$	Menge der Variablen
$V$	Verlusthöhe
$W$	Gewicht
$Var(\bullet)$	Value a Risk
$x$	Statistische Variable
$Z$	Zustandsindikator

$\alpha$	Quantilwert
$\gamma$	Konfidenzintervall
$\Delta P$	Preisdifferenz
$\Delta t$	Zeitdifferenz
$\zeta$	Zufallsgröße der ersten Stufe der zweistufigen Monte-Carlo-Simulation
$\theta$	Zufallsgröße
$\lambda$	Austrittsrate, Ausfallrate
$\mu$	Mittelwert der Normalverteilung, Lageparameter der Lognormalverteilung
$\xi$	Zufallsgröße der zweiten Stufe der zweistufigen Monte-Carlo-Simulation
$\Pi$	Funktion zur Zuordnung der Schaltpriorität
$\hat{\sigma}(t)$	Gemittelter Standardabweichung zum Zeitpunkt $t$
$\sigma$	Farbe, Standardabweichung der Normalverteilung, Formparameter der Lognormalverteilung
$\Sigma$	Menge der Farben
$\tau$	Zufallsgröße, Zeitdauer
$\chi$	Zufallsgröße des Wiener Prozesses

## Abstract

Today's business environment for manufacturing companies is becoming increasingly competitive which is amongst others due to the high cost pressure the companies are facing. Optimizing the maintenance process of production facilities allows companies to achieve a high cost reduction potential. However, the complexity of this problem requires an optimization using a close-to-reality model to allow that the results can be transferred to the real system.

The aim of this thesis is to develop a proceeding which makes it possible to model and analyse the production process, taking into account different sources of potential losses and possible maintenance strategies in an holistic way.

In a first step known techniques of modelling and analysing are examined with regard to their applicability to solve the problem. Most of the methods are not able to model the stochastic behaviour of production systems or the underlying data basis. Afterwards the procedure for system modelling and analysis is discussed and the necessary work packages are deduced.

After defining the scope of the model the system is being described, according to the system theory by its hierarchy, elements, relation, structure and attributes. Before the model is developed commonly used evaluation parameters for maintenance processes such as processing time, Overall Equipment Effectiveness and different kind of cost are defined. Furthermore cost is being extended by financial risk measures, such as worthiness to repair and value-at-risk.

The next step concerns data acquisition and preparation. Most of the accessible information is afflicted with uncertainties. This can be either aleatoric or epistemic uncertainty depending on the data source. In most instances several data sources are available such as data bases, test results or expert knowledge. Several methods to combine data from different sources are examined and applied. To use this uncertain data a procedure is developed using a two-step Monte Carlo simulation to get risk based results in addition to boundary value considerations.

The requirements for the modelling and analysis procedure are defined according to the underlying problem, the system components as well as the input data. The Extended Coloured Stochastic Petri Nets (ECSPN) prove to be the most suitable modelling tool but need to be extended for other features such as additional distribution functions, stochastic cost variables as well as the usage of imprecise input parameters. A

two-step Monte Carlo simulation is developed to model these extended ECSPN. The modelling is done with the programme REALIST.

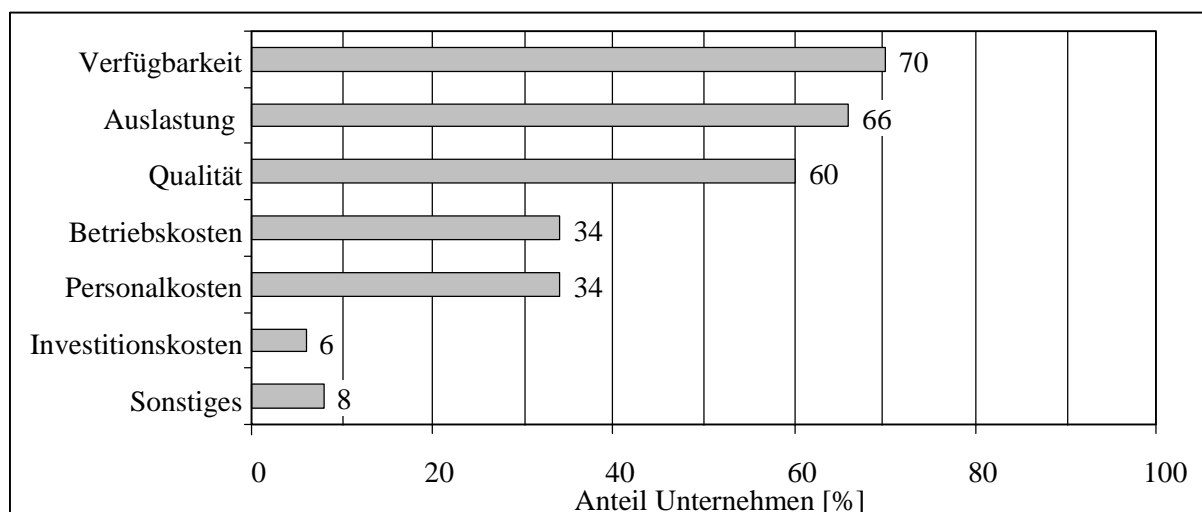
The applicability of this procedure for production- and maintenance planning is examined by modelling two different production systems. The first example considers a production system for band saws based on a job-shop structure; the second example examines a production system for gear wheels based on a flow-shop structure. Different sources for losses have been built into the model, such as failures of machines and tools. In order to determine the best production structure based on an optimized maintenance strategy several simulations with different manufacturing strategies were done. Thus it could be proved; that the simulation model developed in this thesis can be used to optimize production- and maintenance processes.

Further developments of the procedure might lead to reducing simulation time or improve modelling comfort. Shorter simulation times might be achieved by distributed simulation or weighted simulation improving the confidence in rare events. Automated optimization by evolutionary algorithms, model libraries and multiserver transitions can lead to making modelling more comfortable. To make the procedure more close to reality wear models have to be included.

# 1 Einleitung

Das heutige Unternehmensumfeld ist geprägt von einem hohen Maß an Wettbewerb. Der dadurch entstehende Kostendruck zwingt die Unternehmen, Möglichkeiten zu finden, die Kosten für die Herstellung der Produkte bei mindestens gleich bleibender Qualität weiter zu reduzieren. Die Instandhaltung technischer Anlagen verursacht in vielen Industriebereichen einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten [Fra2004]. Da die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens mittlerweile die Gesamtoptimierung auch im Hinblick auf interne Prozesse erfordert, wird somit immer öfter auch die Instandhaltung Ziel von Optimierungsmaßnahmen.

Wie ein Studie des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT aus dem Jahr 2004 zeigt, hängen die Produktivität einer Anlage und damit unmittelbar die Kosten von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Hierfür wurden 49 deutsche Industrieunternehmen nach den für sie drei wichtigsten Einflussfaktoren auf die Produktivität befragt. Bei 70 % der teilnehmenden Unternehmen lautete die Antwort Verfügbarkeit. Allerdings wurden ebenfalls die Auslastung sowie die Qualität als nahezu gleich bedeutend gesehen, so dass eine reine Bewertung der Anlage über die Verfügbarkeit die Produktivität und die Kosten einer Anlage nicht vollständig beschreiben würde [Fra2004].



*Bild 1.1: Einflussfaktoren auf die Produktivität [Fra2004]*

Voraussetzung für eine optimale Kostenersparnis bei möglichst geringem finanziellem Risiko ist somit eine ganzheitliche Optimierungsstrategie. Dadurch kann gewährleistet

werden, dass die Auswirkungen einer vermeintlichen Verbesserung im Teilbereich Instandhaltung nicht zu negativen Auswirkungen auf ganzheitlicher Ebene führen. Das Risiko hierfür ist sehr hoch, weil die Instandhaltung eine direkte Schnittstelle mit der Produktion hat und diese unmittelbar von Anpassungen im Instandhaltungsbereich betroffen ist.

Die Folgen der Entscheidungen, die bei der Festlegung der Instandhaltungsstrategie getroffen werden, sind in den meisten Fällen erst langfristig zu späteren Phasen des Anlagenlebenszyklus zu sehen. Daher sollte eine solche Strategie zwar den gegebenen Rahmenbedingungen angepasst werden, allerdings einen eher mittel- bis langfristigen Charakter aufweisen.

Die aufgezeigten Rahmenbedingungen erfordern, das Verhalten einer Anlage über ihre gesamte Einsatzdauer vorherzusagen, um eine bestimmte Produktionsleistung und ein optimales Kostenniveau zu garantieren bzw. das Risiko einer Nichterreichung abzuschätzen.

Angesichts der ständig zunehmenden Komplexität von Anlagen und Fertigungssystemen bedarf es entsprechender Werkzeuge, die es erlauben die langfristigen Auswirkungen bereits im Vorfeld zu bewerten und Optimierungen instandhaltungsrelevanter Themen in ihrer Auswirkung ganzheitlich zu analysieren und somit echte Verbesserungen zu ermöglichen.

## **1.1 Ziele der Arbeit**

Vor dem Hintergrund der geschilderten Problemstellung besteht das Ziel dieser Arbeit in der Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Modellierung und Analyse von Produktionsprozessen. Aus den bekannten Modellierungsverfahren wird jenes ermittelt, das die Anforderungen an ein Produktionsmodell am besten abdeckt, und anwendungsbezogen weiterentwickelt. Dieses Verfahren soll es ermöglichen, das Verhalten eines Anlagenmodells während der geplanten Einsatzdauer vorherzusagen und Rückschlüsse auf das Verhalten des realen Systems zu ziehen. Um anhand des Modells Aussagen über das reale System treffen zu können, müssen alle relevanten Elemente und Strukturen des Systems im Modell abgebildet werden. Die Modellierung von Produktionssystemen erfordert daher die Berücksichtigung der drei Teilsysteme Bearbeitungs-, Materialfluss- und Informationssystem. Darüber hinaus muss das Modell fähig sein, bestimmte Eigenschaften, die für Produktionssysteme charakteristisch sind, abzubilden. Dazu zählen insbesondere beschränkte Fertigungskapazitäten, zufällig verteilte Ausfälle von Maschinen und Komponenten, parallele und nebenläufige Prozesse sowie Stillstände und Konflikte um gemeinsame Ressourcen. Das vorgeschlagene Modellierungsverfahren sollte außerdem unabhängig von einem bestimmten Produkti-



onstyp in allen Branchen einsetzbar sein. Um eine ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen, sollen neben den Verlustquellen bedingt durch Anlagenausfälle weitere Verlustquellen wie kurzzeitige Stillstände, Umrüstzeiten usw. berücksichtigt werden können.

Für die Nutzung des Verfahrens als Entscheidungsgrundlage soll dabei neben der Ermittlung der Kosten, Ausbringungsmenge usw. auch das jeweils zugehörige finanzielle Risiko ermittelt werden.

Ein wesentliches Problem solcher Methoden liegt darin, dass sie, je nach Berechnungsziel und Art und Anzahl existierender Randbedingungen eine Vielzahl an Eingangsdaten mit einer hohen Datengüte benötigen. Daher soll diese Vorgehensweise alle vorhandenen Datenquellen kombinieren und als Grundlage für die Entscheidungsfindung zu Grunde legen.

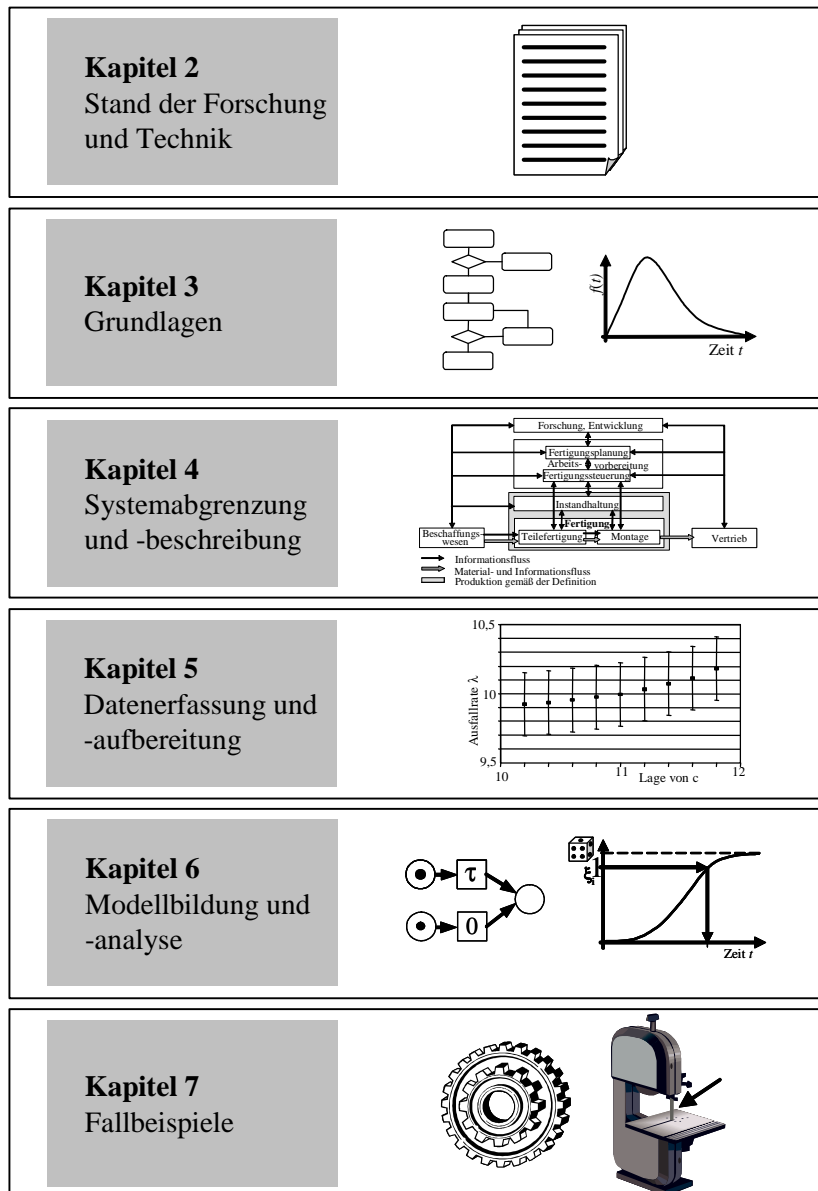
## 1.2 Aufbau der Arbeit

Im Kapitel **Stand der Forschung und Technik** werden Verfahren und Methoden diskutiert, die bislang in Forschung und Technik zur Modellierung und Analyse komplexer Produktionsanlagen Einsatz finden bzw. Grundlage für entsprechende Programme bilden. Dabei werden neben die Vorteile und Einschränkungen der einzelnen Methoden aufgezeigt.

Im Kapitel **Grundlagen** wird die Vorgehensweise zum Vorgehen bei Modellierung und Simulation vorgestellt. Gemäß dieser Vorgehensweise gliedert sich die Arbeit im Weiteren. Zudem werden die grundlegende Begriffe und Definitionen vorgestellt und auf einige wesentliche Verteilungsfunktionen eingegangen, die im Folgenden genutzt werden.

Das Kapitel **Systemabgrenzung und -beschreibung** behandelt den ersten Schritt innerhalb der Modellbildung. Dafür wird zunächst das zu betrachtende System Produktion abgegrenzt und dessen einzelne Bestandteile analysiert und beschrieben. Um dieses Verfahren als Entscheidungsgrundlage nutzen zu können werden zudem die dafür notwendigen Kennwerte ermittelt.

Das darauf folgende Kapitel **Datenerfassung und -aufbereitung** beschreibt das weitere Vorgehen, das auf die Systemabgrenzung und -analyse folgt. Dafür werden die verschiedenen Informationsquellen vorgestellt und deren Eigenschaften analysiert. Um zu gewährleisten, dass möglichst große Anteile der Informationen genutzt werden können, werden verschiedene Verfahren aufgezeigt, um diese Informationen miteinander zu kombinieren.



*Bild 1.2: Aufbau der Arbeit*

Im **Kapitel Modellbildung und -analyse** wird das weiterentwickelte Verfahren vorgestellt, das auf erweiterten farbigen stochastischen Petri-Netzen (ECSPN) basiert und im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt wurde. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit komplexe Systeme zu analysieren, dafür verschiedene Datenquellen zu nutzen und risikobasierte Entscheidungen zu treffen. Des Weiteren wird die zweistufige Monte-Carlo-Simulation für die Analyse des Modells sowie die Umsetzung des Verfahrens im Programmpaket REALIST vorgestellt.

Das Kapitel **Fallbeispiele** zeigt anhand zweier Fallbeispiele, einer Bandsägen- bzw. Zahnradfertigung, die Anwendbarkeit des Verfahrens auf zwei verschiedene Typen von Produktionsstrukturen auf, eine Job-Shop- bzw. Flow-Shop-Struktur.

## 2 Stand der Forschung und Technik

Moderne Produktionssysteme werden zunehmend komplexer und ihre Leistungserbringung ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig [Kül1999, Ber2004]. Durch diese Komplexität ist es nur bedingt möglich, Aussagen über eine Anlage ohne entsprechende Hilfsmittel zu treffen. Um eine bestimmte Produktionsleistung zu garantieren bzw. um das Risiko der Nichterreicherung dieser Vorgabe zu bestimmen, ist es zudem notwendig, neben dem Aufbau einer Produktionsanlage und deren fehlerfreiem Ablauf auch die Faktoren zu berücksichtigen, die das Produktionsergebnis schmälern könnten. Für eine realitätsnahe Analyse müssen daher Produktionsprozess, mögliche Verlustquellen sowie Instandhaltungsaspekte und deren Wechselwirkung untersucht werden. Dies ermöglicht, verschiedene Systemkennwerte wie Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Produktivität, Amortisationszeit usw. zu ermitteln, s. Bild 2.1.

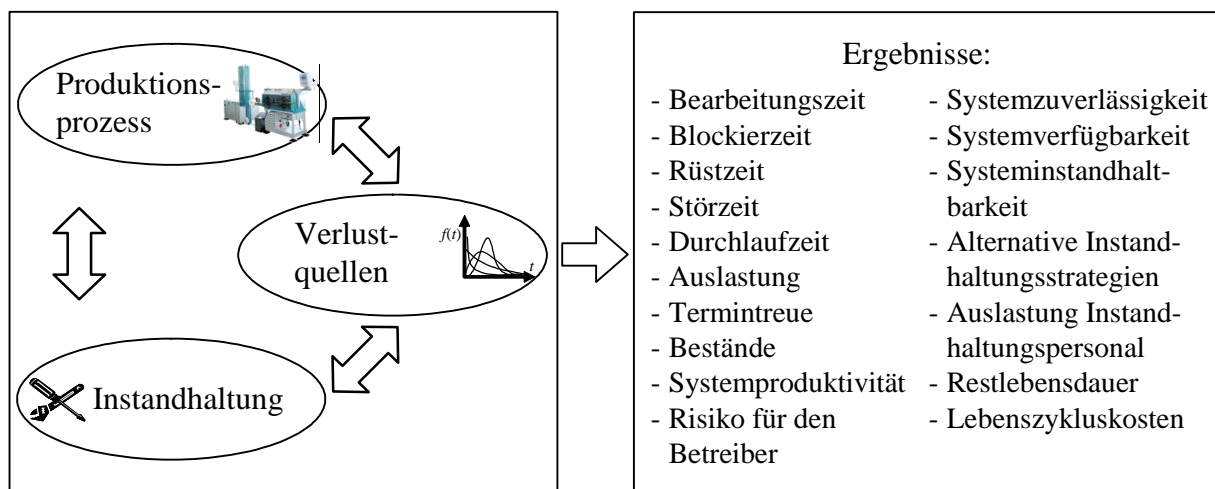


Bild 2.1: Konzept der Vorgehensweise [Tro2005]

Für die Modellierung der Leistungsfähigkeit dieser Systeme existiert eine Vielzahl von verschiedenen Methoden und Werkzeugen, die sich stark in Bezug auf ihre Beschreibungs- und Analysemöglichkeiten unterscheiden [DiC1993, Sil1998].

Für Analysen von Produktionsanlagen werden vor allem Simulationssprachen und graphische Analysewerkzeuge eingesetzt. Allgemein anwendbare Simulationswerkzeuge wie *Arena*, *GPSS*, *SIMAN* usw. sind nicht direkt auf die Abbildung von Produktionsanlagen zugeschnitten, bieten aber Unterstützung bei der Untersuchung durch vorgefertigte Elemente, aus denen ein Simulationsmodell aufgebaut werden kann. An-

dere Werkzeuge, die speziell für die Analyse von Produktionsanlagen entwickelt wurden, wie *Extend*, *ProModel*, *Quest*, *Enterprise Dynamics*, *AutoMod* usw. unterstützen die Modellierung über eine spezielle Benutzeroberfläche. Diese Programme sind sehr einfach zu bedienen, allerdings auf die im Programm vorgesehenen Analysen eingeschränkt. Im Bereich der Zuverlässigkeitstechnik existieren verschiedene Programme, die zur Modellierung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit eingesetzt werden können. Zu diesen Softwarewerkzeugen zählen *BlockSim*, *RGA*, *RENO* usw., die im Wesentlichen die Abbildung der Struktur einer Anlage aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht ermöglichen, den Produktionsablauf selbst nicht mit berücksichtigen.

Im Folgenden werden verschiedene Modellierungskonzepte vorgestellt, auf denen diese Softwarewerkzeuge teilweise basieren und die im Bereich der Modellierung und Analyse von Produktionsprozessen und der Zuverlässigkeitstechnik eingesetzt werden.

Die Modellierungskonzepte können in drei Klassen untergliedert werden, s. Bild 2.2,

- die Darstellung von statischen Zusammenhängen,
- die statische Abbildung von dynamischen Zusammenhängen (Prozessmodelle) und
- die dynamische Abbildung von dynamischen Zusammenhängen.

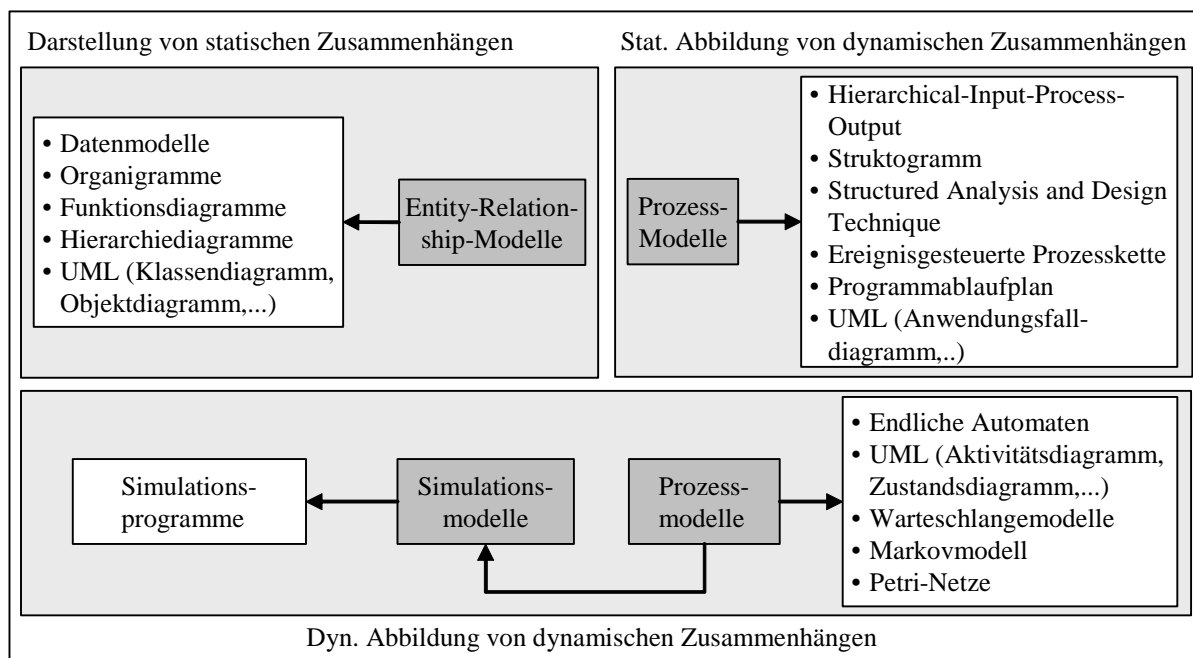


Bild 2.2: Einteilung der Modellierungsmethoden

Da es sich bei Produktionssystemen um dynamische Systeme handelt, werden im Folgenden einige Modellierungsmethoden aus den beiden letzteren Klassen detaillierter betrachtet.

## 2.1 Structured Analysis and Design Technique (SADT)

Die SADT wurde in den 80er Jahren von D. T. Ross als grafisches Beschreibungsmittel für komplexe Systeme entwickelt, mit dem sowohl Funktionen als auch Datenströme abgebildet werden können. Sie eignet sich besonders zur Darstellung von funktionalen Abläufen und kann daher, obwohl sie ursprünglich für den Softwareentwurf konzipiert wurde, bei Projekten aus unterschiedlichen Bereichen, zum Beispiel bei der Prozesssteuerung oder Organisationsplanung, eingesetzt werden [Wie1991, Mer1994].

SADT unterstützt zwei Modellkonzepte: Zum einen die Modellierung von Aktivitäten, die durch Menschen, Maschinen, Rechner oder Algorithmen wahrgenommen werden, zum anderen die Modellierung von dafür verwendeten Daten, Objekten oder Gegenständen. Entsprechend werden mittels SADT zwei grafische Teilmodelle erstellt, ein Funktionen- bzw. Aktivitätsmodell und ein Datenmodell [VDI2000a].

In einem SADT-Diagramm erfolgt die Darstellung der einzelnen Komponenten mit Hilfe von nummerierten Rechtecken. Jedes Rechteck wird auf der nächsten unterhalb liegenden Ebene in einem neuen Diagramm detaillierter dargestellt. Bild 2.3 zeigt den hierarchischen Aufbau eines Aktivitätsmodells am Beispiel einer Bolzenfertigung. Ein System kann auf diese Weise ausgehend von der höchsten Ebene hierarchisch (Top-Down-Modell) in Untersysteme zerlegt werden.

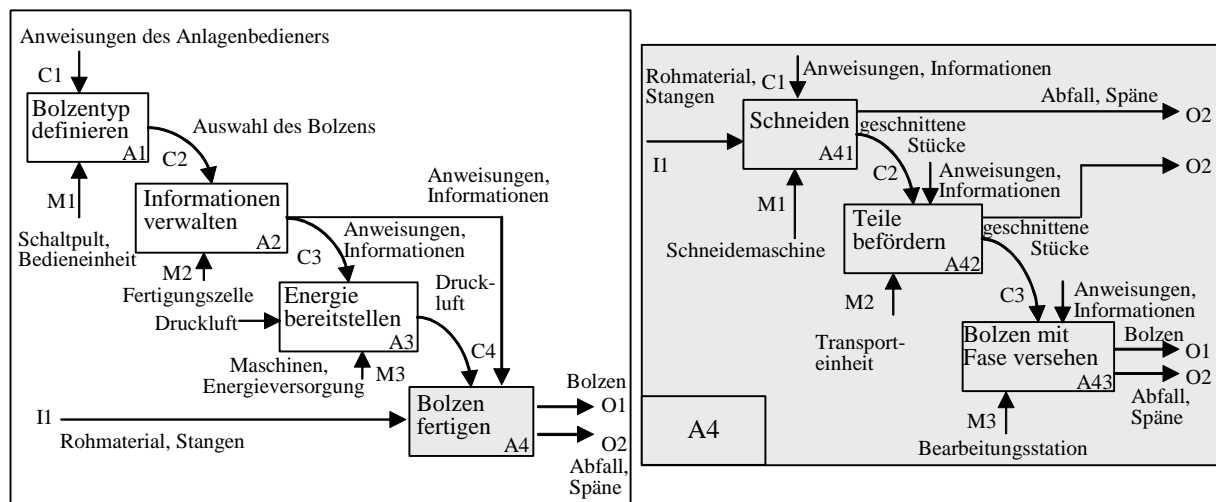


Bild 2.3: SADT-Diagramm einer Bolzenherstellung

Mit SADT-Diagrammen lässt sich die Funktionsstruktur eines Produktionssystems abbilden, dynamische Veränderungen können allerdings nicht dargestellt werden. Informations-, Material- und Bearbeitungsprozesse sind eingeschränkt abbildbar. Die Modellierung von Produktionsstrukturen ist zwar möglich, allerdings werden in einem SADT-Diagramm keine zeitlichen Abläufe, sondern nur logische Verknüpfungen dargestellt [Mer1994, Hor1995, Lin2000].

## 2.2 Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK)

Ein weiteres Beschreibungsmittel zur Darstellung von Abläufen stellen die Ereignisgesteuerten Prozessketten (EPK) dar. Ein EPK besteht aus drei Komponenten, den Ereignissen, den Funktionen und den Verknüpfungen. Ein Ereignis kann mit mehreren Funktionen verknüpft werden und umgekehrt eine Funktion mit mehreren Ereignissen. Funktionen werden durch Ereignisse ausgelöst oder verursachen Ereignisse. Die Verknüpfung besteht aus einer XOR-, OR- oder AND-Verknüpfung. Es besteht dabei die Möglichkeit, mehrere Ereignisse mit einer Funktion zu verknüpfen, so dass verschiedene Vorbedingungen für das Auslösen der Funktion gegeben sein müssen. Ebenso können mehrere Funktionen mit einem Ereignis verknüpft werden. Somit entsteht durch diese Verknüpfungen eine zusammenhängende Kette. Die EPK-Methode basiert auf der Petrinetztheorie und kann als eine Variante eines Stellen-Transitionsnetzes verstanden werden, das um logische Verknüpfungsoperatoren erweitert wurde [Lan1997, Aal1998].

Mit Hilfe der EPK kann der zeitliche Ablauf von Prozessen auf einfache und verständliche Art und Weise verdeutlicht werden. Wie beim Vorgangskettendiagramm gibt es jedoch Probleme bei der Darstellung komplexer Prozessabläufe; ein hoher Detaillierungsgrad ist daher nicht möglich. Zudem sind Prozesse mit vielen Verzweigungen und Schleifen aufgrund der Spaltenanordnung nur schlecht darstellbar. EPK bieten zudem nur eine statische Sicht auf die dynamischen Abläufe. Für eine nachfolgende Analyse können sie in andere Modellierungsmethoden übersetzt werden [Kel1994, Lan1997].

## 2.3 Programmablaufplan (Flussdiagramm)

Die DIN 66001 kennzeichnet einen Programmablaufplan als eine Darstellungsform der logischen Reihenfolge der zur Lösung einer Problemstellung erforderlichen Schritte [DIN1983]. Der Programmablaufplan entstand Anfang der 70er Jahre, wurde zunächst in der Softwareentwicklung und im Weiteren auch zunehmend für die Abbildung von Produktionsabläufen eingesetzt [Wie1991]. Das Beschreibungsmittel bedient sich einer Anzahl von Symbolen für Ein- und Ausgaben und Verzweigungen. Die Symbole werden mit Pfeilen verbunden, wobei die Pfeilrichtung die Ablauf- bzw. Flussrichtung angibt. Bei der Erstellung eines Ablaufplanes sollte die Lösung des Problems schon bekannt sein, da nur der schrittweise Ablaufweg dargestellt wird. Bei einem größeren Problem können die Ablaufpläne in mehreren Schritten entsprechend der Verfeinerung der Problembeschreibung erstellt werden. Einen Programmablaufplan für das Beispiel der Bearbeitung eines Werkstückes auf einer Maschine zeigt Bild 2.4.

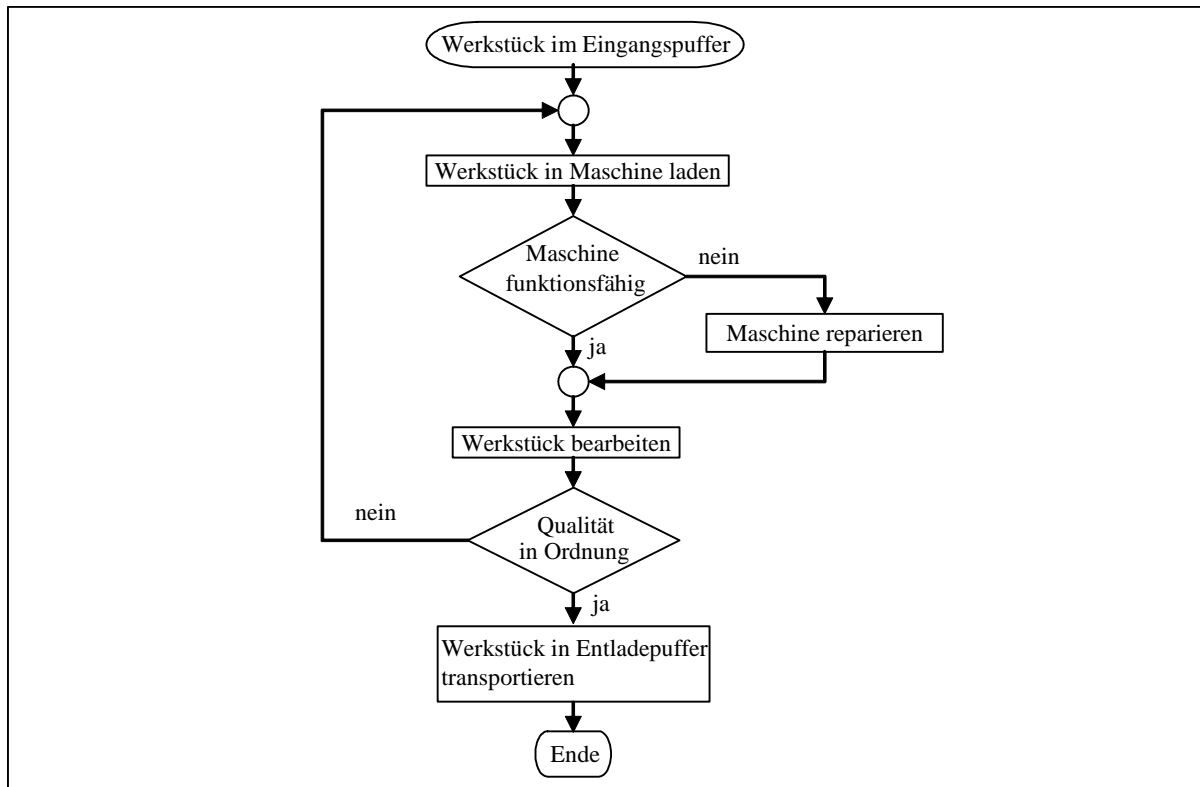


Bild 2.4: Flussdiagramm einer Fertigungsmaschine

Vorteile dieses Beschreibungsmittels sind der große Bekanntheitsgrad, die einfache Darstellungsweise mit grafischen Symbolen und die dadurch bedingte leichte Erlernbarkeit.

Die Programmablaufpläne bzw. Flussdiagramme wurden allerdings für die lineare Programmierung entworfen und sind daher für eine strukturierte oder objektorientierte Modellierung nicht direkt anwendbar. Bei komplexeren Problemen wird die Struktur des Ablaufplanes schnell unübersichtlich. Da keine direkten Symbole für Schleifenkonstrukte und Rekursionen existieren und beispielsweise die Beschriftung von Pfeilen nicht erlaubt ist, ist die Anwendbarkeit eingeschränkt. Zur Beschreibung paralleler Abläufe ist das Beschreibungsmittel daher wenig geeignet. Folglich sind sie auch für die Abbildung von Produktionsstrukturen und für die Modellierung von Produktionsprozessen nur eingeschränkt einsetzbar und können im Wesentlichen für eine einfache Beschreibung des Prozessablaufes genutzt werden, der dann weiterhin mit anderen Methoden analysiert werden kann [Hor1995].

## 2.4 UML (Unified Modeling Language)

Die Unified Modeling Language (UML) wurde von der Object Management Group (OMG), einer Vereinigung von Entwicklern und Anwendern objekt-orientierter Technologien, entwickelt [ISO2005, OMG2005]. Die Unified Modeling Language (UML)

ist eine semi-formale Sprache zur Spezifikation, Visualisierung, Konstruktion und Dokumentation von Softwaresystemen und auch Geschäftsmodellen [Dum2001, Oes2003]. Für die Analyse stellt sie eine Vielzahl von Diagrammen bereit, um verschiedene Aspekte aus jeweils unterschiedlichen Blickrichtungen untersuchen zu können [Erl2002].

In der UML-Version 2.0 existieren 13 verschiedene Diagrammarten, die sich in zwei Gruppen unterteilen lassen [OMG2005]:

- Statische Modelle (Strukturmodelle) für die Abbildung der Struktur von Objekten in einem System. Dazu gehören ihre Klassen, Schnittstellen, Attribute und Beziehungen zu anderen Objekten.
- Dynamische Modelle (Verhaltensmodelle) für die Abbildung des Verhaltens der Objekte in einem System, dies umfasst ihre Methoden, Zustände und Interaktionen.

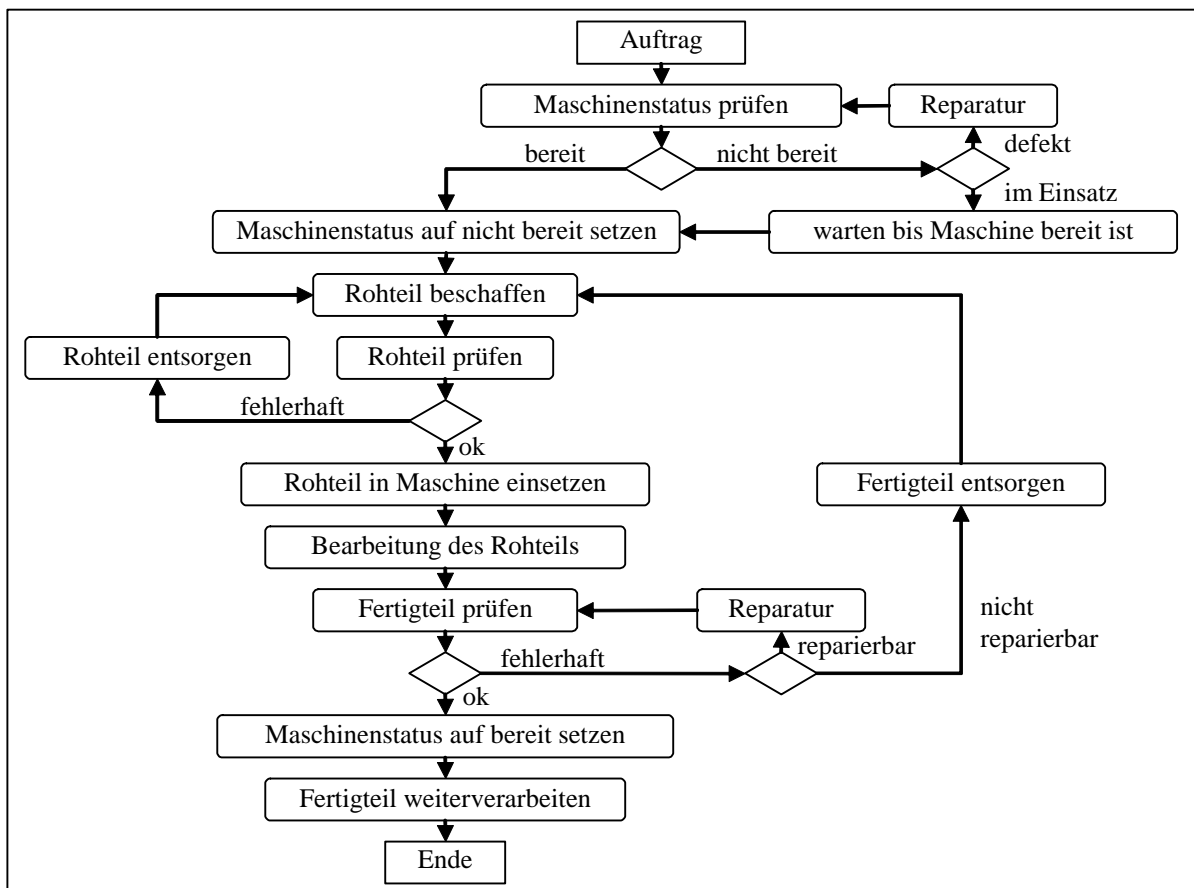


Bild 2.5: UML-Aktivitätsdiagramm einer Fertigungsmaschine

Für die Modellierung von Produktionsprozessen können im Wesentlichen die Klassendiagramme für die Abbildung der Hierarchie, die Aktivitätsdiagramme, s. Bild 2.5, für die Abbildung der Aktivitäten, die Zustandsdiagramme für die Abbildung der Zu-



stände der Ressourcen und die Zeitdiagramme für die Abbildung des zeitlichen Systemverhaltens genutzt werden [Oes2003].

Mit Hilfe der UML können Hierarchien, parallele und sequentielle Abläufe und Attributsänderungen (Zustände) dargestellt werden, wie sie auch bei Produktionsanlagen auftreten. Die Objektorientierung der UML erlaubt es, komplexe Prozesse und Systeme darzustellen, da durch die unterschiedlichen Diagrammartentypen das System immer nur aus einem speziellen Blickwinkel modelliert wird. Dadurch kann für die jeweilige Fragestellung die optimale Darstellungsweise genutzt werden.

Allerdings ist es notwendig, die Darstellung aller angewandten Diagrammartentypen zu kennen und korrekt anzuwenden. Die getrennte Darstellung der einzelnen Aspekte verlangt, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Modellen gesondert zu betrachten. Zudem ist eine unmittelbare Analyse des Modells in der UML nicht vorgesehen, sondern die UML-Diagramme müssen mit geeigneten Werkzeugen in andere Modelle übersetzt werden [San1999]. Durch die Verwandtschaft der Zustands- und Aktivitätsdiagramme zu den Petrinetzen kann eine Übersetzung der Modelle in ein Petrinetz erfolgen [Zim2006]. Nach Transformation der UML-Modelle in ein Petrinetz besteht die Möglichkeit, diese mit Hilfe der Analysewerkzeuge für Petrinetze sowohl qualitativ als auch quantitativ zu analysieren.

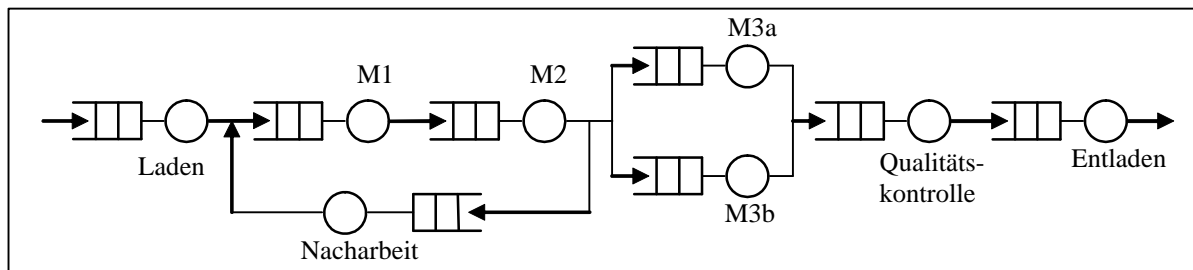
## 2.5 Warteschlangenmodelle

Warteschlangenmodelle gehören zu den ältesten und bekanntesten Modellierungskonzepten. Bereits in den 60er Jahren wurden sie als Hilfsmittel zur Bewertung der Leistung von Rechensystemen verwendet. Noch heute finden Warteschlangenmodelle in den unterschiedlichsten Bereichen, insbesondere in der Logistik und Produktion, Anwendung. Neben den unzähligen Beispielen für einzelne Bedienstationen (zum Beispiel Tankstellen, Supermarktkassen oder Bearbeitungsmaschinen) sind Multiuser Computersysteme und Kommunikationsnetze, Verkehrssysteme sowie Materialfluss- und Produktionssysteme klassische Anwendungsfelder [Gro1984, Bol1997].

Gegenstand der Warteschlangentheorie sind Problemstellungen, die bei der Abfertigung oder Bedienung von Kunden, Aufträgen o. Ä. an Servicestationen auftreten [Gün2005]. Dabei ist zu beachten, dass nur dann von Warteschlangensystemen gesprochen wird, wenn die Ankunft und/oder die Abfertigung der Elemente in einem Bearbeitungssystem stochastisch verteilt sind. Bei Prozessen, bei denen Ankunft und Abfertigung deterministisch sind, wie zum Beispiel bei der Fließbandfertigung, handelt es sich nicht um Warteschlangensysteme.

Ein Warteschlangensystem besteht aus beweglichen Elementen, aus denen die Warteschlange gebildet wird. Sie treten in die Warteschlange ein und verlassen nach ihrer Abfertigung die Bedienstation. In den Warteschlangen warten die ankommenden Objekte auf ihre Bedienung. An den Bedienstationen werden die wartenden Objekte bedient [Hil1997]. Sobald vor einer oder mehreren Bedienstationen mehr Objekte auftreten, als im selben Zeitraum abgefertigt werden können, entsteht eine Warteschlange. Die Zwischenankunftszeiten und Bedienzeiten sind in der Regel Zufallsvariablen, deren Verteilung bekannt sein muss.

Mit Warteschlangennetzen können auch komplexe Systeme modelliert werden. Die Elemente oder Aufträge in einem Warteschlangennetz kommen nach Verlassen einer Bedienstation an der nächsten Warteschlange an, s. Bild 2.6.



*Bild 2.6: Warteschlangenmodell einer Produktionsanlage*

Bei Warteschlangennetzen oder Bedienungsnetzwerken, die durch die Verknüpfung mehrerer Warteschlangensysteme entstehen, ist zusätzlich die Wegewahl (engl.: routing) der Aufträge bzw. Elemente zu berücksichtigen, so dass in diesen Fällen eine Verknüpfung mit anderen Methoden notwendig wird [Sie1995].

Warteschlangensysteme, die auf sehr einfache Systeme zurückgeführt werden können, lassen sich analytisch lösen. So sind beispielsweise Systeme mit exponentialverteilten Ankunftsintervallen und Bedienungszeiten sehr einfach berechnen. Die Analyse komplexerer Wartesysteme erfordert hingegen den Einsatz von Simulationstechniken.

Aufgrund ihrer langen Tradition besitzen Warteschlangenmodelle im Vergleich zu vielen anderen Modellierungsmethoden eine sehr weite Verbreitung.

Zur Bestimmung von Leistungsgrößen eines Systems, wie z. B. der mittleren Wartezeiten und Pufferbelegung, sind Warteschlangennetze gut geeignet und es existieren effiziente Analysemöglichkeiten. Ein großer Vorteil der Warteschlangensysteme ist die Möglichkeit, zahlreiche verschiedene Verteilungsfunktionen zu benutzen. Dies gestattet eine realitätsnahe Modellierung vieler unterschiedlicher Systeme.

Allerdings können mit Warteschlangenmodellen Konflikt- und Konkurrenzsituationen, die gemeinsame Nutzung von Ressourcen, Synchronisationen und Bedingungen nicht

oder nur unzureichend ausgedrückt werden. Daher sind häufig zusätzliche Angaben z. B. über Prioritäten, Synchronisationen usw. erforderlich. Darüber hinaus muss das Routing der Aufträge festgelegt werden. Zu diesem Zweck müssen verschiedene Auftragsklassen und Routingwahrscheinlichkeiten definiert werden [Sie1995]. Auch die grafische Darstellungsform der Warteschlangennetze ist mit Nachteilen behaftet, da sie zwar leicht verständlich ist, es aber nicht erlaubt, alle Aspekte eines Systems formal auszudrücken.

## 2.6 Markovmodelle

Markovmodelle (nach *Andrei A. Markov*) stellen eine grundlegende Klasse stochastischer Prozesse dar, die auf Markovketten beruhen [Bir2004, Bol2006].

In einem Markovmodell wird ein System durch die möglichen Zustände und die möglichen Übergänge zwischen den Zuständen beschrieben [Ber2004]. Zur graphischen Darstellung werden Zustandsgraphen mit Knoten und Kanten verwendet. Die Knoten repräsentieren die möglichen Zustände des Systems, die gerichteten Kanten geben die möglichen Zustandsübergänge an und sind mit den zugehörigen Übergangsraten von einem Zustand in den anderen gekennzeichnet.

Markovprozesse bzw. Markovketten beschreiben Folgen von Zufallsvariablen, die gewisse Abhängigkeitsstrukturen aufweisen. Ein stochastischer Prozess heißt Markovprozess, wenn für jede Folge von Zeitpunkten aus dem Parameterraum die Wahrscheinlichkeit für den Zeitpunkt  $t+1$  nur von dem Zustand zum Zeitpunkt  $t$  abhängt. Man bezeichnet diese Eigenschaft als Markoveigenschaft bzw. als Gedächtnislosigkeit des Markovprozesses. Dadurch ergibt sich, dass Zustandsübergänge nur durch Exponentialverteilungen abgebildet werden können [Sie1995]. Ist der Zeitparameter  $t$  selbst Zufallsvariable, handelt es sich um einen Semi-Markovprozess [Voß2003].

Einen wichtigen Aspekt stellt die methodische Grundlagenrelevanz der Markovprozesse dar. Die analytische Auswertung basiert bei vielen anderen Modellierungsverfahren, zum Beispiel den Warteschlangennetzen (s. Abschn. 2.5) und den Petrinetzen (s. Abschn. 2.7) auf Markovprozessen. Zu den Anwendungsgebieten der Markovmodelle gehören die Analyse logistischer Netze, die Finanz- und Versicherungsmathematik, die Mustererkennung und die Spracherkennung in der Computerlinguistik [Bol2006].

Bild 2.7 zeigt den Markovgraphen für eine Bearbeitungsmaschine, die sich in den vier Zuständen  $Z_0$ ,  $Z_1$ ,  $Z_2$  und  $Z_3$  befinden kann. Die möglichen Zustandsübergänge sind durch die Übergangsraten  $\lambda$  angegeben. Die Übergangsraten  $\lambda_{12}$  beschreibt beispielsweise den Übergang vom Zustand  $Z_1$  in den Zustand  $Z_2$ ; d. h. sie entspricht der Ausfallrate der Maschine. Das Beispiel beinhaltet die Annahme, dass die Maschine nur

während der Arbeit ausfällt und nicht, wenn sie stillsteht. Wenn die Maschine ausgefallen ist, wird sie repariert und geht dann zunächst in den Zustand des Stillstandes über, bevor sie das nächste Werkstück bearbeiten kann.

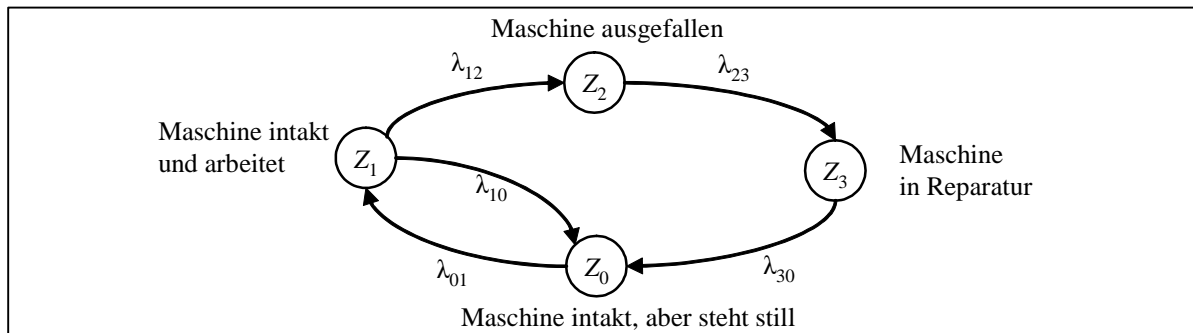


Bild 2.7: Markovzustandsgraph einer Maschine

Markovmodelle erlauben eine analytische Untersuchung stochastischer Prozesse. Daher können Markovketten zur Untersuchung von Produktionsanlagen grundsätzlich angewendet werden, da sie sowohl für die Beschreibung der Produktion als auch der zuverlässigkeitstechnischer Kenngrößen einsetzbar sind. Allerdings unterliegen sie starken mathematischen Restriktionen, da sie von konstanten Übergangsraten zwischen verschiedenen Zuständen ausgehen, die in der Realität nicht in allen Bereichen gegeben sind [Ste2000]. Die Klasse der darstellbaren Verteilungsfunktionen lässt sich durch den Übergang zu Semi-Markovprozessen und die Verwendung von Phasenverteilungen (Verteilungen, die aus exponentiellen Phasen zusammengesetzt sind) fast beliebig erweitern. Dies erfordert allerdings einen erhöhten Analyseaufwand [Sie1995]. Zwar existiert eine große Zahl an mathematischen Methoden zur Behandlung von Markovprozessen, die analytische Auswertung der Modelle kann jedoch sehr viel Zeit in Anspruch nehmen.

Ein weiteres Problem ist das schnelle Wachsen des Zustandsraumes, das bei Systemen auftritt, die aus mehreren Elementen bestehen. Betrachtet man ein System aus  $n$  Elementen, die jeweils zwei Zustände annehmen können, besitzt das Markovmodell  $2^n$  mögliche Zustände, so dass für Markovmodelle mit großem Zustandsraum spezielle Methoden zur Zustandsraumreduktion notwendig werden [Sie1995].

## 2.7 Petrinetze

Ein Verfahren, das im Bereich der Produktionstechnik und auch der Zuverlässigkeitstechnik zunehmend für die Modellierung eingesetzt wird, sind Petrinetze [Des1995, Pro1996, Zim1997, Sil1998, Sch1999a, Vol2004]. Sie wurden von *Carl Adam Petri* in seiner Dissertation „Kommunikation mit Automaten“ als Methode für die Modellierung nebenläufiger diskreter Systeme vorgeschlagen [Pet1962]. Ein Petrinetz ist ein

gerichteter Graph bestehend aus zwei verschiedenen Arten von Knoten (Stellen und Transitionen), die über gerichtete Kanten verbunden sind. Petrinetze ermöglichen damit die graphische Abbildung von Kausalitäten, Kontaktsituationen, Nebenläufigkeit, Synchronisierungen sowie Konflikten [DiC1993, Haa2002]. Diese Eigenschaften treten ebenfalls bei Produktionssystemen auf und können daher mit Hilfe der Petrinetze untersucht werden, s. Bild 2.8.

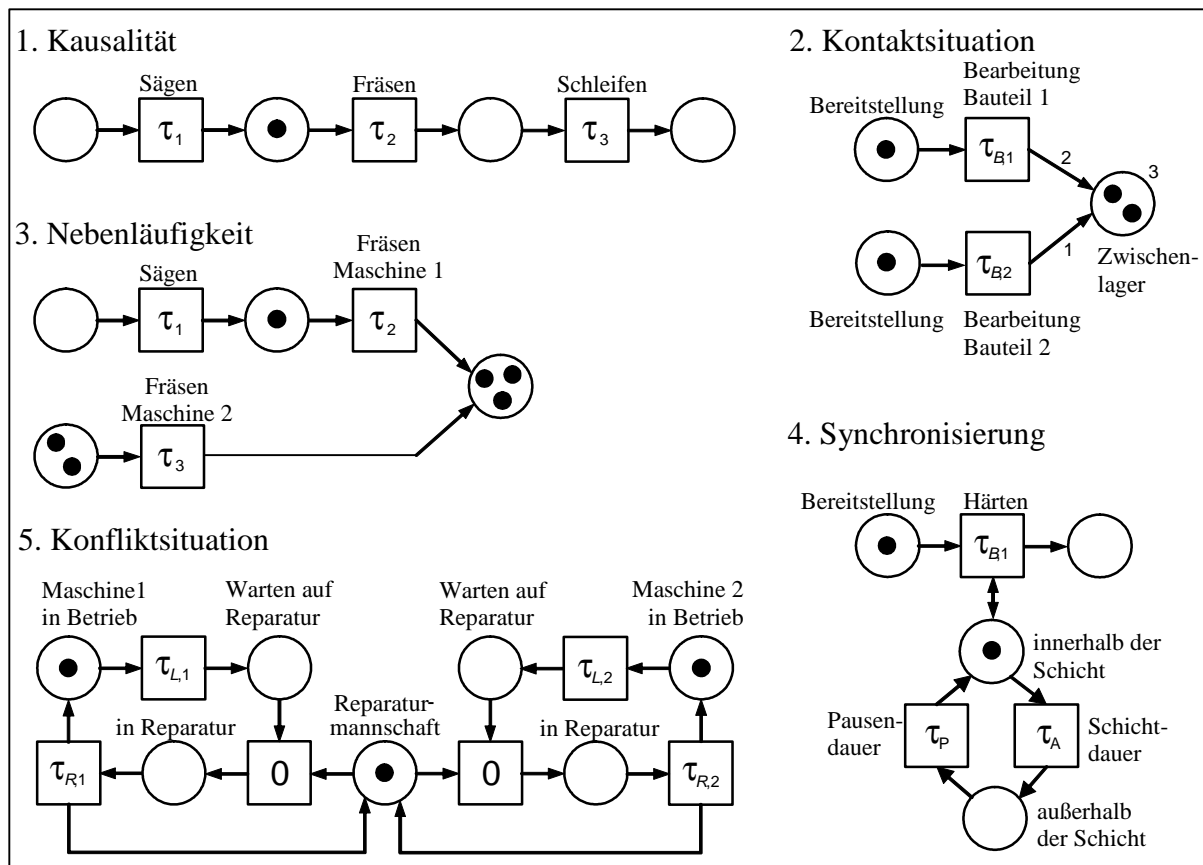


Bild 2.8: Modellierung einiger unterschiedlicher Eigenschaften mit Petrinetzen

Dabei werden mittels der Petrinetze die Zustände abgebildet, die das System einnehmen kann, und die möglichen Übergänge zwischen den einzelnen Zuständen modelliert.

Die ursprünglich von Petri entwickelten zeitlosen Netze wurden bis heute für zahlreiche unterschiedliche Anwendungen angepasst und erweitert, so dass inzwischen eine umfangreiche Theorie zur Modellierung und Analyse von Petrinetzen existiert [Mer1994, Gir2003]. Die einzelnen Klassen der Petrinetze stellen Erweiterungen des ursprünglichen Formalismus der Petrinetze dar, die sich hauptsächlich im Hinblick auf die für die Beschreibung der zeitlichen Abläufe einsetzbaren Verteilungsfunktionen, die Kantenvielfalt und die Art der verwendeten Marken unterscheiden.

Unter dem Begriff zeitbehaftete Petrinetze (**Timed Petri Nets, TPN**) werden Petrinetze zusammengefasst, bei denen zwischen dem Erfülltsein der Schaltbedingung, also der Aktivierung der Transition und dem tatsächlichen Schalten, eine gewisse Zeit vergeht. Die Zeit zwischen Aktivierung und Schaltvorgang wird dabei mit konstanten, also deterministischen Zeitangaben beschrieben [Bau2002].

Neben Netzen mit deterministischen Schaltzeiten wurden stochastische Petrinetze (**Stochastic Petri Nets, SPN**) entwickelt, bei denen jede Transition eine konstante Schaltrate besitzt. Die Schaltzeit wird in diesen Netzen als exponentialverteilt angenommen [Mol1981, Hat1991, Sah1996, Haa2002].

Es ist allerdings nicht immer gewünscht, allen Transitionen eines Netzes eine exponentialverteilt Schaltzeit zuzuordnen [Bau1991]. Daher wurden die verallgemeinerten stochastischen Petrinetze (**Generalized Stochastic Petri Nets, GSPN**) entwickelt. Bei diesem Netztyp existieren zwei Arten von Transitionen. Neben den zeitbehafteten Transitionen mit exponentialverteilter Schaltdauer sind auch zeitlose Transitionen zugelassen, die nach ihrer Aktivierung sofort schalten. Zeitlose Transitionen sind ein wichtiges Hilfsmittel zur Darstellung von logischen Verknüpfungen und von Entscheidungs- bzw. Verzweigungsmöglichkeiten und erlauben es kompakte Modelle zu erstellen [Ajm1984, Sie1995, Bau2002].

Eine Erweiterung der GSPN-Modelle stellen die deterministischen und stochastischen Petrinetze (**Deterministic and Stochastic Petri Nets, DSPN**) dar. Außer den exponentialverteilten und den zeitlosen Transitionen sind hier auch Transitionen mit konstanten, also deterministischen Schaltzeiten vorgesehen [Ajm1986, Bau1991, Zim1997, Ger2000].

Sollen neben exponentialverteilten und deterministischen Schaltzeiten auch andere Verteilungen verwendet werden können, können die **erweiterten stochastischen Petrinetze (Extended Stochastic Petri Nets, ESPN)** Anwendung finden. In diesen Netzen kann jeder Transition eine beliebige allgemeine Verteilung zur Bestimmung der Schaltzeit zugewiesen werden [Dug1984, Bau2002].

Bei den von *Jensen* entwickelten **farbigen Petrinetzen (Colored Petri Nets, CPN)** können den Marken, die bislang als nicht unterscheidbar (anonym) betrachtet wurden, Daten mit angehängt werden, so dass diese unterscheidbar werden. Dadurch können je nach Markenfarbe und hinterlegtem Wert unterschiedliche Zustände im Netz eintreten und das dynamische Verhalten des Netzes kann damit beeinflusst werden [Jen1997a]. Auf Basis der farbigen Petrinetze wurden verschiedene Methoden und Werkzeuge entwickelt. Diese Werkzeuge sind im Wesentlichen für die Abbildung des Produktionsablaufes und dessen Steuerung und weniger für die Untersuchung möglicher Ver-

lustquellen und der Instandhaltung konzipiert [Cor1986, Vil1989, DiC1993, Jen1997b].

Neben den farbigen Netzen werden auch die **Warteschlangen-Petrinetze (Queueing Petri Nets, QPN)** den höheren Netzklassen zugerechnet. Warteschlangen-Petrinetze vereinen die Eigenschaften von Petrinetzen mit denen der Warteschlangenmodelle. Dabei werden zwei Stellentypen des Petrinetzes unterschieden. Neben gewöhnlichen Stellen werden solche definiert, die eine Warteschlange repräsentieren, die dann das Warteschlangenverhalten in Produktionsanlagen abbilden können [Bau1993, Bau2002].

Ausgehend von diesen verschiedenen Klassen der Petrinetze wurden von *Pozsgai* die so genannten **erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze (Extended Colored Stochastic Petri Nets: ECSPN)** entwickelt [Poz2005]. Diese basieren auf den farbigen Petrinetzen und sind neben den Eigenschaften der Warteschlangen-Petrinetze und der erweiterten stochastischen Petrinetze um verschiedene zusätzliche Attribute erweitert.

Mit Petrinetzen können beliebige Zustände und Zustandsübergänge beschrieben werden. Sie ermöglichen eine getrennte und übersichtliche Darstellung von Zuständen und Aktivitäten mit lediglich drei verschiedenen Beschreibungselementen, den Stellen, den Transitionen und Kanten. Die meisten Netzklassen sind mathematisch oder mit Simulationstechnik gut analysierbar, der Aufwand hängt allerdings vom Netztyp und der Modellgröße ab [Mer1994]. Petrinetze sind zudem geeignet, bestimmte für Produktionssysteme charakteristische Merkmale abzubilden. Dazu gehören beispielsweise nebenläufige Prozesse und die Konkurrenz um beschränkte Ressourcen. Weiterhin können mit den erweiterten Petrinetzen die stochastisch verteilten Kenngrößen von Produktions- und Instandhaltungsprozessen nachgebildet werden, die in Produktion, Logistik und Zuverlässigkeitstechnik angewandt werden. Petrinetze ermöglichen zudem sowohl eine Top-Down als auch eine Bottom-Up-Modellierung [Pat1993]. Außerdem kann eine hierarchische Dekomposition des Modells in verschiedene Teilnetze bzw. Module erfolgen.

Der Hauptnachteil der Petrinetze besteht darin, dass sich insbesondere die höheren farbigen Netzklassen dem Benutzer nicht mehr intuitiv erschließen. Die Erstellung und Verifikation eines farbigen stochastischen Netzes kann unter Umständen viel Zeit in Anspruch nehmen. Zudem kann eine Modellierung größerer Systeme wie auch bei Markovketten sehr aufwendig werden.

## 3 Grundlagen

Mit Hilfe der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Modellierungsmethoden können Produktionsanlagen bzw. bestimmte Aspekte dieser Systeme abgebildet werden. In diesem Kapitel werden einige Begriffe definiert, die im Folgenden verwendet werden sowie verschiedene Verteilungsfunktionen vorgestellt, die genutzt werden, um das zeitliche Verhalten in einem Produktionssystem zu beschreiben. Des Weiteren wird der prinzipielle Einsatz von Methoden zur Systemmodellierung und -analyse sowie der systematische Ablauf bei diesen Systemanalysen näher erläutert.

### 3.1 Definitionen

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe definiert.

**Zuverlässigkeit:** Die Zuverlässigkeit  $R(t)$  technischer Systeme beschreibt die Wahrscheinlichkeit, unter gegebenen Betriebs- und Funktionsbedingungen während einer gewissen Zeit nicht auszufallen [Ber2004]. Die Zuverlässigkeit hängt somit direkt vom Ausfallverhalten des betrachteten technischen Systems ab.

**Instandhaltung:** Die Instandhaltung bezeichnet Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes sowie zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes von Anlagen, Geräten und Komponenten [VDI1999a, DIN2001, DIN2003].

**Verfügbarkeit:** Die Verfügbarkeit  $A(t)$  ist definiert als Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich ein System unter gegebenen Rahmenbedingungen zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem betriebsfähigen Zustand befindet [Ber2004, Bir2004]. Dadurch hat die Verfügbarkeit einen unmittelbaren Einfluss auf die Produktivität einer Anlage.

**Produktion:** Die Produktion wird gemäß *Gutenberg* definiert als „eine Leistungserstellung, die außer Arbeitsleistungen und Betriebsmitteln auch den Faktor Werkstoffe enthält“ [Gut1983]. Diese Definition enthält die wesentlichen Produktionsfaktoren, zu denen die menschliche Arbeit, Betriebsmittel, Werkstoffe, Daten und Informationen und der dispositive Faktor (Betriebsführung, Planung, Organisation) zählen [Jeh1985].

Zudem wird Produktion als „der betriebliche Umwandlungs- und Transformationsprozess, durch den aus den Einsatzgütern andere Güter oder Dienstleistungen erstellt werden“ bezeichnet [Web1991]. In einer engeren Definition, bezogen auf die betriebliche Leistungserstellung in Fertigungsbetrieben wie sie auch in dieser Arbeit verwendet wird, ist demnach die Aufgabe des Produktionsprozesses die Umwandlung von Roh-



material und Halbzeugen in Fertigteile oder Produkte unter Einsatz vorhandener Produktionsressourcen [Wes2004].

**Risiko:** Der Begriff Risiko wird je nach Fachbereich oder Betrachtungsweise unterschiedlich definiert [Rog1999]. Eine allgemeine Definition von Risiken findet sich in der *DIN 31000*, die sicherheitstechnische Grundbegriffe für ein sicherheitsgerechtes Gestalten definiert. Sie beschreibt das Risiko als Kombination der beiden Größen Häufigkeit des Eintrittes eines zum Schaden führenden Ereignisses und dem Ausmaß des Schadens als Folge des Ereignisses [DIN1979]. In der Betriebswirtschaft wird das Risiko als die Abweichung der realisierten von der geplanten Zielerfüllung definiert, wobei die Höhe durch die Kombination der Wahrscheinlichkeiten des Schadenseintritts und der Schadenshöhe bestimmt wird [Far1996]. Ein weiterer Ansatz ist, das Risiko als Summe der Verlustgefahren zu definieren. Diese resultieren aus der Nichterfüllung von Erwartungen, die bei der Entscheidungsfindung zu Grunde gelegt wurden [Rog1999].

Aus diesen Definitionen lässt sich der im Folgenden zu Grunde gelegte Risikobegriff wie folgt definieren: Risiko ist die negative Abweichung des realisierten vom geplanten Ergebnis. Die Höhe des Risikos ( $R$ ) ist definiert durch die Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeit ( $H$ ) des Risikos mit der Schadenshöhe ( $S$ ), wobei die Schadenshöhe der Betrag der Abweichung vom geplanten Ergebnis ist.

$$R_i = S_i \cdot H_i. \quad (3.1)$$

## 3.2 Statistische Verteilungsfunktionen

Innerhalb einer Produktionsanlage sind die verschiedenen auftretenden Fertigungsprozesse, die auftretenden Verlustquellen wie System- bzw. Komponentenausfälle sowie die Instandhaltung durch stochastisches Verhalten gekennzeichnet [DiC1993, Sil1998], so dass zu deren zeitlicher Beschreibung statistische Verteilungsfunktionen eingesetzt werden, die nachfolgend dargestellt werden.

### 3.2.1 Normalverteilung

Eine in verschiedenen Bereichen eingesetzte stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung ist die Normalverteilung. Sie besitzt viele Anwendungsgebiete, wird jedoch nur selten für die Beschreibung des Ausfallverhaltens benutzt. Viele technische und nichttechnische Größen (zum Beispiel Fertigungstoleranzen) sind normalverteilt [Voß2003]. Sie wird deshalb häufig bei statistischen Prüfverfahren und in der statistischen Qualitätskontrolle eingesetzt [Kos1995]. Die Dichtefunktion der Normalverteilung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Werte symmetrisch um den Mittelwert streuen. Aufgrund der Sym-

metrie fallen der Mittelwert  $\mu$ , der Modalwert  $t_{modal}$  und der Median  $t_{median}$  zusammen. Die Normalverteilung kann mit Hilfe der beiden Parameter  $\mu$  (Lageparameter) und  $\sigma$  (Formparameter) beschrieben werden und die Verteilungsfunktion ist gegeben durch

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^t e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} du \quad (3.2)$$

Die Standardabweichung  $\sigma$  kann als Maß für die Streuung der statistischen Variablen betrachtet werden [Ber2004.]. Nachteil der Normalverteilung ist, dass sie auch negative Werte annehmen kann, so dass sie direkt nur für Aspekte genutzt werden kann, die sowohl im positiven als auch im negativen Wertebereich auftreten können [Fra1999].

### 3.2.2 Exponentialverteilung

Die Exponentialverteilung besitzt als einzigen Parameter die Ausfallrate  $\lambda$  und die Verteilungsfunktion lautet

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3.3)$$

Charakteristisch für die Exponentialverteilung ist eine konstante Ausfallrate. Das bedeutet, die Ausfallrate ist zu jedem Zeitpunkt gleich groß. Wird die Exponentialverteilung für die Beschreibung von Ausfällen eingesetzt, so gilt, dass die zu erwartende Restlebensdauer eines technischen Bauteils, das bereits eine bestimmte Lebensdauer  $t$  erreicht hat, genau so groß ist wie die eines neuen Bauteils. Diese Annahme trifft aber nur auf Bauteile ohne mechanischen Verschleiß oder andere Alterserscheinungen zu, wie zum Beispiel auf manche elektrische oder elektronische Komponenten [Voß2003.]. Zeitintervalle zwischen unabhängigen Ereignissen, zum Beispiel die Zwischenankunftszeit von Fertigungsaufträgen oder die Zeit zwischen zwei Stillständen einer Maschine, werden in der Regel als exponentialverteilt angenommen. Daher findet die Exponentialverteilung auch bei Bedienungsproblemen und in der Warteschlangentheorie Anwendung [Bol1997]. Weiterhin eignet sich die Exponentialverteilung zur Beschreibung von Reparaturzeiten [Kos1995].

### 3.2.3 Weibullverteilung

Die Weibullverteilung wird in der Zuverlässigkeitstheorie häufig eingesetzt, da sich mit ihr unterschiedliches Ausfallverhalten sehr gut beschreiben lässt. Die Dichtefunktion kann in Abhängigkeit vom Formparameter  $b$  so variiert werden, dass sich unterschiedliche Verteilungen ergeben. Die Exponentialverteilung ist zum Beispiel ein Spezialfall der Weibullverteilung für  $b = 1$ . Dabei werden zwei- und dreiparametrische Weibullverteilungen unterschieden. Mit der Weibullverteilung können Frühausfälle, Zu-

fallsausfälle sowie Verschleiß- und Ermüdungsausfälle von Bauteilen beschrieben werden. Außerdem ist sie für die Zeitschätzung von zufälligen Bedienungsprozessen geeignet [Bei1997, Ber2004]. Sie besitzt die Verteilungsfunktion

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (3.4)$$

Ein Spezialfall der Weibullverteilung ist die Rayleighverteilung für  $b = 2$ , die zum Beispiel zur Abbildung der Bearbeitungszeit oder der Rüstzeit einer Maschine oder zur Abbildung der Störung einer Transportanlage verwendet wird [Kos1995].

### 3.2.4 Logarithmische Normalverteilung

Die Funktion der logarithmischen Normalverteilung, meist kurz Lognormalverteilung genannt, ergibt sich aus der Normalverteilung durch Logarithmieren der Zufallsvariablen  $t$ . Die Verteilungsfunktion der logarithmischen Normalverteilung ist wie folgt definiert:

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{u \cdot \sigma \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln u - \mu)^2}{2\sigma^2}} du \quad (3.5)$$

Die Lognormalverteilung eignet sich wie die Weibullverteilung zur Beschreibung von unterschiedlichem zeitlichem Verhalten. Dies ist zum Beispiel bei einem Ermüdungsbruch der Fall. Auch logistische Prozesse, wie zum Beispiel die Lieferzeit eines Ersatzteils, können mit einer Lognormalverteilung beschrieben werden [Ber2004].

### 3.2.5 Gammaverteilung

Die Gammaverteilung existiert in zwei- und dreiparametrischer Form. Sie besitzt den Maßstabsparameter  $a$ , den Formparameter  $b$  und in der dreiparametrischen Form den Lageparameter  $t_0$  [Ber2004]. Mit der Gammaverteilung lässt sich die Störung oder die Reparaturzeit einer Maschine [Bei1995] sowie die Unschärfe der Angaben von Experten bei der Datenakquise beschreiben [Mar1982]. Die Verteilungsfunktion der dreiparametrischen Gammaverteilung lautet

$$F(t) = \frac{1}{b^a \cdot \Gamma(a)} \int_{t_0}^t u^{(a-1)} e^{-\frac{u}{b}} du \quad (3.6)$$

### 3.2.6 Erlangverteilung

Die Erlangverteilung stellt einen Sonderfall der Gammaverteilung für ganzzahlige positive Zahlen für den Formparameter  $b$  dar. Für  $b = 1$  entsprechen Gamma- und Er-

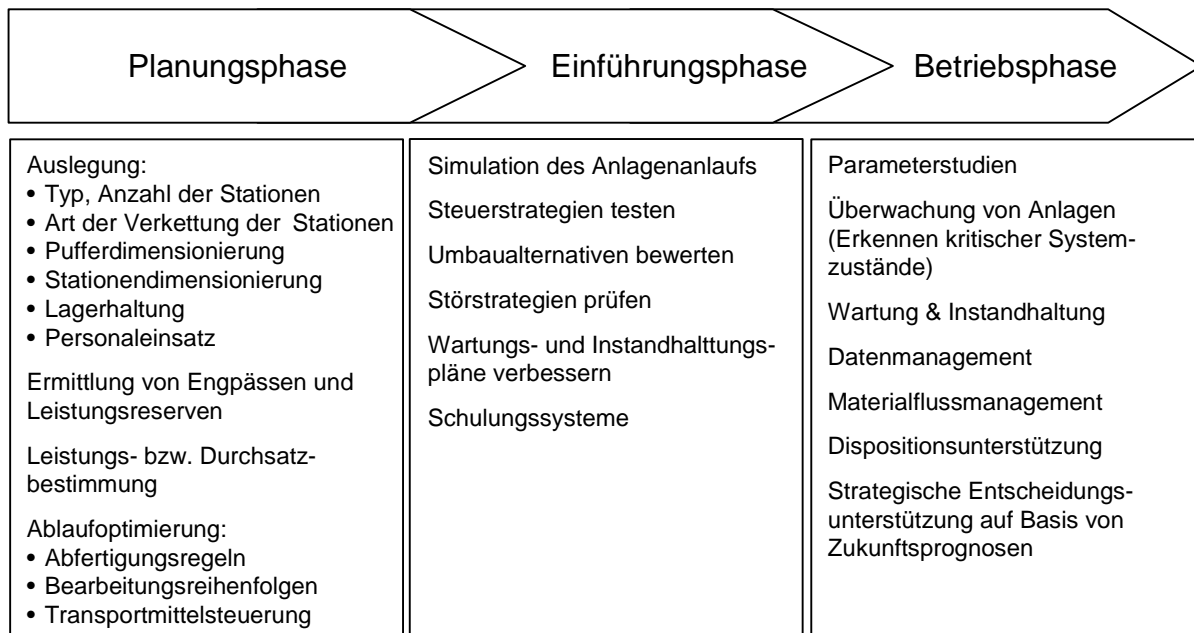
langverteilung der Exponentialverteilung. Das bedeutet, die Erlangverteilung entspricht der Summe von  $n$  statistisch unabhängigen Zufallsgrößen  $t_1, \dots, t_n$  mit derselben Exponentialverteilung. Damit lassen sich zum Beispiel Ausfälle beschreiben, die in Stufen ablaufen und bei denen es am Ende der  $b$ -ten Stufe zum Ausfall kommt [Ber2004]. Die Bearbeitungszeiten auf Produktionsmaschinen folgen ebenfalls häufig einer Erlangverteilung [Gün2005]

$$F(t) = 1 - \sum_{i=0}^{b-1} \frac{e^{-at} (at)^i}{i!} \quad (3.7)$$

### 3.3 Modellbildung und -analyse

Die Modellierung und Analyse wird bei Produktionsanlagen im Wesentlichen in drei unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus angewandt, s. Bild 3.1.

Das übergeordnete Ziel aller Analysen, unabhängig davon, in welcher Phase des Lebenszyklus sie durchgeführt werden, ist die Erhöhung des technischen und wirtschaftlichen Nutzens von Produktionsanlagen und damit eine Verminderung des unternehmerischen Risikos, das mit der Wahl einer bestimmten Anlagenalternative verbunden sein kann [Har1990, Kuh1998].



*Bild 3.1: Einsatzphasen der Modellbildung und -analyse bei Produktionssystemen modifiziert nach [Har1990, Sie2003]*

Während der Planung besteht das Hauptziel darin, mögliche Planungsfehler zu vermeiden und extremes Systemverhalten vorherzusagen. Innerhalb der Planungsphase einer Produktionsanlage werden die Eigenschaften des Systems festgelegt und dadurch

der größte Teil der zukünftigen Kosten vorherbestimmt. Fehler, die innerhalb dieser Phase gemacht werden, führen während des Betriebs der Anlage unter Umständen zu Problemen, deren Lösung wiederum hohe Folgekosten verursachen kann. Daher werden Modellierungs- und zugehörige Analyseverfahren am häufigsten während der Planungsphase eingesetzt. Der Schwerpunkt liegt hierbei meist auf der Leistungsdimensionierung. Weitere wichtige Aufgabenstellungen sind die Auslegung des Produktionssystems und die Optimierung der Fertigungsabläufe, s. Bild 3.1. Das Spektrum reicht dabei von der Auslegung des Gesamtsystems bis zur Dimensionierung einzelner Komponenten. Je nach Anwendungsfall können daher ganz unterschiedliche Ziele im Vordergrund stehen.

Bei der Einführung dient die Modellbildung und -analyse der schrittweisen Inbetriebnahme einer neuen Anlage und im Betrieb der Optimierung bestehender Systeme und zur Anpassung an veränderte Einsatzbedingungen [Kuh1998, War1998], s. Bild 3.1.

Der Ablauf für Modellbildung und -analyse gliedert sich nach *VDI 3633* [VDI2000a] grob in die drei Phasen Vorbereitung, Durchführung und Auswertung. Stärker untergliedert lassen sich sechs verschiedene Teilschritte unterscheiden [Har1990, Kül1999, VDI 2000a], s. Bild 3.2.

### **1. Problemdefinition und Systemanalyse**

Neben der Formulierung eines Zielsystems wird in diesem ersten Schritt auch die grundsätzliche Simulationswürdigkeit der Problemstellung beurteilt [Har1990].

Zu Beginn jeder Simulationsstudie muss das zu Grunde liegende Problem exakt abgegrenzt und das Ziel der Untersuchung festgelegt werden. Danach werden die Systemelemente festgelegt, die als relevant für die Problemstellung betrachtet werden und die Beziehungen zwischen den einzelnen Systemelementen und evtl. zur Umwelt analysiert. Die Definition und Analyse des Systems stellt ein wichtiger Vorbereitungsschritt dar, da sie den Aufwand für die Datenerhebung, die Modellentwicklung, die Simulationsexperimente und die Ergebnisinterpretation maßgeblich beeinflusst.

### **2. Datenerhebung und -aufbereitung**

Anschließend wird festgelegt, welche Daten notwendig sind und wie diese beschafft werden können. Diese Daten bilden die Simulationsdatenbasis. Eine besondere Rolle spielen dabei die Daten, die die Verteilung auftretender Systemparameter beschreiben.

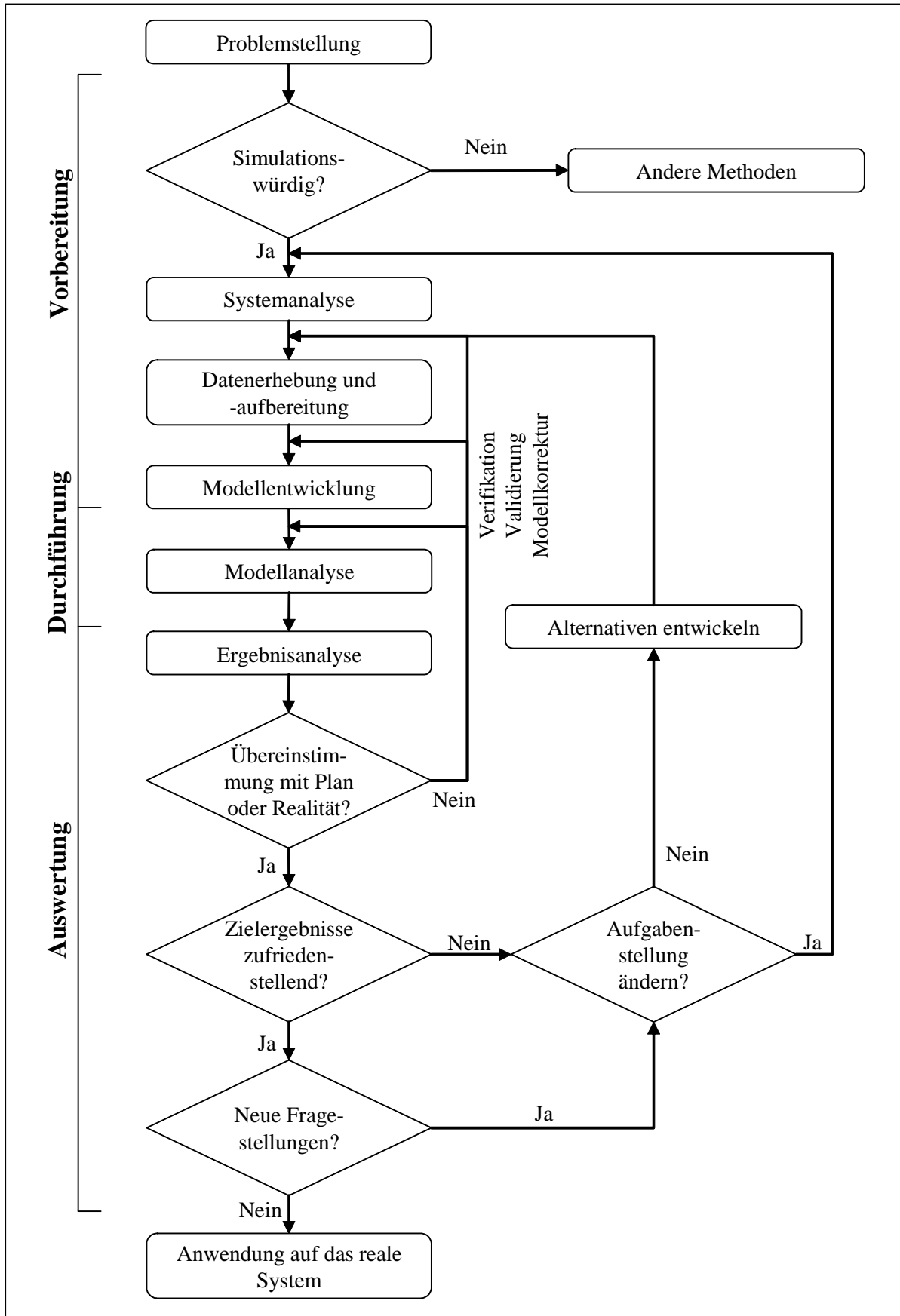


Bild 3.2: Vorgehensweise bei Simulationsuntersuchungen modifiziert nach [Kül1999, VDI 2000a]

### **3. Modellentwicklung, -verifikation und -validierung**

Der nächste Schritt erfordert einen Abstraktionsprozess, der zur Formulierung eines abstrakten Modells führt, das innerhalb der gegebenen Rahmenbedingungen mit dem Originalsystem übereinstimmt. Die Modellierung erfolgt in zwei Stufen. Zunächst entsteht in der ersten Modellierungsstufe aus einem gedanklichen ein symbolisches Modell, das noch nicht ablauffähig oder experimentierbar ist.

In der zweiten Modellierungsstufe wird das mathematische (bzw. logische) Modell in ein Software-Modell umgesetzt. Dazu kann entweder eine der bekannten Programmiersprachen oder ein anwendungsorientiertes Simulationswerkzeug eingesetzt werden.

Nach der Implementierung muss das erstellte Modell auf seine Richtigkeit überprüft werden. In diesem Zusammenhang wird unter dem Begriff der Modellverifikation die Überprüfung des Modells auf Korrektheit verstanden. Dies bedeutet, dass überprüft wird, ob das Modell korrekt ist, also mittels des gewählten Beschreibungsmittels richtig umgesetzt wurde [VDI 2000a].

Unter Validierung wird hingegen die Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und System verstanden. Es ist sicherzustellen, dass das Modell das Verhalten des realen Systems im Hinblick auf die Untersuchungsziele genau genug und fehlerfrei widerspiegelt und eventuell sind Korrekturen des Modells vorzunehmen.

### **4. Modellanalyse bzw. Planung und Durchführung von Simulationsexperimenten**

Die Analyse des Modells hängt von den in Schritt 1 festgelegten Zielen ab, die mit der Untersuchung verfolgt werden. Einige der Modellierungsmethoden können nur unter bestimmten Einschränkungen direkt analytisch gelöst werden. Vielmehr ist die Analyse einiger Modelle auf Basis analytischer Methoden nicht oder nur mit großem Aufwand möglich [DiC1993]. Für diese Methoden bietet die Simulationstechnik eine mögliche Alternative. Die Hauptaufgabe der Planung der Simulationsexperimente ist die Festlegung der zu variierenden Parameter, um mit einer möglichst geringen Anzahl an Simulationsdurchgängen eine bestmögliche Aussage über die zu untersuchende Fragestellung zu erreichen. Sinnvolle Versuchsreihen können mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung aufgestellt werden [Kle2004]. Hierbei werden die Anzahl der erforderlichen Experimente, die Einstellungen der Einflussgrößen in den Experimenten, die Simulationsdauer sowie die Messpunkte und -intervalle festgelegt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass selbst dann aussagekräftige Ergebnisse gewonnen werden, wenn nicht alle denkbaren Parameterkonstellationen geprüft werden [VDI2000a].

## **5. Ergebnisanalyse**

Nach Abschluss der Experimente erfolgt die Auswertung der Simulationsergebnisse. Der Ergebnisaufbereitung kommt eine besondere Bedeutung zu, da von ihr der Aufwand für die Interpretation der gewonnenen Daten abhängt. Die Ergebnisse müssen validiert und die Ergebnisse einzelner Simulationsläufe in einen Zusammenhang gebracht werden. In einem weiteren Schritt können die Daten zu Kennwerten verdichtet werden, die das Verhalten des Systems beschreiben [Har1990, VDI2000a].

## **6. Anwendung auf das reale System**

Im letzten Schritt werden die am Modell gewonnenen und statistisch aufbereiteten Ergebnisse interpretiert und auf das reale System übertragen. Dabei ist es notwendig, die zuvor ermittelten Ergebnisse auf ihre Aussagekraft hin zu überprüfen, um eine darauf basierende Entscheidung mit ausreichend hoher Sicherheit treffen zu können.

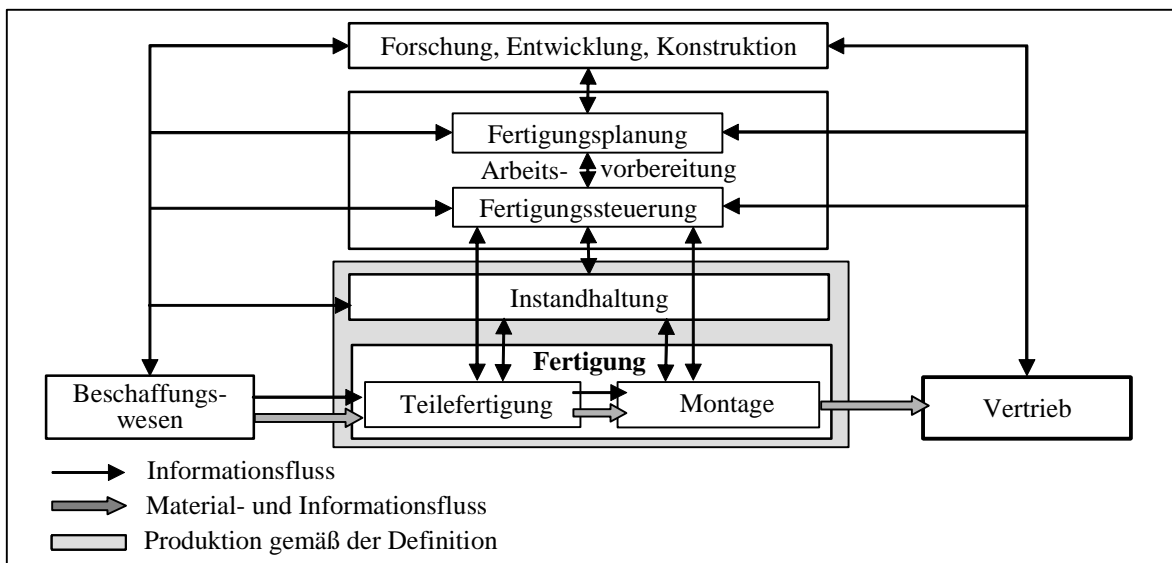


## 4 Systemabgrenzung und -beschreibung

Um die Anforderungen an ein adäquates Modellierungs- und Simulationsinstrument festzulegen, wird gemäß der im vorhergehenden Kapitel vorgestellten Vorgehensweise nach VDI 3633 [VDI2000a] das zu betrachtende System im folgenden Kapitel abgegrenzt und beschrieben.

### 4.1 Abgrenzung des Systems Produktion

Die Produktion wird im Rahmen dieser Arbeit abgegrenzt als das Subsystem des Unternehmens, welches die Umwandlung von Rohmaterial und Halbzeugen in Fertigteile oder Produkte unter Einsatz vorhandener Produktionsressourcen vornimmt, s. Abschn. 3.2. Der Produktionsprozess umfasst gemäß dieser Abgrenzung die Bereiche Teilefertigung und Montage, s. Bild 4.1.



*Bild 4.1: Die Produktion im Unternehmen gemäß der getroffenen Abgrenzung modifiziert nach [War1995]*

Die Produktion ist charakterisiert durch die nachstehenden Eigenschaften. Zum einen stellt sie ein Subsystem des gesamten Unternehmens dar, das mit anderen Unternehmensbereichen und der Umwelt über zahlreiche Wechselwirkungsprozesse (Austausch von Material, Energie und Information) verbunden ist, so dass es sich um ein offenes System handelt. Viele verschiedene Prozesse, die gleichzeitig ablaufen und dazu führen, dass das System seinen Zustand mit der Zeit ändert, kennzeichnen das Produkti-

onssystem als dynamisches System. Weiterhin handelt es sich bei Produktionssystemen um stochastische Systeme, da eine Vielzahl der Abläufe in gewissem Maß zufällig verteilte Zeitdauern benötigen [War1995]. Aufgrund der großen Anzahl an Systemelementen und der vielfältigen Beziehungen zwischen ihnen sind Produktionssysteme Systeme von hoher Komplexität [Sch1992]. Somit können Produktionssysteme als offene, dynamische, stochastische und komplexe sozio-technische Systeme beschrieben werden [Kos1995].

Ein Produktionssystem wird dabei aus der Gesamtheit an Teilsystemen gebildet, die zur Erfüllung einer Fertigungsaufgabe notwendig sind [REF1987]. Diese Teilsysteme sind Bearbeitungs- bzw. Montagesysteme, Materialflusssysteme und Informationssysteme.

#### **4.1.1 Bearbeitungs- bzw. Montagesystem**

Das Bearbeitungs- und Montagesystem umfasst alle Einrichtungen, die direkt am Produktionsfortschritt beteiligt sind wie zum Beispiel Maschinen, Werkzeuge, Prüfmittel, Hilfsstoffe, usw.. Durch das Bearbeitungs- und Montagesystemen werden die zu erzeugenden Produkte bearbeitet.

#### **4.1.2 Materialflusssystem**

Zum Materialflusssystem zählen alle Fördermittel und Förderhilfsmittel zum Handhaben, Transportieren, Bereitstellen und Lagern von Werkstücken, Werkzeugen, Messmitteln und Hilfsstoffen. Dies sind beispielsweise Fahrzeuge, Förderbänder, Industrieroboter, Paletten und Lagersysteme. Es kann in die Teilfunktionen Fördern, Lagern/Speichern und Handhaben untergliedert werden. Außer dem Werkstück können auch Werkzeuge, Hilfszeuge, Messzeuge und Späne transportiert werden [VDI1974a, VDI2000a].

Der innerbetriebliche Materialfluss ist maßgebend für die Anordnung von Betriebsmitteln, die Auswahl der Fördermittel und die Auswahl der Lagereinrichtungen [War1995]. Da in den meisten Fällen das Produkt einen mehrstufigen Produktionsprozess durchläuft bis es seinen gewünschten End- oder Zwischenzustand erreicht hat, ergibt sich automatisch eine Verkettung der verschiedenen Stationen [Har1990]. In komplexen Produktionssystemen weist der Materialfluss meist eine verzweigte Struktur und eine Verkettung der Stationen (Innenverkettung bei Fertigungs- bzw. Montagelinien, Außenverkettung bei Fertigungs- bzw. Montagesystemen) auf [Har1990].

### 4.1.3 Informationssystem

Die Aufgabe des Informationssystems ist die Übermittlung aller für einen ungestörten Produktionsablauf notwendigen Daten. Darüber hinaus umfasst es Einrichtungen zum Speichern, Verwalten, Bearbeiten, Senden und Empfangen von Nachrichten. In komplexen Produktionssystemen sind vor allem Hardware- und Softwarekomponenten zu finden, aber auch Papierunterlagen wie Laufkarten und Arbeitspläne sind nach wie vor Bestandteil von Informationssystemen.

## 4.2 Systemanalyse des Systems Produktion

Die Handhabbarkeit moderner technischer Fertigungseinrichtungen und das Verständnis der technischen und wirtschaftlichen Zusammenhänge werden durch die steigende Komplexität der Anlagen zunehmend schwieriger. Geeignete Ansätze zur Beschreibung dynamischer, komplexer Systeme bietet die Systemtheorie [War1995]. Zur Erstellung eines Modells ist es daher hilfreich, die Elemente der drei zuvor genannten Teilsysteme aus systemtheoretischer Sicht weiter zu untersuchen.

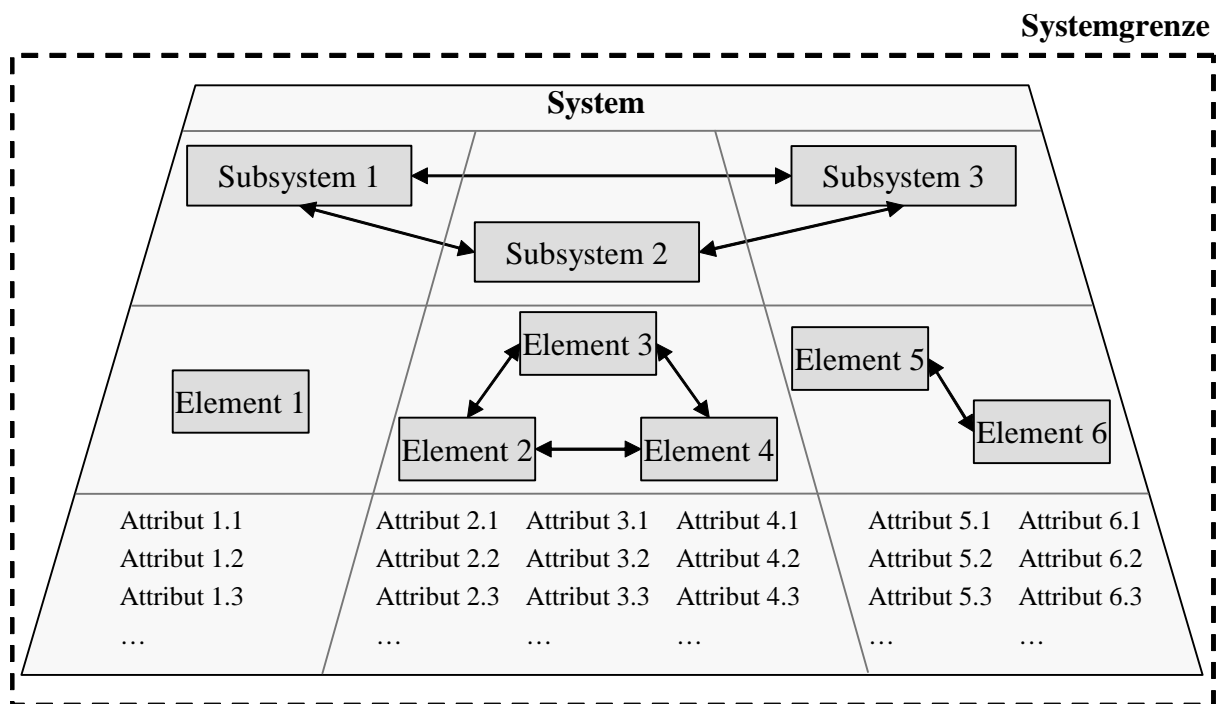


Bild 4.2: Systembeschreibung

Ein System (systema, griech.: das Zusammengestellte) wird aus einer Gesamtheit von Elementen gebildet, die Eigenschaften besitzen und durch Abhängigkeiten und Wechselwirkungen miteinander in Beziehung stehen [VDI 2000a]. Ausgehend von einer systemtheoretischen Betrachtung wird jedes System durch die Systemhierarchie, Elemente, Relationen und Attribute beschrieben [Rop1975, Fri1984], s. Bild 4.2.

Diese allgemeinen Gliederungsaspekte lassen sich auch auf Produktionssysteme übertragen und erlauben eine sehr allgemeine, aber anschauliche Betrachtung von Produktionsstrukturen [Rop1975, Ber1995].

#### 4.2.1 Hierarchie

Produktionssysteme lassen sich hierarchisch in Unter- bzw. Subsysteme gliedern. Komplexe Produktionssysteme können neben der in Abschnitt 4.1 vorgestellten thematischen Untergliederung ebenfalls von der Betriebsebene über die Anlagen-, Zellen-, Maschinen- und Komponentenebene strukturiert werden [Har1990]. Dieser generelle hierarchische Aufbau besitzt für alle Produktionssysteme unabhängig von der Größe und dem Automatisierungsgrad des Systems Gültigkeit. Eine geeignete Gliederung hilft dabei, den Elementen die für den jeweiligen Betrachtungsschwerpunkt relevanten Attribute und Relationen zuzuordnen.

Auf der untersten Hierarchiestufe befinden sich z. B. die **NC-Werkzeugmaschinen**, die nur ein einziges Fertigungsverfahren ausführen, und die **Bearbeitungszentren**, auf denen mehrere Fertigungsverfahren ausgeführt werden können.

Die verschiedenen Ausführungsformen von Produktionssystemen werden in einstufige und mehrstufige Systeme unterschieden. Bei **einstufigen Systemen** werden an einer einzigen Bearbeitungsstation alle für einen bestimmten Produktionsfortschritt notwendigen Arbeitsschritte an einem Produkt ausgeführt. Bei **mehrstufigen Systemen** kann der gewünschte Arbeitsfortschritt nur mit mehreren Bearbeitungsstationen erzielt werden, die das Werkstück nacheinander durchläuft. Wenn die Komplettbearbeitung eines Produktes nicht auf einer Bearbeitungsstation möglich ist, sind folglich immer mehrstufige Produktionssysteme vorhanden [War1995].

**Fertigungs- bzw. Montagezellen** zählen zu den einstufigen Systemen. Eine **flexible Fertigungszelle (FFZ)** besteht wiederum aus den drei Teilsystemen Bearbeitungssystem, Materialflusssystem (für Werkstücke und ggf. Werkzeuge) und Informationssystem (Zellenrechner). Das Bearbeitungssystem der Zelle besteht aus einer oder mehreren Bearbeitungsmaschinen, die über einen gemeinsamen Werkstückspeicher verfügen und in der Regel automatisch mehrere verschiedene Werkstücke bearbeiten. Zusätzlich können automatisierte Überwachungs-, Mess- und Handhabungseinrichtungen integriert sein.

Zu den mehrstufigen Systemen gehören die flexiblen Fertigungs-/Montagelinien und die flexiblen Fertigungs-/Montagesysteme, die beide einen automatischen Materialfluss besitzen. In einer **flexiblen Fertigungs-/Montagelinie** bzw. einer **flexiblen Transferstraße** durchlaufen die Werkstücke die Bearbeitungsstationen und/oder flexiblen Fertigungszellen in einer festgelegten Reihenfolge (Innenverkettung). Zum

Ausgleich von Taktunterschieden, Rüstzeiten und Störungen sind häufig Pufferstrecken integriert. Mit Hilfe von **flexiblen Fertigungssystemen (FFS)** kann eine automatisierte mehrstufige Mehrproduktfertigung realisiert werden. Mehrere numerisch gesteuerte Bearbeitungszentren werden dazu von den Werkstücken in beliebiger Reihenfolge durchlaufen (Außenverkettung).

Durch eine hierarchische Strukturierung kann die Modellierung von Produktionsprozessen vom Gesamtverhalten des Produktionssystems bis hin zu den Abläufen in einer einzelnen Maschine oder sogar in einer einzelnen Baugruppe untergliedert werden [Har1990, War1995.].

#### 4.2.2 Elemente

Innerhalb der Systemtheorie ist ein Element der Teil eines Systems, der nicht weiter zerlegt wird [VDA1999]. Zur Erstellung eines Modells ist es zudem sinnvoll, die Elemente der drei oben genannten Teilsysteme in weitere Kategorien einzuteilen [Kos1995]. Ein Produktionssystem enthält feste bzw. statische Elemente, bewegliche bzw. dynamische Elemente und Schnittstellenelemente, s. Bild 4.3.

<b>Modellelemente</b>		
<p><b>statische Elemente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bearbeitungselemente</li> <li>• Materialflusselemente</li> <li>• Informationselemente</li> </ul>	<p><b>dynamische Elemente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bearbeitungsobjekte</li> <li>• Bearbeitungselemente</li> <li>• Materialflusselemente</li> <li>• Informationselemente</li> </ul>	<p><b>Schnittstellenelemente</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eintrittspunkte</li> <li>• Austrittspunkte</li> </ul>

*Bild 4.3: Modellelemente eines Produktionssystems nach [Kos1995]*

**Feste bzw. statische Elemente** (s. Bild 4.3) sind ortsfeste Betriebsmittel, d. h. Bestandteile von Bearbeitungs-, Transport-, Handhabungs- und Lagersystemen, die im Kontakt mit beweglichen Elementen bestimmte Aktivitäten ausführen, zum Beispiel Bearbeitungsschritte an einem Werkstück, das sich durch die Maschine bewegt. Die stationären Bearbeitungselemente nehmen dabei die Bearbeitungsobjekte auf und verändern deren Eigenschaft. Hingegen transportieren die stationären Materialflusselemente (Lager, Puffer, stetige Fördermittel, Transportwege usw.) die Bearbeitungsobjekte, wobei deren Eigenschaften allerdings nicht verändert werden. Die statischen Elemente nehmen dabei verschiedene Zustände ein, die sich über der Zeit verändern, wie z. B. „Aktiv“, „Warten auf nächstes Werkstück“, „Ausgefallen“ usw..

Die **beweglichen bzw. dynamischen Elemente** (s. Bild 4.3) bewegen sich im Zeitablauf durch das Produktionssystem und bewirken dadurch unter anderem Zustandsänderungen der statischen Elemente sowie des gesamten Systems, z. B. die Auslastung des Lagers, das Bearbeitungsprogramm einer Maschine, die Anzahl des noch zur Verfügung stehenden Bearbeitungspersonals. Dabei wird unterschieden zwischen permanenten Elementen, die sich ständig innerhalb des Systems befinden, und temporären Elementen, die das System über die Systemgrenze verlassen und aus der Umgebung in das System eintreten können.

Neben den festen und beweglichen Elementen existieren zudem **Schnittstellenelemente**, die für die beweglichen Systemelemente eine Verbindung zwischen dem System und seiner Umwelt darstellen [Kos1995].

### 4.2.3 Relationen und Struktur

Die Elemente eines Produktionssystems sind durch Beziehungen untereinander verknüpft. Durch die Relationen der festen Elemente, z. B. Vorgänger-Nachfolgerbeziehungen, wird die Systemstruktur festgelegt [Kos1995]. Weitere Relationen können bedingt sein durch die Konkurrenz um feste oder dynamische Elemente wie z. B. verschiedene beschränkte Produktionsfaktoren in Form von Material, Maschinen oder Lagerplätzen.

Aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht wird zudem bei der Beschreibung der Elemente berücksichtigt, wie das Ausfallverhalten des Gesamtsystems Produktion durch das Verhalten der einzelnen Systemelemente beeinflusst wird. So kann der Ausfall einer Maschine das Verhalten einer anderen beeinflussen. Dabei lassen sich Systeme unterscheiden, bei denen das Ausfallverhalten der einzelnen Systemelemente voneinander unabhängig ist, und Systeme, bei denen das Ausfallverhalten einzelner Elemente das der anderen beeinflusst. Systeme, deren Systemelemente unabhängig sind, können rein seriell aufgebaut sein. Dabei übernimmt je eine Fertigungseinrichtung einen bestimmten Arbeitsschritt, fällt diese aus, so ist eine weitere Produktfertigung nicht mehr möglich. Bei rein parallel bzw. redundant aufgebauten Systemen führen alle Maschinen dieselbe Arbeit aus, so dass bei Ausfall einer Maschine die anderen weiterhin ihre Fertigungsaufgabe verrichten können. Ebenso können gemischte Systemstrukturen aus teils seriell und redundant aufgebauten Systemelementen existieren.

Eine Abhängigkeit zwischen den festen Elementen der Produktionsstruktur stellt die **Lastteilung** dar. Dies bedeutet, dass z. B. für einzelne Arbeitsschritte mehrere Maschinen zur Verfügung stehen. Fällt eine dieser Maschinen aus, so produziert die andere Maschine weiter und zwar mit erhöhter Taktzahl. Dadurch steigt allerdings die Belas-

tung für diese Maschine und damit auch das Risiko, auszufallen. Daher verändert sich das Ausfallverhalten der nun höher belasteten Maschine.

Existieren *funktionale Abhängigkeiten* zwischen den Systemelementen, so kann der Ausfall eines Elementes einen direkten Einfluss auf ein anderes Systemelement besitzen. Diese Abhängigkeit ist beispielsweise bedingt durch energetischen, stofflichen oder informativen Zusammenhang [Poz2002].

Bei Abhängigkeiten zwischen Systemzustand und Systemelementzustand ergeben sich *strukturelle Abhängigkeiten*. Diese können unter anderem zu passiven Zuständen führen, wenn das komplette System ausgefallen, das einzelne Element hingegen eigentlich intakt, aber nicht in Betrieb ist. Diese so genannten passiven Zustände können trotz Stillstand für einige Systemelemente (z. B. Dichtungen) dennoch zu einem Zuwachs der Alterung führen und beeinflussen damit die Verfügbarkeit des gesamten Systems [Poz2002].

Eine weitere Abhängigkeit, die aus zuverlässigkeitstechnischer Sicht auftreten kann, sind *Common Mode Fehler*. Dabei unterliegen die einzelnen Systemelemente einer gleichen systemweiten Ausfallursache (z. B. Stromausfall, Explosion, Extremtemperaturen) und fallen daher gleichzeitig aus.

Bei Produktionssystemen hat zudem die Verkettung der einzelnen Systemelemente einen Einfluss auf die Ausbringungsmenge. In diesem Zusammenhang wird zwischen loser Verkettung, elastischer Verkettung und starrer Verkettung unterschieden [VDI1974a, Jeh1997, Sch2002].

Die Art der Verkettung ergibt sich je nach Abhängigkeit der Stationen untereinander bezüglich Materialversorgung und -entsorgung. Sie entscheidet darüber, ob bei Ausfällen Warte- und Blockierzeiten auftreten und wie lang diese sind.

Die *lose Verkettung* stellt einen Idealzustand dar, bei dem immer lieferbereite und aufnahmebereite, im Extremfall unendlich große Zwischenpuffer angenommen werden. Da die Stationen völlig unabhängig voneinander arbeiten, können keine Warte- und Blockierzeiten entstehen.

Bei der *elastischen Verkettung* werden Folgestörungen durch endlich große Zwischenpuffer abgemildert. Ein Ausfall führt zu einer Folgestörung bei der nachfolgenden Station, wenn die Ausfalldauer nicht mit dem Vorrat im Zwischenpuffer überbrückt werden kann, und bei der vorhergehenden Station, wenn es nicht mehr möglich ist ein gefertigtes Teil zwischen zu lagern. Wie groß die Zeitverzögerung bis zum Eintritt der Folgestörung ist, hängt von der Länge der Taktzeiten und der Anzahl der Teile, die sich im Puffer befinden bzw. die dieser noch aufnehmen kann, ab. Die Dauer

der Folgestörung ergibt sich aus der Differenz zwischen Ausfalldauer und Zeitverzögerung.

Bei der *starr* Verkettung befinden sich keine Puffer zwischen den Stationen, so dass jeder Ausfall zu einer Folgestörung führt. Vorgehende Stationen werden sofort, nachfolgende um eine Taktzeit verzögert blockiert. Bei einer starren Verkettung ist die Modellierung des Produktionsablaufs selbst nicht unbedingt notwendig, da die gefertigte Stückzahl direkt über die Verfügbarkeit der Anlage ermittelt werden kann. Bei einer elastischen oder losen Verkettung ist dies durch den Einfluss der Puffer nicht direkt möglich, so dass eine Modellierung des Produktionsprozesses für realitätsnahe Aussagen notwendig ist.

In komplexen Produktionssystemen sind die Bearbeitungsstationen im Allgemeinen elastisch verkettet. Neben der Störungskompensation übernehmen die Puffer bei Ausfällen auch den Ausgleich von Leistungsschwankungen und die Disposition von Teilen [VDI1974b].

#### 4.2.4 Attribute

Jedes Modellelement ist durch einen Satz von Attributen charakterisiert, der sich im Modell als ein für die Klasse spezifischer Datensatz wieder findet. Ein Attribut beschreibt dabei eine Eigenschaft eines Modellelementes. Ein Attribut kann entweder mit einem festen Wert belegt werden oder das Attribut kann sich innerhalb des Betrachtungszeitraumes bzw. des Simulationslaufes in Abhängigkeit des Zustandes der anderen Elemente ändern. Zum Beispiel kann für das Attribut „Länge“ einer Förderstrecke der Wert „10“ angegeben werden. Weitere Beispiele für Parameter sind Kenngrößen wie Maschinenleistungsdaten, die Anzahl an Maschinen, Anzahl und Kapazität der Pufferplätze sowie Layoutdaten und in Arbeitsplänen enthaltene Informationen. Die „durchschnittliche Anzahl der Objekte“ auf der Förderstrecke ist ebenfalls ein Attribut, das jedoch nicht parametrisiert wird, da es sich während des Produktionsvorganges permanent verändert [VDI2000a]. Attribute beschreiben sowohl die deklarativen als auch die prozeduralen Eigenschaften der Systemelemente. Die Bearbeitungszeit einer Bearbeitungsstation ist zum Beispiel eine deklarative Eigenschaft; eine prozedurale Eigenschaft dagegen gibt an, was eine Bearbeitungsstation macht, wenn sie mit der Bearbeitung eines Werkstückes beginnt.

##### 4.2.4.1 Produktionsprozess

Bestimmte Attribute beschreiben den Produktionsprozess allgemein über alle Systemelemente hinweg. Diese organisatorischen Attribute können neben Schichtmodellen, Pausenzeitregelungen und der Gesamtkapazität an Personal auch bestimmte allgemeine Steuerstrategien und Prioritätsregelungen vorgeben [VDI2000a]. Neben diesen or-



organisatorischen Attributen stellen auch Attribute aus Systemlastangaben übergeordnete Attribute für die gesamte Anlage dar. Dabei werden vor allem die Art der Auftragsauslösung (Make to Order, Make to Stock usw.), die Zusammensetzung (Bauteilart, Stückzahl usw.) und die Häufigkeit des Auftrageingangs vorgegeben [Sch2002].

### **Materialflusssystem**

Attribute, die die Elemente des Materialflusssystems beschreiben, sind zum Beispiel in den Betriebsmitteldaten aufgeführt. Die allein den störungsfrei ablaufenden Produktionsprozess betreffenden Attribute, sind zum einen die Kapazität aber auch technische Attribute z. B. werkstückabhängige Restriktionen von Lagereinrichtungen oder auch Zeitvorgaben, Geschwindigkeiten und zurückzulegende Entfernungen von Fördereinrichtungen. [Har1990, Olf2000].

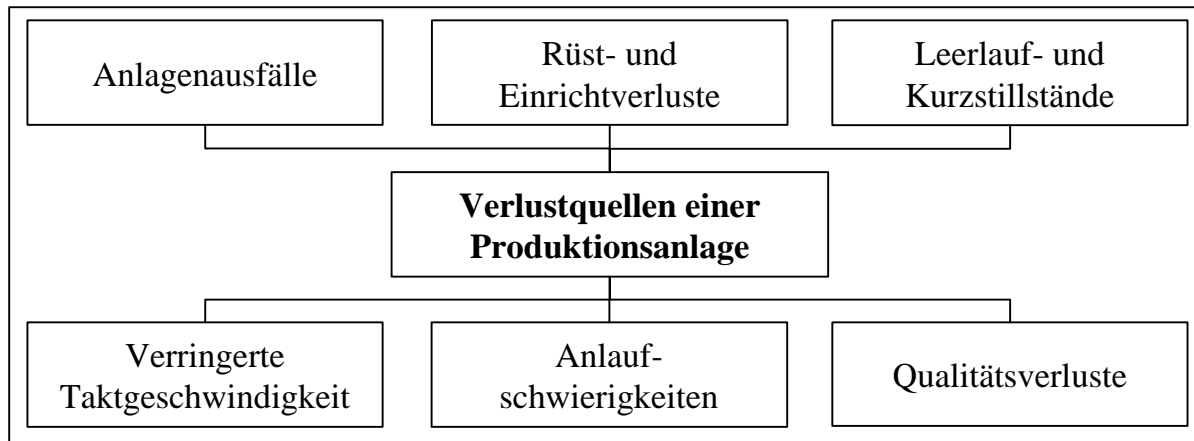
### **Bearbeitungs- bzw. Montagesystem**

Innerhalb des Bearbeitungs- und Montagesystems erfolgt die detaillierte Beschreibung der hergestellten Produkte, der Werkstücke, durch ihre Arbeitspläne. Neben den Werkstückangaben wie Länge, Breite, Höhe und Gewicht werden sie vor allem durch ihren Bearbeitungszustand, ihre Bearbeitungspriorität, die Art und Reihenfolge der durchzuführenden Arbeitsschritte und die jeweilige Menge charakterisiert. Dem Arbeitsplan können zudem weitere Informationen entnommen werden wie die Abfolge der Arbeitsschritte, die Zuordnung verschiedener Arbeitsschritte zu bestimmten Vorrichtungen oder Fertigungsmitteln und die zu benutzenden Transporteinrichtungen. Attribute, die den Fertigungseinrichtungen direkt zugeordnet werden können, sind Takt- und Rüstzeiten, Pufferkapazitäten sowie Stör- und Reparaturzeiten.

#### **4.2.4.2 Verlustquellen eines Produktionssystems**

Für ein Produktionssystem können unterschiedliche Effekte auftreten, die das betriebswirtschaftliche Ergebnis einer Anlage beeinflussen. Neben kompletten Anlagenstillständen können darüber hinaus weitere Aspekte zu einem verringerten Produktionsniveau führen.

Das Auftreten dieser ungewünschten Effekte kann entsprechend der Theorie des Total Productive Maintenance Ansatzes (TPM) durch sechs verschiedene Verlustquellen entstehen, die alle eine Minderung der Produktivität einer Anlage bewirken können und die den statischen Elementen des Bearbeitungs- und Materialflusssystems zugeordnet werden können [Alr1997]. Im Einzelnen sind dies Anlagenausfälle, Rüst- und Einrichtverluste, Leerlauf- und Kurzstillstände, verringerte Taktgeschwindigkeit, Anlaufschwierigkeiten und Qualitätsverluste, s. Bild 4.4.



*Bild 4.4: Verlustquellen eines Produktionssystems nach TPM*

Diese Verlustquellen haben Auswirkungen auf das zeitliche und mengenmäßige Risiko einer Anlage [Rog1999] und können den einzelnen Systemelementen als Attribute zugeordnet werden.

### **Anlagenausfälle**

Anlagenausfälle stellen die bedeutendste Verlustquelle der Produktion dar [Alr1997] und treten als zufällige Ereignisse auf. Aufgrund dieser stochastischen Eigenschaften stellen Anlagenausfälle eine zeitabhängige Wahrscheinlichkeitsgröße dar, die mathematisch mit Hilfe statistischer Verteilungsfunktionen beschrieben werden kann [Bel2000]. Für die Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit sind die in Abschn. 3.2 näher erläuterten Verteilungsfunktionen Exponential-, Normal-, Lognormal- und Weibullverteilung gebräuchlich.

Maschinenabhängige Anlagenausfälle werden in diesem Zusammenhang definiert als Störungen der Funktion der Anlage durch einen mechanischen, elektrischen, pneumatischen oder hydraulischen Defekt. Zudem können maschinenunabhängige Faktoren wie Fehlen von Material oder Werkzeug einen Anlagenausfall bewirken [Alr1997].

### **Rüst- und Einrichtverluste**

Unter Rüst- und Einrichtverlusten werden die zeitlichen Verluste verstanden, die entstehen, wenn eine Anlage für die Herstellung eines neuen Teils umgerüstet wird. Dabei wird der Zeitraum zwischen Ende der Produktion des alten Bauteils bis zum Zeitpunkt, an dem die Anlage die neuen Teile mit der gewünschten Qualität produziert, als Verlust gewertet [Alr1997]. Diese Rüst- und Einrichtverluste werden stark von der Häufigkeit der durchgeführten Rüst- und Einrichtaktionen beeinflusst. Da diese wiederum von der Häufigkeit der unterschiedlichen ankommenden Aufträge und der Auftragseinplanung abhängen, sind diese Verluste abgesehen von den Rüstzeiten zwischen

Werkstückwechsel von vornherein ohne Simulationsunterstützung nur schwer abzuschätzen.

### **Leerlauf- und Kurzstillstände**

Die dritte Verlustquelle, die bei Produktionsanlagen auftritt, sind Leerlauf- und Kurzstillstände. Dabei handelt es sich um kurze Unterbrechungen oder Störungen der Anlage. Diese Unterbrechungen sind nur von kurzer Dauer und können schnell behoben werden. In Summe hat allerdings eine große Anzahl dieser Anlagenstillstände einen großen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Anlage [Alr1997].

### **Verringerte Taktgeschwindigkeit**

Der Zustand eines Fertigungsmittels verursacht in manchen Fällen nicht direkt einen Ausfall der Anlage. So kann beispielsweise eine verminderte Antriebsleistung zu verringerten Taktzeiten führen, die nicht direkt die Anlage zum Stillstand bringen, aber dennoch Verluste verursacht.

### **Anlaufschwierigkeiten**

Anlaufschwierigkeiten können bei Schichtbeginn oder bei Neuinbetriebnahme einer Anlage entstehen, bedingt durch eine zu schlechte Maßhaltigkeit oder dadurch, dass die Anlage wie beispielsweise bei einem Härteofen noch nicht auf Betriebstemperatur ist [Alr1997].

### **Qualitätsverluste**

Die sechste Verlustquelle sind Qualitätsverluste, wozu neben Ausschuss auch Teile zählen, die nachbearbeitet werden müssen. Unter Qualität wird der Grad verstanden, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt [DIN2005]. Daraus folgt, dass Qualitätsverluste abhängig sind von der Wahrscheinlichkeit, mit der Fehler im Prozess auftreten, die zu einer Abweichung von diesen Anforderungen führen. Der Schaden, der aus Qualitätsverlusten resultiert, lässt sich direkt anhand des produzierten Ausschusses sowie der benötigten Nacharbeit bestimmen, da jedes Ergebnis, das als Ausschuss klassifiziert wird, diesen Qualitätsanforderungen nicht entspricht.

In dieser Arbeit werden im Wesentlichen die vier Hauptverlustquellen Anlagenausfälle, Rüst- und Einrichtungsverluste, Leerlauf- und Kurzstillstände und Qualitätsverluste berücksichtigt.

#### 4.2.4.3 Instandhaltung

Das Ziel der Instandhaltung ist es, eine möglichst hohe Einsatzverfügbarkeiten bei geringen Kosten zu erreichen [Bec1994].

Die Instandhaltungsmaßnahmen untergliedern sich dabei in Maßnahmen zur planmäßigen und zustandsorientierten Instandhaltung vor einem Ausfall und in Maßnahmen zur außerplanmäßigen Instandhaltung nach einem Ausfall [VDI1986, Bec1994, VDI2002, DIN2003].

Die **planmäßige (vorbeugende) Instandhaltung** erfolgt zu festgelegten Zeitpunkten oder periodisch nach einer bestimmten Anzahl von Betriebsstunden. Zur planmäßigen Instandhaltung gehören Maßnahmen zur Wartung, Inspektion und Überholung.

Die **zustandsorientierte Instandhaltung** vermeidet feste Überholungsintervalle und somit die Erneuerung noch funktionsfähiger Baugruppen. Dafür werden Inspektionen durchgeführt und die Restlebensdauer der Systeme wird prognostiziert. Liegt die bis zur nächsten Inspektion prognostizierte Alterung über einem bestimmten Grenzwert, so findet eine korrektive Instandhaltungsmaßnahme statt [Poz2004a].

Bei Teil- oder Totalausfällen von Anlagen oder Komponenten sind **außerplanmäßige (korrektive) Instandhaltungsmaßnahmen** notwendig, um den Sollzustand des Systems wiederherzustellen. Dabei wird eine Instandhaltungsmaßnahme allein als Reaktion auf einen Ausfall durchgeführt.

Der zeitliche Ablauf einer Instandsetzung kann dabei folgendermaßen untergliedert werden, s. Bild 4.5. Nach dem Auftreten des Fehlers bedarf es einer Zeitdauer  $T_D$  für die Diagnose der Fehlerart und speziell der Fehlerursache, um eine entsprechende Komponente reparieren oder auch tauschen zu können und weitere Fehler aufgrund der Ursache zu vermeiden. Falls das zu ersetzende Teil nicht vorrätig ist, werden Ersatzteile bestellt, deren Herstellung und Lieferung unter Umständen zu einer längeren Stillstandszeit führen können.

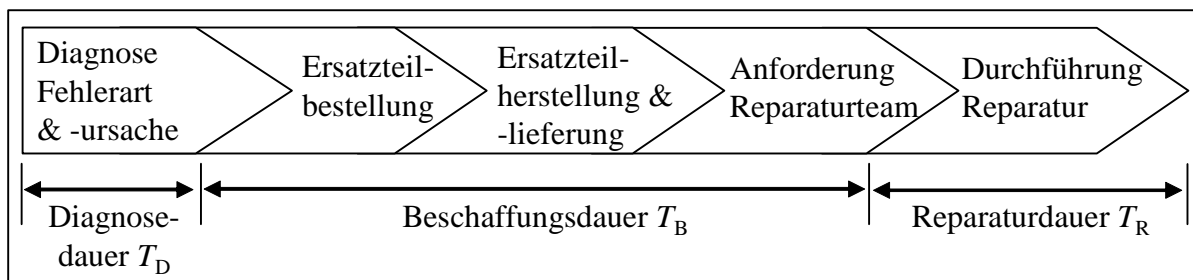


Bild 4.5: Zeitlicher Ablauf einer Instandsetzung

Ist das Ersatzteil geliefert und steht Instandhaltungspersonal nach dieser Beschaffungszeit  $T_B$  zur Verfügung, findet eine Reparatur statt. Erst nach dieser Reparaturdauer  $T_R$  und nach Justieren, Kalibrieren und Prüfen ist die Maschine wieder voll funktionsfähig [Man2003]. Die zeitlichen Attribute der Instandhaltung sind somit die Zeitdauer der Diagnose, die Beschaffungsdauer von Ersatzteilen und Personal sowie die Dauer der Reparatur.

Aus Umfragen bei produzierenden Unternehmen ging hervor, dass je nach Komponente unterschiedliche Instandhaltungsmaßnahmen eingesetzt werden [Tön1998]. Dominierten in früheren Jahren verstärkt korrektive Instandhaltungsmaßnahmen, so werden zunehmend planmäßige und zustandsorientierte Instandhaltungsmaßnahmen in den Unternehmen eingesetzt, um ungewollte Stillstandszeiten zu reduzieren, s. Bild 4.6.

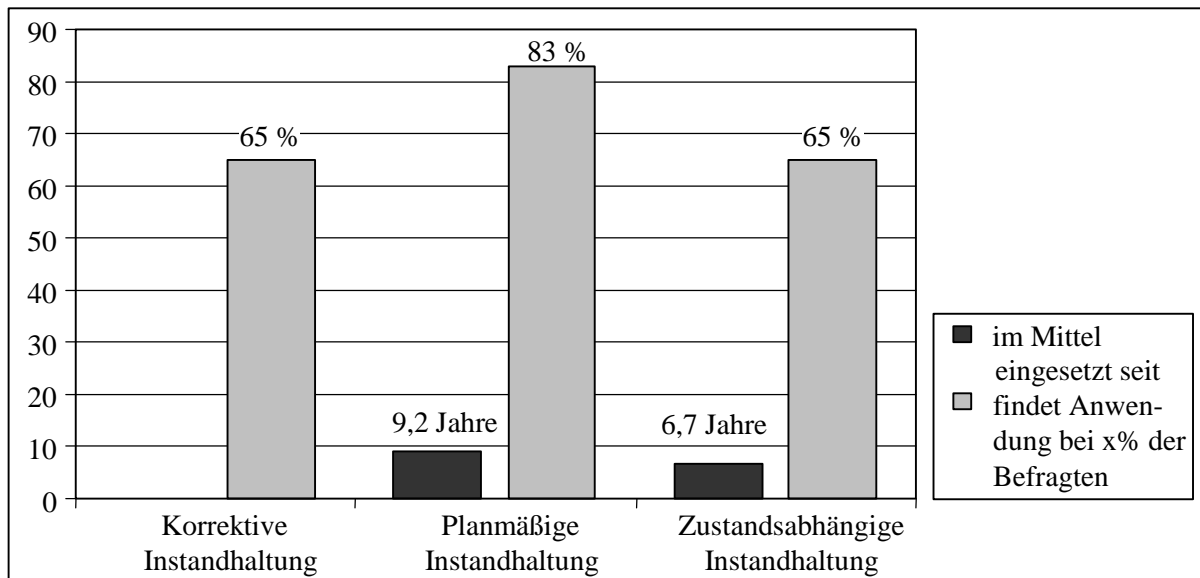


Bild 4.6: Einsatz verschiedener Instandhaltungsmaßnahmen WZL [Sch2006]

Neben den anzuwendenden Maßnahmen legt eine Instandhaltungsstrategie weitere Kenngrößen wie Inspektionsintervalle, Wartungsumfänge, Instandhaltungsprioritäten und Instandsetzungskapazitäten wie Anzahl und Qualifikation der Reparaturmannschaft, Ersatzteilbevorratung fest und bestimmt somit die Kosten, die aufgrund von Instandhaltungsmaßnahmen oder im Gegenzug durch Ausfälle entstehen. Die Kosten für die Instandhaltungsmaßnahmen und die Anlagenausfallkosten entwickeln sich dabei gegenläufig und die Festlegung der optimalen Instandhaltungsstrategie stellt das Ergebnis eines Zielkonflikts dar.

#### 4.2.4.4 Kosten

Neben den zuvor genannten Attributen können den Systemelementen bzw. dem Gesamtsystem als weiteres Attribut Kosten zugeordnet werden.

Bei den Kosten kann zwischen Einzel- und Gemeinkosten unterschieden werden [Fan2005]. Einzelkosten sind die Kosten, die einem Modellelement unmittelbar zugeordnet werden können. Im Gegensatz dazu entstehen Gemeinkosten für verschiedene Modellelemente gemeinsam. So können den einzelnen gefertigten Produkten direkt die zu Grunde liegenden Kosten für Werkstoffverbrauch im Einzelnen zugeordnet werden, hingegen können Kosten für Instandhaltungsmaßnahmen nicht unbedingt direkt zugeordnet werden. Die jeweilige Kosten können daher nicht allein den beweglichen sondern auch den statischen Elementen (s. Bild 4.3) zugeordnet werden, so dass die Reparaturkosten einer Maschine in diesem Fall als Einzelkosten des statischen Elements Bearbeitungsmaschine zugeordnet werden können.

Neben der Art der Verrechnung wird zudem zwischen variablen und fixen Kosten unterschieden. Die Höhe der fixen Kosten ändert sich im Gegensatz zu den variablen Kosten nicht mit der Anzahl der gefertigten Bauteile.

Je nach Art der verbrauchten Produktionsfaktoren entstehen dabei dann Kosten für Material, Kapitalbindung, Raum, Energie, Werkzeug, Lohn, Instandhaltung, Roh-, Hilfs-, und Betriebsstoffe [VDI2001].

Für die Ermittlung der anlaufenden Kosten wird zudem zwischen zeitdauerabhängigen und anzahlabhängigen Kosten unterschieden. Zeitdauerabhängige Kosten sind abhängig von der Zeitdauer eines bestimmten Zustandes oder Maßnahme, wie beispielsweise Kosten für Lohn. Anzahlabhängige Kosten hängen von der Anzahl bestimmter Ereignisse ab, wie die Kosten für Rohmaterial. Diese Kosten können entsprechend wieder den dynamischen oder statischen Elementen zugeordnet werden.

### 4.3 Bewertung einer Produktionsanlage

#### 4.3.1 Kennwerte

Um ein festgelegtes System mit einer anderen Variante zu vergleichen oder auch eine potentielle Verbesserungsmöglichkeit zu bewerten, bedarf es bestimmter Kennwerte. Für die Bewertung einer Anlage können verschiedene Kennwerte genutzt werden, wie sie beispielsweise im TPM angewandt werden [Alr1997]. Die gesamte Anlage kann beispielsweise über die Gesamtanlageneffektivität (engl.: Overall Equipment Effectiveness (*OEE*)) bewertet werden

$$OEE = \frac{t_{\text{geplant}} \cdot (n_{\text{gefertigt}} - A - NA)}{T_B} \quad (4.1)$$

mit  $t_{\text{geplant}}$  der geplanten Taktzeit multipliziert, mit  $n_{\text{gefertigt}}$  der gefertigten Anzahl an Bauteilen abzüglich des Ausschusses  $A$  und der Teile für die Nacharbeit  $NA$  bezogen auf die Planbelegungszeit  $T_B$ .

Weitere Kennwerte, die im Bereich der Produktion genutzt werden, sind die Durchlaufzeit der Bauteile, die gefertigte Stückzahl, der Durchsatz, die Auslastung oder die Verfügbarkeit der gesamten Anlage oder einzelner Maschinen [VDI2000b, VDI2002].

### 4.3.2 Kostenrechnung

Als weitere Möglichkeit der Anlagenbewertung besteht die Möglichkeit anlaufende Kosten für verschiedene Varianten oder verbesserte Anlagen für einen Vergleich zu nutzen [VDI2000b].

Zur Erfüllung der unterschiedlichen Fragestellungen der Kostenrechnung existiert eine Reihe von Kostenrechnungssystemen [Sch1998]. Sie lassen sich nach dem Zeitbezug der Kostengrößen und dem Ausmaß der Kostenverrechnung unterscheiden, d. h. ob alle Kosten (fix und variabel) oder nur ein Teil der Kosten (z. B. nur variable) auf die Kostenträger verrechnet werden. Dementsprechend wird zwischen Vollkostenrechnung und Teilkostenrechnung unterteilt [Ste2001].

Die Vollkostenrechnung wird untergliedert in die drei Teilgebiete Kostenartenrechnung, Kostenstellenrechnung und Kostenträgerrechnung.

#### 4.3.2.1 Kostenartenrechnung

Die Kostenartenrechnung stellt die Grundlage für die gesamte Kostenrechnung dar, d. h. ihre Ergebnisse gehen sowohl in die Kostenstellen- als auch in die Kostenträgerrechnung ein. Die Kostenartenrechnung gibt somit Auskunft darüber, welche Kosten in welcher Höhe in einer Periode angefallen sind. Die für diese Arbeit im Wesentlichen relevanten Kostenarten sind:

**Materialkosten:** Unter Materialkosten versteht man den bewerteten Verzehr an Rohstoffen (z. B. Blech für die Herstellung von Bandsägeblättern), Hilfsstoffen (z. B. Nägel, Schrauben) und Betriebsstoffen (z. B. Kühlmittel, Reinigungsmittel, Strom).

**Personalkosten:** Die Personalkosten beinhalten die Fertigungslöhne, die Hilfslöhne für Transport- und Lagerarbeiten und die Gehälter.

**Betriebsmittelkosten:** Zu dieser Kategorie gehören die kalkulatorischen Abschreibungen, die kalkulatorischen Zinsen, die Reparatur- und Instandhaltungskosten und sonstige Betriebsmittelkosten (z. B. Miete für Grundstücke und Gebäude) [Fan1999].

Die kalkulatorischen Zinsen stellen das kostenmäßige Äquivalent für die Kapitalbindung eines Unternehmens dar, d. h. sie messen den potentiellen Ertrag, den ein Kapitaleigner bei anderweitiger Anlage hätte erzielen können [Fan1999]. Für die Berechnung der kalkulatorischen Zinsen pro Jahr wird folgende Formel angewendet:

$$\text{Kalkulatorische Zinsen}/a = \text{Gebundenes Kapital} \cdot \text{Kalkulatorischer Zinssatz}/a . \quad (4.2)$$

#### 4.3.2.2 Kostenstellenrechnung

Die Kostenstellenrechnung ist eine Bereichsrechnung. Kostenstellen sind die Bereiche eines Betriebes, die überschaubar sind und in denen ähnliche Tätigkeiten ablaufen oder ähnliche Produkte entstehen.

#### 4.3.2.3 Kostenträgerrechnung

Die Kostenträgerrechnung ist eine Objektrechnung. Es werden sämtlichen Kosten einer Periode vollständig auf die Objekte (z. B. Erzeugniseinheiten), die in der Periode entstanden sind, verrechnet [Pli2002].

#### 4.3.2.4 Wiener Prozess

Für bestimmte Produkte bzw. Produktionsfaktoren bleiben die Kosten bzw. die möglichen Einnahmen nicht konstant, sondern der Marktpreis unterliegt bestimmten Schwankungen [Gag2001]. Diese Schwankungen werden in der Finanzwissenschaft mit Hilfe eines generalisierten Wiener Prozesses bzw. als Erweiterung dessen durch einen Ito Prozess beschrieben [Nef2004, Hul2006]. Ein Wiener Prozess ist ein zeitstetiger stochastischer Prozess mit normalverteilten, unabhängigen Zuwächsen und wird den Markovprozessen zugeordnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass der nächste zufällige Werte des Preises nur vom aktuellen Wert abhängt und die bisherige Preis-historie nicht mit berücksichtigt wird.

Die Preisentwicklung  $\Delta P$  in einem diskreten Zeitintervall  $\Delta t$  kann unter Berücksichtigung eines Ito Prozesses beschrieben werden durch [Hul2006]

$$\Delta P = \mu \cdot P \cdot \Delta t + \sigma \cdot P \cdot \chi \cdot \sqrt{\Delta t} . \quad (4.3)$$

Dabei beschreibt der erste Term  $\mu \cdot P \cdot \Delta t$  die Drift des Preises über der Zeit mit einer Driftrate von  $\mu$ . Der zweite Term  $\sigma \cdot P \cdot \chi \cdot \sqrt{\Delta t}$  stellt die Volatilität des Preises dar. In Bild 4.7 ist ein typischer Verlauf eines Preisprozesses beschrieben durch einen generalisierten Wiener Prozess dargestellt.



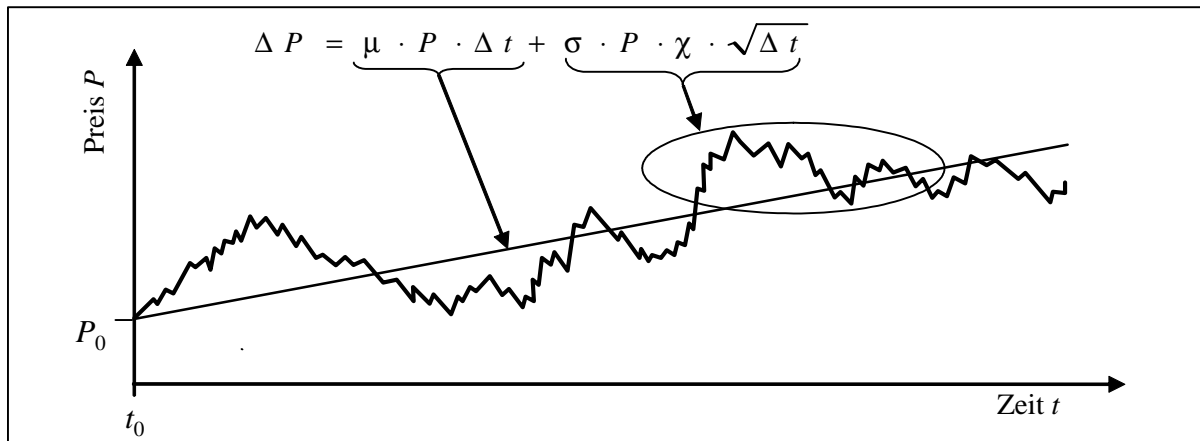


Bild 4.7: Generalisierter Wiener Prozess

### 4.3.3 Finanzielles Risiko

Werden Entscheidungen für oder gegen eine bestimmte Anlagenvariante oder auch eine bestimmte Instandhaltungsstrategie getroffen, so beinhaltet jede dieser Entscheidungen ein finanzielles Risiko. Studien, wie das St. Petersburger Spiel, zeigen, dass der Erwartungswert allein nicht als Grundlage für Entscheidungen genutzt wird, sondern dass der Erwartungswert durch andere Beurteilungsgrößen ersetzt wird [Ber1996].

Dabei besitzt die Haltung eines Entscheidungsträgers zum Risiko einen Einfluss auf die zu treffende Entscheidung [Kre1968]. So wird eine risikofreudige Person eher ein höheres Risiko in Kauf nehmen, um einen hohen Gewinn zu erzielen, als eine risikoaverse Person. In der Realität agiert die Mehrheit der Entscheidungsträger eher risikoavers, wie auch in den meisten Modellen der Portfolio-Selektion und betriebswirtschaftlichen Kapitaltheorie angenommen wird [Mar1959, Rud1979, Fra1988].

Daher ist es neben der Erwirtschaftung von möglichst hohem Gewinn durch Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Option – Reparatur oder Neukauf bzw. Anlagentyp A oder B – demnach ein weiteres Ziel, diesen Gewinn mit einem möglichst niedrigen Risiko zu erreichen. Dies kann bedeuten, dass eine Option, die einen geringeren Gewinn ausbringt bei einem geringen Risiko einer stärker risikobehafteten Option mit höheren Gewinnausbringungen dennoch vorgezogen wird [Smi2002].

Für das Treffen von Entscheidungen in einer solchen finanziellen Risikosituation benötigt demnach der Entscheidungsträger Angaben über die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten nicht erwünschter Zustände, die ein Risiko bedingen [Rom2002].

Allgemein können zweiseitige Risikomaße und einseitige Shortfall- bzw. Quantilmaße unterschieden werden. Zweiseitige Risikomaße beschreiben die Abweichung von einer Zielgröße, meistens dem Erwartungswert einer Verteilung. Als traditionelle Risikomaß

ist dabei die Varianz oder deren Quadratwurzel, die Standardabweichung, zu finden [Alb2001]. Sie bewerten das Ausmaß der Schwankung um den Erwartungswert  $E$  und vernachlässigen dabei die Schiefe der zu Grunde liegenden Verteilung. Daher werden sie auch als Volatilitätsmaße bezeichnet.

Hingegen befassen sich Shortfall- und Quantilmaße mit der Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Werten [Alb2003].

Shortfallrisikomaße betrachten die Über- bzw. die Unterschreitung einer vorgegebenen Zielgröße. Diese Zielgröße ist nicht mehr notwendigerweise der Erwartungswert der Verteilung. Shortfallmaße sind einseitige Risikomaße und deswegen nicht mehr so sehr von symmetrischen Verteilungsannahmen abhängig wie die zweiseitigen Risikomaße. Zu den Shortfallmaßen zählen die Shortfallwahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit der Unterschreitung des Zielwertes), der Shortfallerwartungswert (mittlere Höhe der Unterschreitung des Zielwertes) und die Shortfallstandardabweichung (Standardabweichung der Unterschreitung des Zielwertes).

Alternativ zu den Shortfallrisikomaßen können auch die Quantile einer Verteilung als Risikomaße genutzt werden [Sri2002]. Als Quantile einer Verteilung werden die Werte bezeichnet, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (1%, 5%, 10%,...) nicht unterschritten werden. Quantilrisikomaße bestimmen demnach den zu einer bestimmten Unter- bzw. Überschreitungswahrscheinlichkeit gehörigen Wert. Das  $\alpha$ -Quantil  $Q_\alpha$  einer Verteilung  $F(\bullet)$  mit einer existierenden Dichtefunktion (woraus folgt, dass  $F(x)$  streng monoton und invertierbar ist) ist die invertierte Verteilung  $F^{-1}(\alpha)$  (s. Bild 4.8)

$$Q_\alpha = F^{-1}(\alpha). \quad (4.4)$$

Das bekannteste dieser Risikomaße ist der Value at Risk ( $VaR$ ), der im Banken- und Versicherungswesen für die Risikosteuerung (insbesondere für die Festlegung der Kapitalunterlegung von Risiken) eingesetzt wird [Bas2006]. Der  $VaR$  zu einem gewählten Konfidenzniveau  $\alpha$  ist die Verlusthöhe, die mit der gewählten Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird. Damit entspricht der  $VaR$  genau dem  $(1 - \alpha)$ -Quantil der Verlustverteilung. Der  $VaR$  ist somit ein Risikomaß, das den theoretisch höchsten Schaden, der bei einem Prozess mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftreten könnte, beschreibt, denn in  $100 \cdot (1 - \alpha)$  % aller Fälle ist der Verlust kleiner oder gleich dem Wert.

$$VaR_\alpha(V) = F^{-1}(1 - \alpha). \quad (4.5)$$

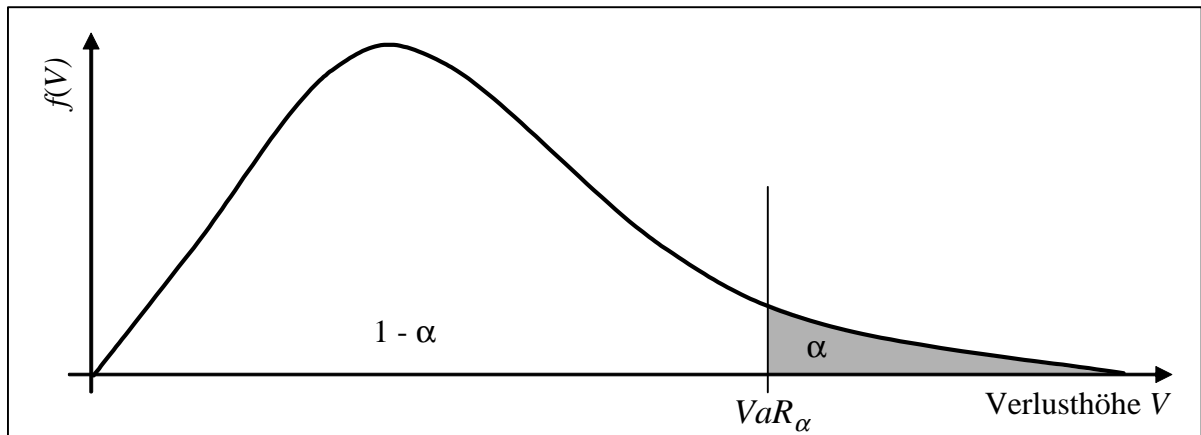


Bild 4.8: VaR eines Produktionssystems

Die Ermittlung des  $VaR$  ist die Umkehrung der Shortfallwahrscheinlichkeit. Bei der Shortfallwahrscheinlichkeit wird ein bestimmtes Ziel vorgegeben und die Höhe der Shortfallwahrscheinlichkeit ermittelt. Hingegen wird bei der Bestimmung des  $VaR$  die Höhe der Shortfallwahrscheinlichkeit festgesetzt und das Ziel der zugehörigen Zufallsgröße  $V$  ermittelt.

Um den Bereich der unerwünschten hohen Risiken mit zu berücksichtigen, existieren zwei weitere Risikomaße, die bewerten, wie hoch das mittlere Risiko innerhalb dieser Risikozone im Mittel ist.

Der Expected Shortfall ( $ES$ ) zum Konfidenzniveau  $\alpha$  ergibt sich als

$$ES_{\alpha}(V) = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} VaR_x(V) dx = \frac{1}{\alpha} \int_{1-\alpha}^1 F_x(V) dx. \quad (4.6)$$

Damit stellt der  $ES$  den Durchschnitt aller  $VaR_{\alpha}$  dar für  $0 \leq x \leq \alpha$ . Da der  $VaR$  als  $100 \cdot (1 - \alpha) \%$ -Maximalschaden interpretiert werden kann, entspricht damit der  $ES$  dem durchschnittlichen Schaden der  $100 \cdot \alpha \%$  Fälle [Ace2002].

Der Conditional Value at Risk ( $CVaR$ ) ergibt sich entsprechend als [Art1999]

$$CVaR_{\alpha}(V) = E[V|V > VaR_{\alpha}] = E[V|V > F_{1-\alpha}(V)]. \quad (4.7)$$

Handelt es sich bei der Verlustverteilung um eine stetige Verteilung, so fallen der  $CVaR$  und der  $ES$  aufeinander.

Diese Angabe des Risikos einer Anlage kann als Entscheidungsgrundlage für eine bestimmte Anlagenvariante, Fertigungsprogramm, Instandhaltungsstrategie usw. genutzt werden, indem für die Bewertungsgrößen, die in Abschn. 4.3.1 und 4.3.2 angegeben sind, wie die gefertigte Stückzahl, die  $OEE$  oder die Kosten der Anlage, ebenfalls das mit der Erreichung eines Zielwertes verbundene Risiko angegeben werden kann.

Die zuvor erläuterten Risikomaße stellen statistische Risikomaße dar, da sie bei ihrer Ermittlung neben den Eintrittshöhen die Wahrscheinlichkeiten des Eintritts bestimmter nicht erwünschter Ereignisse mit berücksichtigen. Ergänzend dazu können so genannte Worst-Case-Szenarien genutzt werden, um besonders ungünstige Entwicklungen zu untersuchen [Alb2001]. Bei verschiedenen voneinander abhängigen Eingangsgrößen beinhalten diese Worst-Case-Untersuchungen die Schwierigkeit, dass von vornherein nicht unbedingt klar ist, welche Parameterkombinationen zum ungünstigsten Ausgang führen und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieses Worst-Case vernachlässigt wird.

#### 4.3.4 Reparaturwürdigkeit

Zudem kann die Risikomaßtheorie als Grundlage für eine Aussage über den voraussichtlichen Nutzen der Reparatur einer Anlage oder von Anlagenteilen herangezogen werden. Die Entscheidung für oder gegen die Reparatur einer Maschine oder Anlage hängt stark von ihrem zukünftigen Ausfallverhalten sowie ihrer geplanten Einsatzdauer und der kommenden zu produzierenden Stückzahl ab [Jäg2006].

Ausgehend von der Situation des Ausfalls einer Fertigungsmaschine soll eine Entscheidung darüber getroffen werden, ob eine Reparatur in Höhe von 15.000 € lohnend ist oder ob es günstiger ist, eine andere Variante zu kaufen oder eventuell die Produktion sogar komplett zu verändern oder zu stoppen. Die zukünftig zu erwartende Lebensdauer ist kein konstanter Zeitraum sondern ein zufälliger Wert und kann für das folgende Beispiel mit Hilfe einer Weibullverteilung mit Formparameter  $b = 2$  und charakteristischer Lebensdauer  $T = 225$  Tage angegeben werden. Unter der Annahme, dass die Anlage einen Ertrag von 150 € pro Tag erwirtschaftet, hängt der zukünftige Ertrag der Anlage stark von dieser zukünftigen Lebensdauer ab.

Tritt der Fall ein, dass der Ertrag bis zum nächsten Ausfall, abzüglich aller Aufwendungen abgesehen von den Reparaturkosten, diesen Betrag der Reparaturkosten von 15.000 € übersteigt, so wäre diese Instandsetzung der Anlage als sinnvoll eingestuft worden. Sollte aber im anderen Fall dieser Ertrag geringer sein als die Reparaturkosten, so könnte die Reparatur der Anlage als unwirtschaftlich beurteilt werden. Da die Dauer bis zum nächsten Ausfall eine Zufallsgröße ist, werden daher zusätzliche Angaben benötigt, um diese Entscheidung fundiert zu treffen.

Wird allein der Mittelwert für die Entscheidungsfindung zu Grunde gelegt, so würde eine Entscheidung für die Durchführung der Reparatur fallen, da der Erwartungswert für einen Anlagenausfall 200 Tage beträgt und somit ein Ertrag von 20.000 € einem Einsatz von 15.000 € für eine Reparatur gegenüber steht. Da aber die Überlebensdauer der Maschine keine feste Größe ist und somit auch nicht direkt dem Erwartungswert

entspricht, kann es mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit sein, dass der Ausfall der Maschine vor der Amortisation der Anlage passiert. So kann ebenfalls der Fall auftreten, dass die Maschine bereits nach 60 Tagen ausfällt und dabei nur 6.000 € erwirtschaftet hat, s. Bild 4.9.

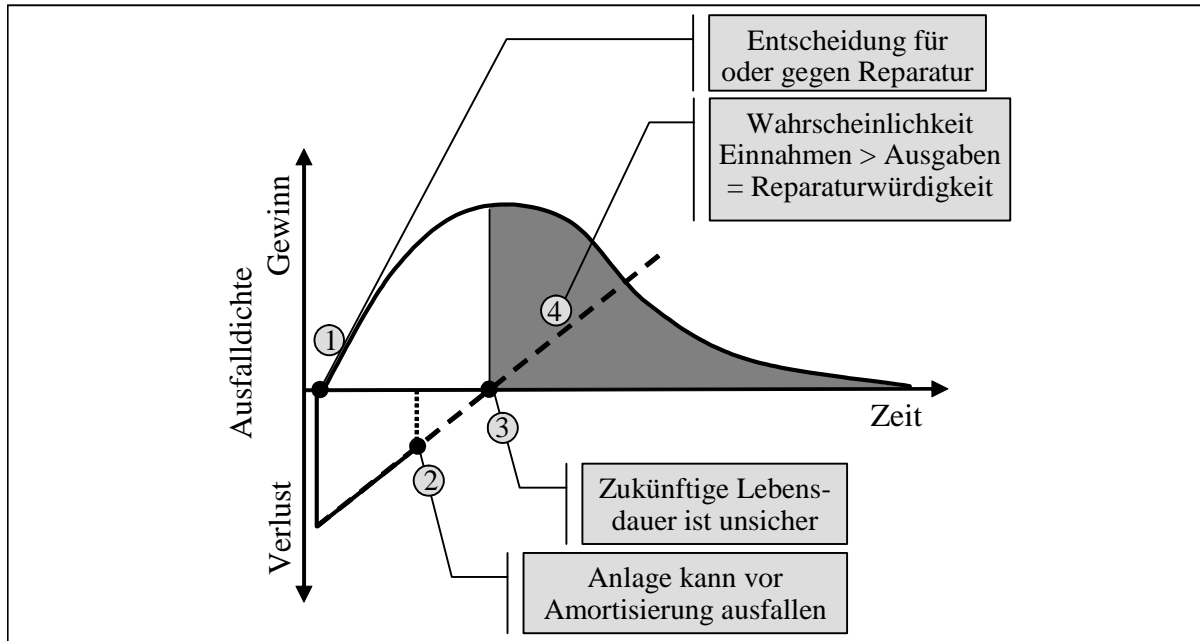


Bild 4.9: Konzept der Reparaturwürdigkeit

Daher ist es notwendig, ebenfalls die Wahrscheinlichkeit der Nichterreicherung einer vorgegebenen Zielgröße mit anzugeben, in diesem Fall, den Zeitpunkt von 150 Tagen zu überleben. Als Bewertungshilfe wird dafür die Reparaturwürdigkeit definiert als das Komplement der Shortfallwahrscheinlichkeit, das heißt, als die Wahrscheinlichkeit, dass die Kosten einer durchgeführten Reparatur innerhalb einer gewissen Zeit durch die Einnahmen von den zukünftig produzierten Produkten egalisiert werden. In diesem Beispiel ergibt sich damit die Reparaturwürdigkeit zu 64% bei einer Shortfallwahrscheinlichkeit von 36%.

Für dieses erste Beispiel wurde bislang die Vereinfachung getroffen, dass nur eine Amortisation bis zum ersten weiteren Ausfall betrachtet wurde. Allerdings kann auch der Fall eintreten, dass eine Amortisation der Anlage erst nach einer bestimmten Anzahl an weiteren kleineren Reparaturen erreicht wird, s. Bild 4.10.

Nach der ersten Reparatur tritt hier ein weiterer Fehler auf, bevor die Kosten der ersten Reparatur wieder egalisiert wurden. Dennoch kann es eine Entscheidung für eine Reparatur geben, da der Instandhalter „ziemlich sicher“ ist, dass über lange Sicht, nach mehreren weiteren kleineren Reparaturen, eine Amortisation der Anlage erreicht wurde und die Anlage wieder gewinnbringend arbeitet [Jäg2006].

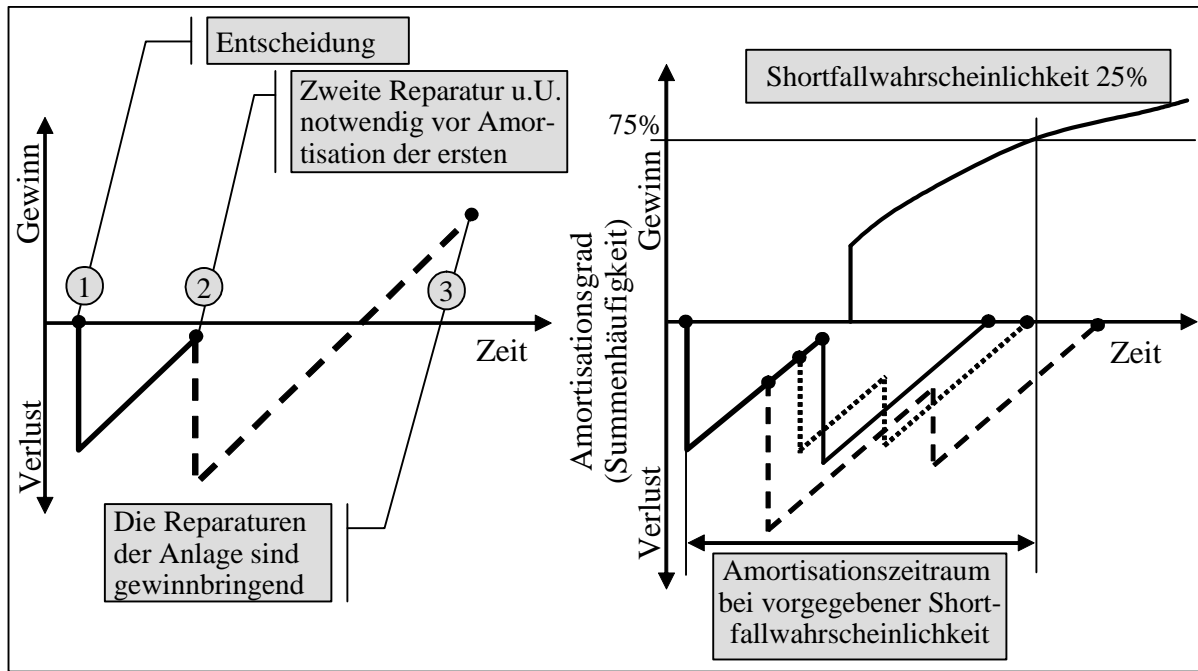


Bild 4.10: Amortisationsgrad

Um in diesen Fällen eine objektive Entscheidung zu treffen, kann zudem die Amortisationszeit der Reparatur bei einer bestimmten Shortfallwahrscheinlichkeit zu Grunde gelegt werden. Denn eine weitere Forderung der Entscheidungsträger ist es, die Amortisationszeit einer bestimmten Aktion so gering als möglich zu halten, damit negative Einflüsse wie Änderungen der Absatzmengen oder des Preises gemindert werden können. Dieser Grad der Amortisation ist in Bild 4.10 dargestellt. In diesem Beispiel wurde der Grad der Amortisation mit 75% vorgegeben, so dass nur in einem von vier Fällen die Amortisationszeit größer oder gleich der zugehörigen Amortisationszeit ist. Diese ermittelte Amortisationszeit entspricht dann wiederum dem Value at Risk aus Abschn. 4.3.3 [Lei1988].

## 5 Datenerfassung und -aufbereitung

Die Ergebnisse, die eine Analyse liefern kann, hängen stark von den zu Grunde liegenden Eingangsinformationen ab. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass diese für eine weitere Umsetzung im gegebenen Modell geeignet sind.

Die vier wichtigsten Informationsquellen sind [Ban1997, Mcn2000]:

**Kenntnis aus dem Umfeld des zu untersuchenden Problems über gewisse Eigenschaften, Bedingungen und Zusammenhänge.** Als Grundlage für Simulationsuntersuchungen können Informationen aus der Kenntnis über das Umfeld gewonnen werden. Diese Informationen können in dokumentierter Form oder als Erfahrungswissen bei Experten vorliegen. Der große Vorteil dieser Informationsquelle ist, dass sie außer bei komplett neuen Lösungen stets vorhanden ist und dadurch einen Ausgangspunkt für die Untersuchungen liefern kann. Von Nachteil ist hingegen, dass die Informationen häufig in nicht strukturierter Form vorliegen und durch die subjektive Wahrnehmung der Experten beeinflusst wird. Zudem können Experten in vielen Fällen nur stark streuenden Angaben machen. Die Schwierigkeit liegt bei dieser Art von Informationen darin, eine geeignete Fragestellung die Informationen zu erlangen, die für die Modellierung benötigt werden, ohne durch die Fragestellung die Aussage der Experten zu beeinflussen.

**Gesichertes Wissen aus praktisch bestätigten Theorien und verlässlichen Erfahrungen ähnlicher Systeme (Firmeneigene und allgemeine Datenbanken).** Für eine Prognose des Verhaltens eines neuen Systems kann in vielen Fällen das Wissen über ähnliche bereits bestehende Systeme genutzt werden. Bevor das Wissen übertragen werden kann, müssen zunächst die beiden Systeme hinsichtlich der Übertragbarkeit der Informationen untersucht werden [Hit2007]. Vorteil dieser Art von Daten ist, dass sie es bereits in der Planungsphase ermöglichen, Aussagen zu treffen, wenn nur begrenzte Informationen über das aktuelle Produkt bekannt sind. Allerdings kann die Ähnlichkeit der Produkte größere Abweichungen besitzen als geschätzt wurde, so dass in diesem Fall von unzureichenden Daten ausgegangen werden kann, falls keine Einschränkungen bei der Übertragung vorgenommen wurden [Kro2004].

**Gesichertes Wissen aus physikalischer Vorhersage (Berechnungen, Design Vorgaben, Computersimulationen, physikalische Modelle).** Sind in der Planungsphase bereits genaue Angaben, z. B. über die Dimensionierung der Systemelemente, vorhanden, so können für manche der Elemente Aussagen aus bekannten physikalischen Mo-

dellen oder Computersimulationen getroffen werden. Der Nachteil dieser Daten ist, dass nicht für alle Parameter des Systems die Möglichkeit besteht, diese allein über physikalische Vorhersagen zu beschreiben [Ber2004]. Zudem herrschen in vielen Fällen Unsicherheiten über die realen Belastungen, die die Systemelemente während ihres operativen Einsatzes erfahren werden [Mai2004].

### **Empirisch bzw. experimentell ermittelte Ergebnisse aus Tests oder Feldeinsatz.**

Existiert das zu untersuchende System bereits in der Realität, so können Daten aus System- oder Komponententests bzw. aus dem operativen Einsatz des Systems gewonnen werden. Diese Daten beschreiben das reale Systemverhalten am besten, können allerdings erst in späten Phasen des Produktlebenszyklus genutzt werden. Zudem besteht in vielen Fällen die Schwierigkeit aus einer großen Menge an vorhandenen Daten, die für die jeweilige Anwendung wichtigen zu filtern.

Die Informationen der zuvor erläuterten Quellen dienen zum einen der Aufstellung der Modellstruktur – der logischen Abfolge und Zusammenhänge der zu Grunde liegenden Zustände und Zustandsübergänge. Als Eingangsinformationen bedarf es dafür der auftretenden Zustände, der möglichen Zustandsübergänge und deren Zusammenhänge und Abhängigkeiten. Zum anderen werden diese Informationsquellen benötigt, um neben dem strukturellen Aufbau des Systems ebenfalls die zugehörigen Parameter zu definieren. Für die Abbildung der zeitlichen oder auch dynamischen Aspekte werden deterministische Zeitdauern oder auch stochastische Verteilungsparameter benötigt, um das Verhalten einer Anlage realitätsnah beschreiben zu können. Gängige Verteilungsparameter sind beispielsweise Fertigungsdauern, Transportdauern, Reparaturdauern, Ausfallzeiten usw..

Diese Informationen und Daten werden zu unterschiedlichen Zeiten des Anlagenlebenszyklus zugänglich, s. Bild 5.1. Die zu den jeweiligen Zeitpunkten zugängigen Informationen sind grau hinterlegt dargestellt und lassen sich den zuvor genannten vier Informationsquellen zuordnen. Dabei ist zu beachten, dass die verschiedenen Informationen und Daten jeweils so aufbereitet werden müssen, dass sie für die Simulationsuntersuchungen für die Anlagenplanung oder in späteren Phasen für die Bestimmung des realen Systemverhaltens genutzt werden können. Wie diese Datenaufbereitung in Abhängigkeit der Datenherkunft aussieht, wird nachfolgend beschrieben. Zudem können die Art und Qualität der Daten und Informationen stark differieren. Um die Datenbasis mit dem Fortschritt des Produktlebenszyklus zunehmend zu verbessern, sollten diese unterschiedlichen Informationsquellen miteinander kombiniert werden, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben wird. Neben der ständigen Aktualisierung der Daten und Informationen ist es von Vorteil, diese Informationen über eine Datenbank in die Entwicklung neuer Anlagen mit einfließen zu lassen.



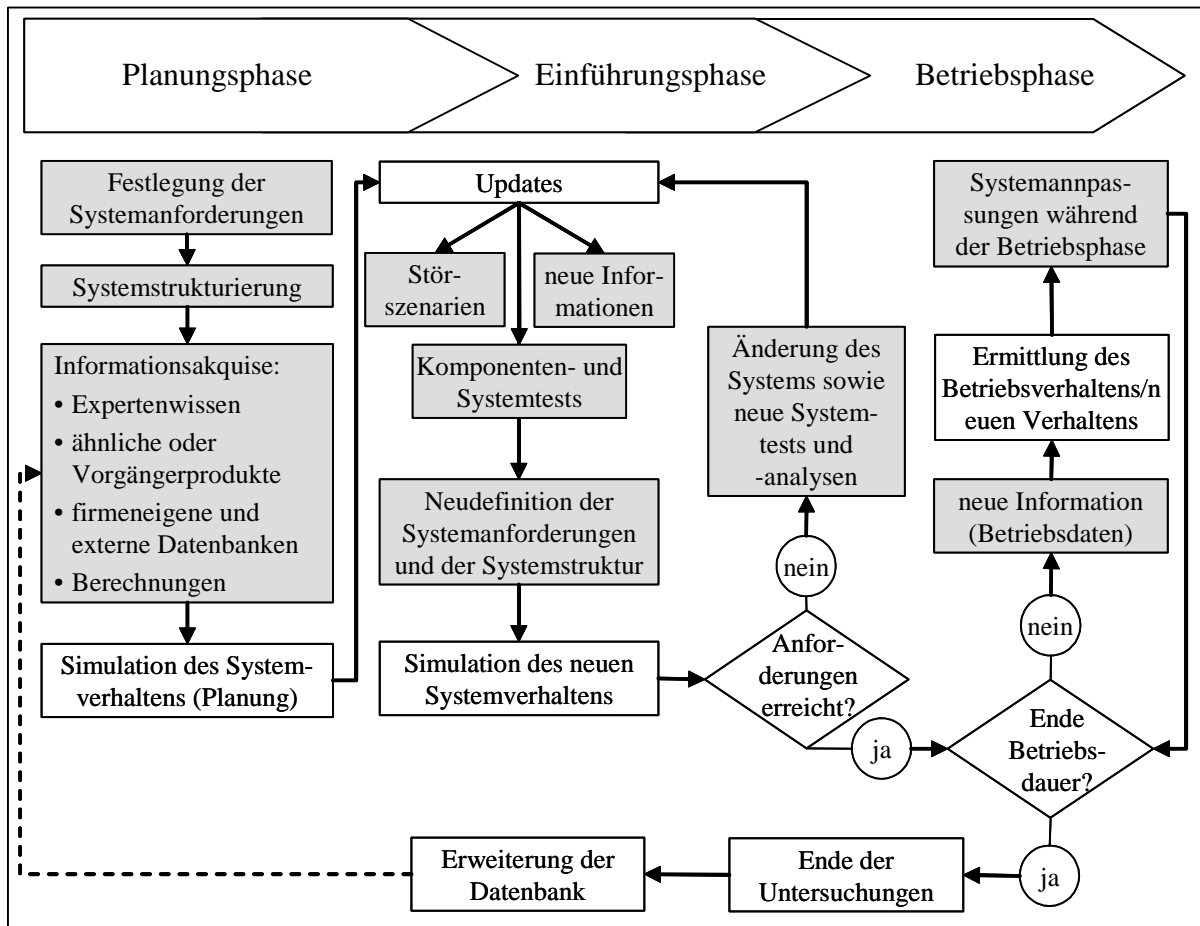


Bild 5.1: Datenaufbereitung und Nutzung während des Produktlebenszyklus (modifiziert nach [Boo2000])

## 5.1 Unscharfe Daten

Die zuvor genannten Informationsquellen können mit Unsicherheiten behaftet sein. Im Allgemeinen werden dabei zwei verschiedene Arten der Informationsunschärfe unterschieden [Ban1997]. Zum einen stammt diese Unschärfe aus der inhärenten Streuung des Verhaltens des physikalischen Systems (aleatorische Unsicherheit). Zum anderen kann die Unsicherheit über die Systemparameter aus einem Mangel an Kenntnis über das System stammen (epistemische Unsicherheit), z. B. falls keine oder nur wenig experimentelle Ergebnisse über das Systemverhalten existieren oder falls sich der zu Grunde liegende physikalische Prozess nur unzureichend beschreiben lässt. Dies tritt speziell auch während der Planungsphase einer Anlage auf, da noch keine Test- oder Betriebsdaten über die neu zu gestaltende Anlage vorhanden sind.

In der Planungsphase können jedoch bereits Informationen aus drei zuvor genannten Arten von Informationsquellen genutzt werden: aus Kenntnis aus dem Umfeld des zu untersuchen Problems über gewisse Eigenschaften, Bedingungen und Zusammenhänge (z. B. Expertenwissen), aus gesichertem Wissen aus physikalischer Vorhersage (z. B. Berechnungen) sowie aus gesichertem Wissen aus praktisch bestätigten Theorien und

verlässlichen Erfahrungen ähnlicher Systeme (z. B. Datenbanken). Jede dieser Quellen kann unterschiedliche Arten der Informationen liefern, deren inhärente Informationsschärfe jeweils berücksichtigt werden muss.

### 5.1.1 Mathematische Beschreibung unsicherer Daten

Die mit Unsicherheiten behafteten Parameter können über Intervalle beschrieben werden. Dafür existieren zwei verschiedene Möglichkeiten.

Die erste Möglichkeit stellt die Beschreibung über Konfidenzintervalle dar. Dabei werden zwei Funktionen  $U(\bullet)$  und  $O(\bullet)$  gesucht, für die gilt:

$$Pr[U(\bullet) \leq \theta \leq O(\bullet)] = 1 - \gamma. \quad (5.1)$$

Dies bedeutet, die Wahrscheinlichkeit, dass der Wert des Parameters  $\theta$  im Intervall  $[U(\bullet), O(\bullet)]$  liegt, beträgt  $(1 - \gamma)$ . Bevor Daten zugänglich sind, beträgt die Wahrscheinlichkeit  $(1 - \gamma)$ , dass die Daten ein Intervall  $[U(\bullet), O(\bullet)]$  ergeben, das den unbekannt Parameter  $\theta$  enthält. Liegen Daten vor, so ergeben die beiden Funktionen  $U(\bullet)$  und  $O(\bullet)$  zwei konstante Werte  $U$  und  $O$ . Da nun der Wert von  $\theta$  entweder innerhalb oder außerhalb des Intervalls zwischen den beiden Konstanten  $[U, O]$  liegen kann, wird von einem Vertrauen (Konfidenz) von  $(1 - \gamma) \cdot 100\%$  in das Intervall gesprochen. Das Intervall wird als das zweiseitige Konfidenzintervall mit dem Konfidenzniveau  $(1 - \gamma) \cdot 100\%$  bezeichnet.

Diese Beschreibung wird in der Zuverlässigkeitstechnik bei der Ermittlung und Angabe der Vertrauensbereiche von Verteilungsparametern verwendet [Ber2004].

Bei der Beschreibung des Parameters über Konfidenzintervalle wird davon ausgegangen, dass der Parameter  $\theta$  eine unbekannte Konstante ist. Hingegen wird bei der Beschreibung des Parameters über Wahrscheinlichkeitsintervalle ein anderer Ansatz gewählt. Dabei wird der Parameter  $\theta$  nicht als unbekannt angesehen, sondern als stochastische verteilt gemäß einer Verteilung  $g(x)$  mit dem  $(1 - \gamma) \cdot 100\%$  Wahrscheinlichkeitsintervall.

$$Pr(x_1 \leq \theta \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} g(x) dx = 1 - \gamma. \quad (5.2)$$

Das zweite Vorgehen wird nachfolgend weiter verwendet, da im beschriebenen Vorgehen die Verteilung des Parameters und nicht allein der obere und untere konstante Grenzwert des Parameters berücksichtigt wird [Mar1982].

### 5.1.2 Expertenwissen

Expertenwissen ist der Ausdruck einer sachkundigen Meinung, die auf Wissen und Erfahrung basiert, die Experten bezüglich eines technischen Problems haben [Ort1991]. Experten sind in diesem Zusammenhang Einzelpersonen, die ein fundiertes Wissen und Erfahrung bezüglich einer bestimmten Fragestellung besitzen [Ayy2000]. Das Wissen dieser Experten wird bereits in verschiedenen Feldern genutzt unter anderem auch im Bereich der Ökonomie und der Risikoanalyse [Coo1991].

Informationen und Daten aus Expertenwissen besitzen bestimmte charakteristische Eigenschaften. Die Aussagen des Experten sind abhängig von dem Prozess der Datengewinnung. Wird beispielsweise das Gesamtproblem in Teilaspekte zerlegt und Informationen zu diesen abgefragt, so kann die Auswahl der Teilaspekte die Expertenaussage bereits beeinflussen [Mey1991]. Zudem sind die Aussagen der Experten abhängig von der Art, wie das Wissen erlangt wurde, den Informationen, die der Experte berücksichtigt, der Art und Weise wie der Experte Probleme löst [Boo1988], der Erfahrung des Experten, der Einstellung des Experten (optimistische oder pessimistische Einschätzungen) usw.. Es ist dabei nicht wie bei anderen Datenquellen unbedingt von Vorteil möglichst viele Experten zu befragen. Hingegen kann es sinnvoll sein, wenige Experten mit fundiertem Wissen zu interviewen anstatt vieler Personen, die u. U. nicht ganz so viel Wissen und Erfahrung zu der Fragestellung besitzen [Hüb2000].

Das Wissen der Experten ist in den meisten Fällen mit Unsicherheiten behaftet und zunächst nur implizit vorhanden. Um dieses unsichere Wissen explizit zugänglich zu machen, können verschiedene formale Verfahren genutzt werden, die von der Art des Wissens der Experten abhängen. Zum einen können Experten ihr Wissen in qualitativer Form als textuelle Beschreibung ihrer Kenntnisse und Erfahrungen angeben bzw. kann es mit Hilfe verschiedener Verfahren und Methoden wie FMEA, FTA, Programmablaufpläne usw. strukturiert abgefragt werden. Das Expertenwissen kann zum anderen in quantitativer Form ausgedrückt werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn es dem Experten möglich ist, eine Funktion der Häufigkeit des Auftretens des Problems grob zu skizzieren oder bestimmte Momente der Verteilung bzw. deren Parameter oder auch Quantile anzugeben.

Im Fall, dass die Experten entsprechende Kenntnisse besitzen, können Experten die Dichte des erfragten Parameters zeichnen, s. Bild 5.2 [Boo1988]. Dieser Dichte kann wiederum eine Verteilungsfunktion zur Beschreibung der Unsicherheiten angepasst werden. Diese Art der Experteninformation wird nur in solchen Fällen möglich sein, in denen der Experte bereits Erfahrung mit Wahrscheinlichkeiten gemacht hat und sich die Parameter direkt bestimmten Beobachtungen zuordnen lassen; wie z. B. bei der Exponentialverteilung, bei der die Ausfallrate dem Kehrwert des Erwartungswertes entspricht.

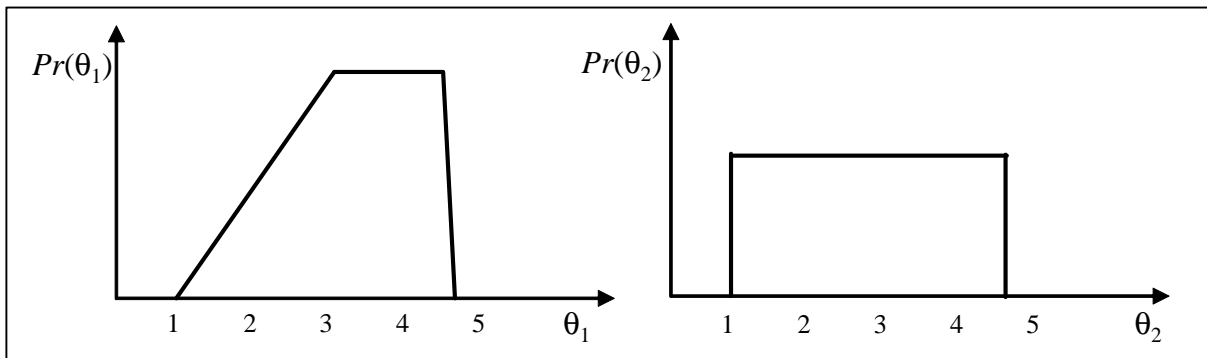


Bild 5.2: Skizze einer möglichen Expertenbewertung

Ebenso fällt es Experten oftmals schwer, die Momente einer Verteilung direkt zu bestimmen. Der Mittelwert kann von Experten teilweise eingeschätzt werden, jedoch ist es kaum möglich, dass die Experten die Standardabweichung einer bestimmten Größe direkt vorgeben können.

Dass Experten die Parameter mit Unsicherheitsbändern direkt angeben können, ist zudem allein in den Fällen möglich, bei denen die Parameter eine bestimmte Bedeutung besitzen wie z. B. bei der Betaverteilung, bei der der erste Parameter für die Anzahl erfolgreicher und der zweite Parameter für die Anzahl fehlerhafter Ereignisse steht.

Experten können allerdings in vielen Fällen Verteilungen über bestimmte Quantile beschreiben. Werden sie nach dem wahrscheinlichsten Wert oder nach der besten Schätzung für einen Parameter befragt, so zeigen verschiedene Studien [Mey1991], dass der Mittelwert, der von Experten angegeben wird, häufig der Median der Verteilung ist.

Zudem können von den Experten Aussagen über die schlechteste und beste Einschätzung gewonnen werden. Diese Werte repräsentieren die minimalen und maximalen Werte des Parameters. Die Unsicherheiten über die angegebenen Werte werden allerdings in den meisten Fällen von den Experten unterschätzt [Coo1991, Mey1991], so dass diese minimalen und maximalen Angaben mit kleinen Quantilen gleichgesetzt werden können. Für die Wahrscheinlichkeit  $Pr_0$ , dass der tatsächliche Wert zwischen oberer und unterer Grenze liegt, können nach [Mar1982] Werte von 95%, 90% oder auch 80% angenommen werden. Wird davon ausgegangen, dass 90% aller Möglichkeiten zwischen der oberen und unteren Grenze des Experten liegen, so können dann [Mar1982] der minimale Wert mit dem 5%-Quantil und der maximale mit dem 95%-Quantil gleichgesetzt werden. Dies soll anhand eines Beispiels verdeutlicht werden.

Für den  $MTTF$  eines exponentialverteilten Zustandsübergangs, und somit für den Parameter  $\lambda$ , gibt der Experte folgende Werte an:

$$\text{Mittelwert} \quad MTTF_{\text{median}} = 22 \text{ h} ; \quad \lambda_{\text{median}} = 0,045 \frac{1}{\text{h}}$$

$$\text{Obere Grenze des Mittelwertes} \quad MTTF_o = 35 \text{ h} ; \quad \lambda_o = 0,029 \frac{1}{\text{h}}$$

$$\text{Untere Grenze des Mittelwertes} \quad MTTF_u = 15 \text{ h} ; \quad \lambda_u = 0,067 \frac{1}{\text{h}}$$

Wird davon ausgegangen, dass der Aussage des Experten ein Vertrauensbereich von  $Pr_0 = 90\%$  zugeordnet werden kann, so gilt:

$$\int_{\lambda_u}^{\lambda_o} g(\lambda) d\lambda = 0,9 . \quad (5.3)$$

Damit kann diese Aussage des Experten über den Parameter  $\lambda$  mit Hilfe einer Gammaverteilung dargestellt werden mit den Parametern  $\alpha = 15,86$  und  $\beta = 2,92 \cdot 10^{-3}$ . Die Ermittlung dieser Parameter kann z. B. durch eine Anpassung im Programm Excel erfolgen [Mar1982]. Die zugehörige Dichtefunktion des Parameters  $\lambda$  ist in Bild 5.3 zu sehen.

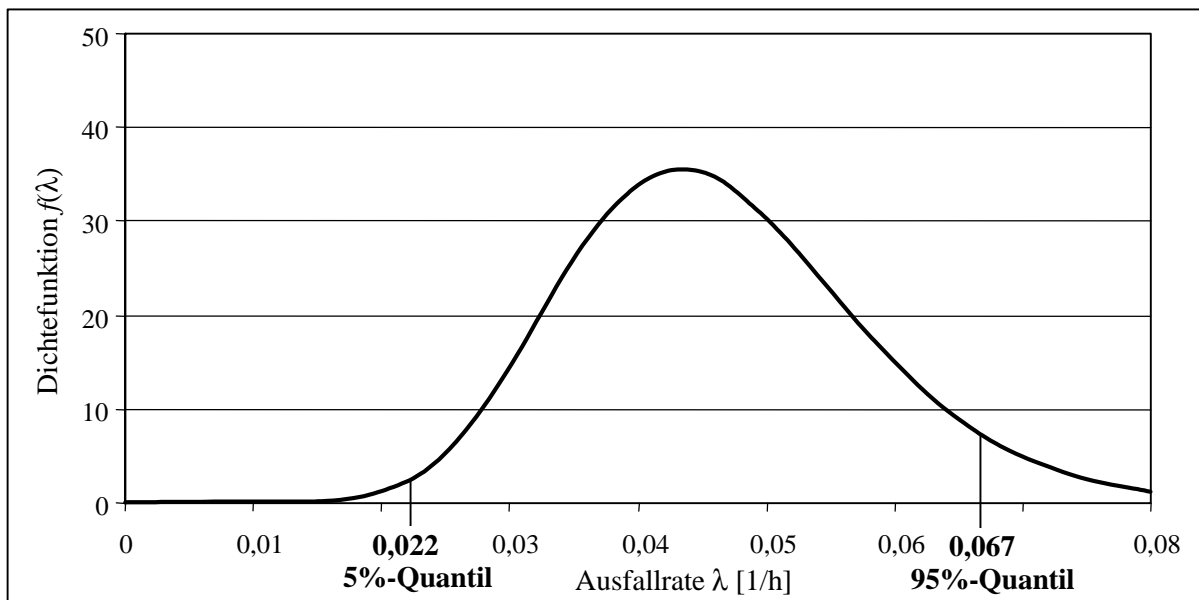


Bild 5.3: Dichtefunktion des Parameters  $\lambda$

In Fällen, bei denen mehrparametrische Verteilungen (z. B. zweiparametrische Weibullverteilung) einem bestimmten Zustandsübergang zu Grunde liegen, können die Verteilungsparameter und deren Streuung nicht direkt bestimmt werden. Um mehrere Parameter zu bestimmen, ist es nicht allein möglich den Mittelwert zwischen zwei beo-

bachteten Übergängen zu nutzen, sondern es müssen weitere Angaben erfragt werden, wie der geringste beobachtete Wert und der größte beobachtete Wert.

Dies soll nachfolgend an einem Beispiel verdeutlicht werden. Wie in einer Fallstudie von *Jäger* zu finden war [Jäg2004], können Experten zum Beispiel von Ausfallzeiten obere und untere Beobachtungswerte mit Streubändern angeben. Beispielhaft konnte eine Aussage über beobachtete Ausfälle einer Fertigungseinrichtung folgendermaßen formuliert sein:

Kürzeste beobachtete Lebensdauer: 4 bis 8 Monate

Längste beobachtete Lebensdauer: 50 bis 54 Monate

Mittlere beobachtete Lebensdauer: 22 bis 26 Monate

Iterativ wurden die Wertepaare  $b$ ,  $T$  ermittelt, für die das 5%-Quantil zwischen 4 und 8 Monaten, der Median zwischen 22 und 26 Monaten und das 95%-Quantil zwischen 50 und 54 Monaten lag. Die Grenzkurven dieser Wertepaare sind in Bild 5.4 dargestellt. Alle Wertepaare, die innerhalb der durchgezogenen und der gestrichelten Kurven liegen, erfüllen die zuvor genannten Bedingungen.

Für eine nachfolgende Betrachtung können entsprechend entweder die Grenzwerte der Parameter, die streuenden Parameter in Form von Verteilungsfunktionen oder zufällige  $b$  und  $T$ -Wertepaare eingesetzt werden, die die oben genannten Bedingungen erfüllen.

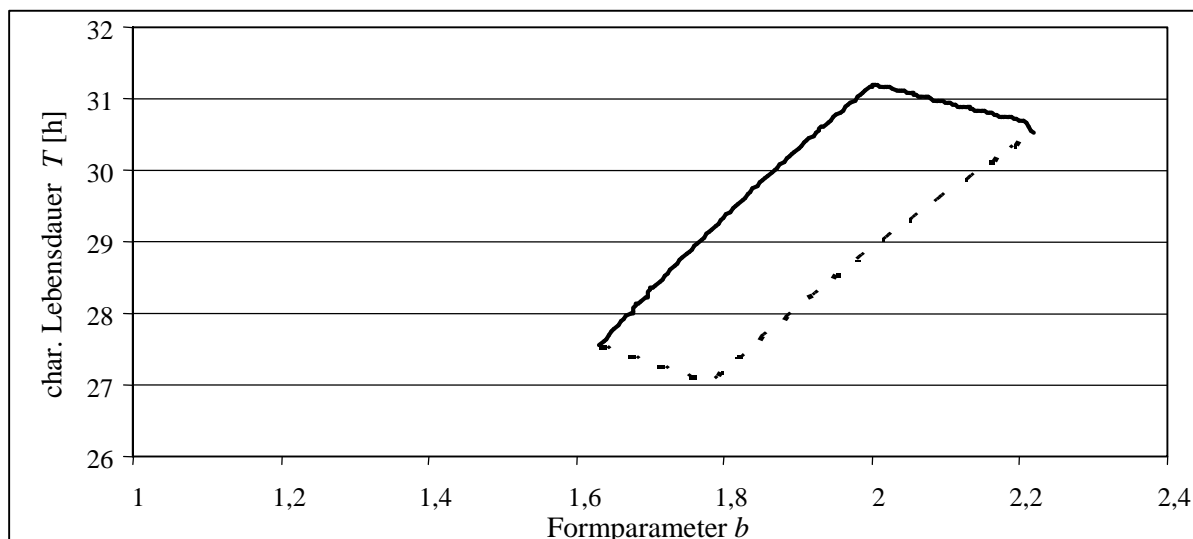


Bild 5.4: Bereich der unscharfen Weibullparameter

Sind die Experten mit Zuverlässigkeitsanalysen vertraut und kennen das Ausfallverhalten ihres Produktes, so beschreibt *Lyonnnet*, dass die Experten zum Beispiel für den Formparameter  $b$  oder die charakteristische Lebensdauer  $T$  einer Weibullverteilung sogar direkt Streubänder angeben können [Lyo2001].

Allerdings ist bei allen Expertenaussagen, gleich welcher Art, zu beachten, dass Experten dazu tendieren, ihre Unsicherheiten zu unterschätzen und die Aussagen stark von ihrer subjektiven Einstellung abhängen. Daher ist es schwierig, Aussagen von Experten als Absolutwerte für Prognosen zu verwenden. Allerdings stellen diese Aussagen eine gute Grundlage dar, um Vergleiche zwischen Varianten durchzuführen.

### **5.1.3 Datenbanken, Herstellerangaben und ähnliche Produkte**

Ähnliche Produkte bzw. Vorgängerprodukte stellen eine weitere Basis zur Datenerhebung dar, da die meisten Entwicklungen auf vorherigen Entwicklungen aufbauen. Allerdings ist in diesem Zusammenhang zu beachten, dass sich das Verhalten des Bezugsproduktes nicht unbedingt komplett mit dem des neuen Produktes deckt. Daraus resultieren Unsicherheiten über die Übertragbarkeit des Vorwissens auf Neuentwicklungen [Mar1982, Kro2004]. Diese Unsicherheiten bei der Übertragbarkeit führen wiederum zu Unsicherheiten über die tatsächlichen Parameter, die das Ausfallverhalten oder den Produktionsprozess beschreiben.

Neben ähnlichen Produkten bieten auch Datenbanken die Möglichkeit, Anhaltswerte für das Verhalten der Systeme zu finden. Diese Datenbanken gehen zum Teil – wie z. B. [NPR1995, EPR1997, FMD1997, IEC2004] – von Basiswerten aus, die sich dann auf das, für die vorliegende Belastung angepasste, Verhalten umrechnen lassen. Für die Basiswerte sind ebenfalls Streubereiche angegeben, ebenso wie sich in den meisten Fällen Streubereiche für die Einsatzparameter ergeben. Daher stellen die Ergebnisse dieser Datenbanken einen mit Unsicherheiten behafteten Anhaltswert dar.

### **5.1.4 Berechnungen**

Lebensdauerberechnungen basieren auf der Kombination anliegender Belastungen mit den Belastungen, die das Material ertragen kann. Diese Kombination kann im mechanischen Bereich auf Basis verschiedener Schadensakkumulationshypothesen bzw. verschiedener Schädigungsmodelle (z. B. Arrhenius-Modell, Coffin-Manson-Modell) erfolgen. Die Voraussetzung für die Anwendung dieser Modelle ist, dass die beiden zuvor genannten Informationen vorhanden sind: welche Art der Belastung liegt wann in welcher Höhe an und welche Belastung kann das Material in welcher Höhe ertragen.

Ist eine dieser Informationen nicht genau bekannt, so führt dies dazu, dass die Ergebnisse der Berechnung mit Unsicherheiten behaftet sind und somit ähnlich wie das Wissen der Experten mit Streubändern angegeben werden [Mai2004].

## 5.2 Kombination der Daten

Für die Kombination der unterschiedlichen Informationsquellen stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, von denen drei im Folgenden näher vorgestellt werden. Durch diese Kombination können diese verschiedenen Quellen zu einer Gesamtaussage kombiniert werden.

### 5.2.1 Medianbildung

*Lyonnet* [Lyo2001] stellt ein Verfahren vor, um Informationen verschiedener Expertenaussagen über Mittelung zu bilden. Grundlage dieses Verfahrens ist, dass Experten Parameter und Werte innerhalb von bestimmten Streubändern angeben können, aufgrund von Erfahrungen, die sie während des Betriebs der Anlage gesammelt haben.

Dies soll hier anhand einer Abschätzung des *MTTF* des Ausfallverhaltens einer Maschine aufgezeigt werden. In Tabelle 5.1 sind beispielhaft die verschiedenen Streubänder der Schätzungen der Experten, der Angaben aus Berechnungen bzw. Simulationen und einem Vorversuch mit zehn geprüften und ausgefallenen Einheiten für den Erwartungswert der Ausfälle *MTTF* angegeben. Allen Angaben wurde ein Vertrauensbereich von 90% hinterlegt.

Tabelle 5.1: Angaben verschiedener Quellen über Weibullparameter

Ex- perten	<i>MTTF</i> [h]	$\lambda$ [ $\cdot 10^{-2}$ 1/h]	Berech- nungen	<i>MTTF</i> [h]	$\lambda$ [ $\cdot 10^{-2}$ 1/h]	Ver- such	<i>MTTF</i> [h]	$\lambda$ [ $\cdot 10^{-2}$ 1/h]
1	20 – 40	2,5 – 5,0	5	20 – 40	2,5 – 5,0	8	19 – 55	1,8 – 5,3
2	30 – 50	2,0 – 3,3	6	20 – 35	2,9 – 5,0			
3	15 – 35	2,9 – 6,7	7	25 – 40	2,5 – 4,0			
4	20 – 45	2,2 – 5,0						

Von *Lyonnet* wird vorgeschlagen, als beste Schätzung der Experten für den unteren Grenzwert des Parameters den Median für der unteren Grenzwerte zu bestimmen, ebenso ergibt sich der obere Grenzwert des Parameterwertes aus dem Median der oberen Angaben der Experten, Berechnungen und Versuche [Lyo2001].

Dafür werden die Angaben der unteren Grenzwerte der Größe nach sortiert und in diesem Beispiel der Wert zwischen dem viert- und fünftniedrigsten Werte als Median der unteren Grenzwerte ermittelt. Somit ergibt sich für den Median der untere Grenzwerte  $MTTF_{\min} = 20$  h bzw.  $\lambda_{\max} = 0,05$  1/h. Für den Median der oberen Grenzwerte ergibt sich entsprechend  $MTTF_{\max} = 40$  h bzw.  $\lambda_{\min} = 0,025$  1/h. Diese Abschätzung kann für Randwertbetrachtungen genutzt werden oder um diese kombinierten Informationen in Form einer Gleichverteilung weiter zu verarbeiten.



### 5.2.2 Mittelung (BLUE)

Eine weitere Möglichkeit zur Informationskombination stellt die Mittelung der kompletten Angaben (Verteilung des Parameters) der unterschiedlichen Informationsquellen dar. Ausgehend von den in Tabelle 5.2 angegebenen Grenzwerten ergeben sich die in Bild 5.5 dargestellten Gammaverteilungen, wenn den Grenzwerten jeweils das 5%- bzw. 95%-Quantil der Gammaverteilung zugeordnet wurde. Die Parameter der Gammaverteilungen für die einzelnen Informationsquellen über den Parameters  $\lambda$  ergeben sich zu:

Tabelle 5.2: Parameter der beschreibenden Gammaverteilungen zu Tabelle 5.1

Experten	$a$	$b$ [ $\cdot 10^{-3}$ ]	Berechnungen	$a$	$b$ [ $\cdot 10^{-3}$ ]	Versuch	$a$	$b$ [ $\cdot 10^{-3}$ ]
1	22,95	1,60	5	22,95	2,11	8	9,7	3,46
2	43,58	0,60	6	36,87	1,10			
3	15,85	2,92	7	49,43	0,65			
4	16,47	2,11						

Falls keine weiteren Informationen vorhanden sind und alle Informationsquellen als gleichwertig eingestuft werden, so ergibt sich die Gesamtinformation als ungewichtetes Mittel der Einzelangaben, s. Bild 5.5. Die Vorgehensweise der Ermittlung der zugehörigen Verteilungsfunktionen sowie der Mittelung ist in [McN2000] genauer ausgeführt. Die ungewichtete gemittelte Gesamtverteilung lässt sich durch eine Gammaverteilung mit den Parametern  $a = 15,41$  und  $b = 2,30 \cdot 10^{-3}$  beschreiben, s. Bild 5.5.

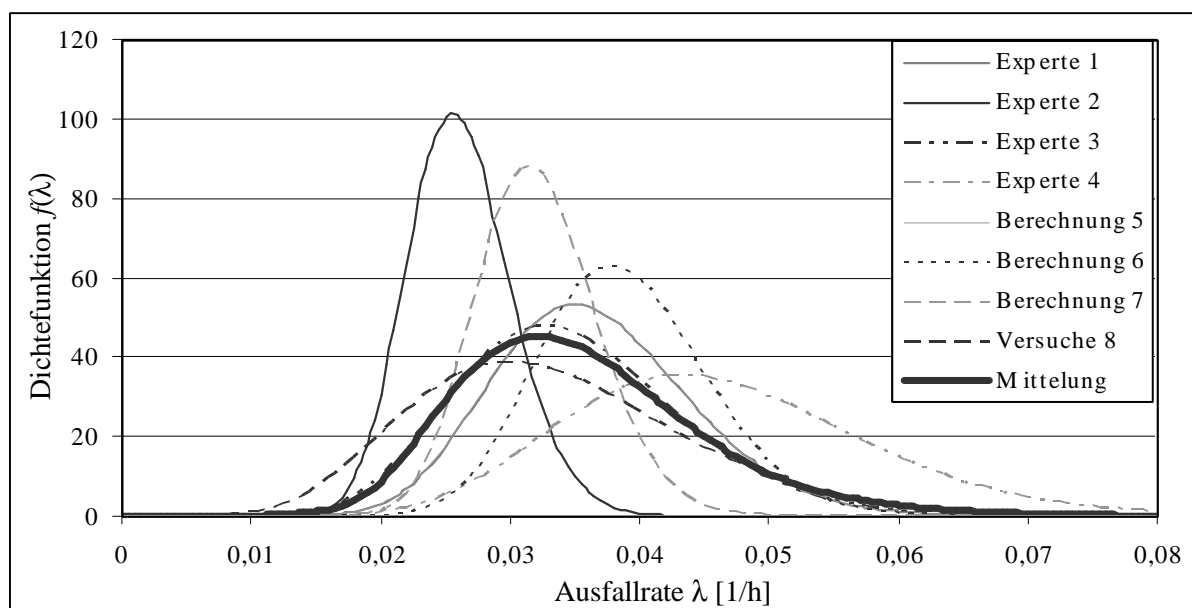


Bild 5.5: Gammaverteilungen der Einzelangaben und deren Mittelung

Die Mittelung der einzelnen Informationsquellen kann zudem in gewichteter Form erfolgen, beispielsweise auf Basis eines so genannten „Best Linear Unbiased Estimator“ (BLUE) [Mcn2000]. Dabei müssen diese Einzelangaben voneinander unabhängig sein (unbiased) und die Gesamtschätzung eine lineare Funktion (linear) der Einzelschätzungen sein, d. h. der Schätzer wird erstellt als ein gewichtetes Mittel der Einzelwertungen. Die Gewichtung kann dabei in der Art erfolgen, dass die Gesamtvarianz der kombinierten Angaben am geringsten wird (best). Dies wird dadurch erreicht, dass die Gewichtung umso stärker wird, je geringer die Varianz der Einzelangabe ist. Andere Möglichkeiten der Gewichtung, wie nach Erfahrung der Experten bzw. Vertrauenswürdigkeit der Datenquellen sind ebenfalls anwendbar, allerdings nicht mehr objektiv.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Gewichtung der Einzelangaben nochmals über Experten festzulegen, so dass die Angabe eines bereits lange im Unternehmen tätigen Mitarbeiters stärker gewichtet wird als die eines unerfahrenen Mitarbeiters. Ebenso können die Angaben aus unterschiedlichen Informationsquellen mehr oder weniger stark gewichtet werden. So können Angaben aus Berechnungen oder Simulationen stärker gewichtet werden als Angaben aus Datenbanken oder Expertenangaben.

### 5.2.3 Bayes Theorem

Das Bayes Theorem kann sequenziell genutzt werden in Situationen, in denen Daten schrittweise über der Zeit zugänglich werden [Bra2000]. Um eine einfache Durchführung zu gewährleisten, besteht die Möglichkeit, als Apriori-Verteilung einen zur Verteilung der Daten natürlich konjugierten Verteilungstyp zu wählen [Coo2006]. Für natürlich konjugierte Verteilungen gilt: Sei  $f(x|\theta)$  die Verteilung der Stichprobe, so ist die die Familie der Apriori-Verteilungen  $g(\theta;\lambda)$  eine natürlich konjugierte Familie zu  $f(x|\theta)$ , wenn die zugehörige Aposteriori-Verteilung  $g(\theta|\lambda)$  wieder zu dieser Verteilungsart gehört. Einige Verteilungsarten und deren natürlich konjugierte Verteilungen sind in Tabelle 5.3 aufgelistet [Sta1977].

Tabelle 5.3: Übersicht natürlich konjugierter Verteilungen

<i>Likelihoodfunktion</i>	<i>Apriori-Verteilung</i>	<i>Aposteriori-Verteilung</i>
Bernoulli	Beta	Beta
Binomial	Beta	Beta
Poisson	Gamma	Gamma
Normal	Normal	Normal
Exponential	Gamma	Gamma

Das Bayes Theorem integriert die bis zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannten Informationen als so genannte Apriori-Verteilung  $g(\theta)$ . Durch Aktualisierung mit neu hinzugewonnenen Informationen, der so genannten Likelihood-Verteilung  $L(Data|\theta)$ , kann dann die Aposteriori-Verteilung  $g(\theta|Data)$  bestimmt werden zu [Mar1982, Mee1998]

$$g(\theta|Data) = \frac{L(Data|\theta) \cdot g(\theta)}{\int L(Data|\theta) \cdot g(\theta) d\theta} \quad (5.4)$$

Am vorhergehenden Beispiel wird dies im Folgenden verdeutlicht. Ausgehend von den Angaben der Experten und Berechnungen aus Tabelle 5.3 kann für das ungewichtete Mittel eine Gammaverteilung mit den Parametern  $a_0 = 18,79$  und  $b_0 = 1,88 \cdot 10^{-3}$  angenähert werden. Diese Information dient als Apriori-Verteilung, die nun mit den Versuchsergebnissen erneuert wird. Dieser oben erwähnte Versuch ergab  $n = 10$  unterschiedliche Laufzeiten, s. Tabelle 5.4.

Tabelle 5.4: Laufzeiten der Versuche

$i$	Laufzeit $t_i$ [h]	$i$	Laufzeit $t_i$ [h]	$i$	Laufzeit $t_i$ [h]	$i$	Laufzeit $t_i$ [h]	$i$	Laufzeit $t_i$ [h]
1	3,0	3	9,0	5	19,0	7	30,0	9	49
2	7,0	4	12,5	6	22,0	8	36,0	10	72

Ausgehend von diesen Testzeiten würde im einfachsten Fall

$$\lambda = \frac{n}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{10}{259,5 \text{ h}} = 3,85 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{h}} \quad (5.5)$$

zugeordnet werden. Unter Einbeziehung der bis dahin bereits vorliegenden Information in Form einer Gammaverteilung kann für diesen speziellen Fall nach [Mar1982] für die Aposteriori-Verteilung

$$g(\lambda|t_{ges}; n; a_0; b_0) = \frac{1}{\Gamma(a_0 + n) \cdot (b_0 / (b_0 \cdot t_{ges} + 1))^{a_0 + n}} \cdot \lambda^{a_0 + n - 1} e^{-\lambda \cdot (t_{ges} + 1/b_0)} \quad (5.6)$$

mit  $t_{ges} = \sum_{i=1}^n t_i = 259,5 \text{ h}$  und  $n = 10$

gefunden werden.

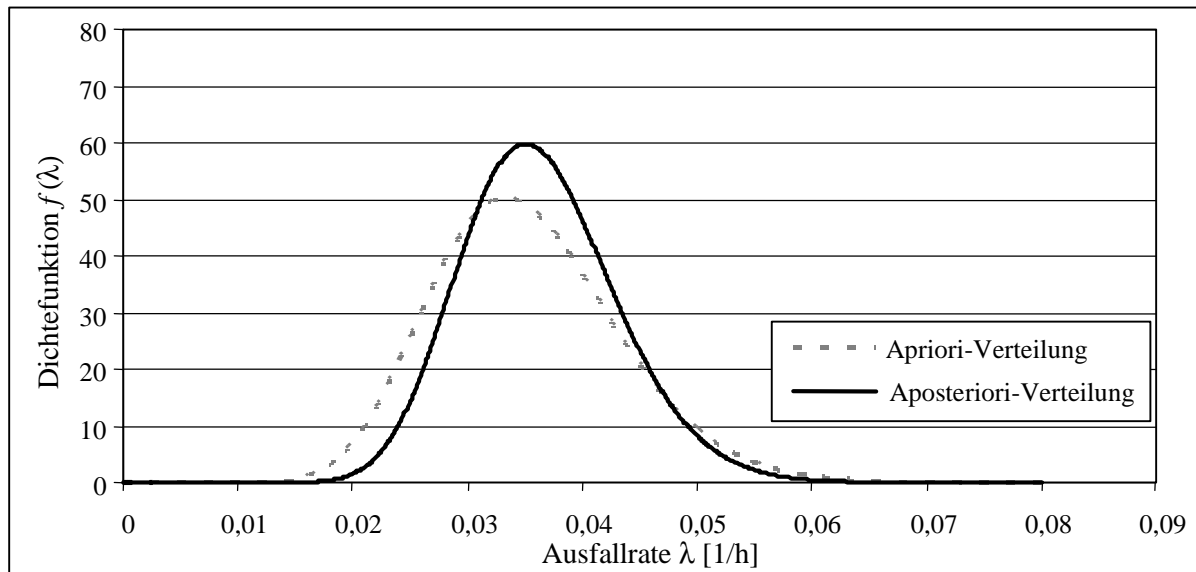


Bild 5.6: *Aposteriori-Verteilung*

Diese in Bild 5.6 dargestellt *Aposteriori-Verteilung* entspricht einer Gammaverteilung mit den Parametern

$$a_1 = a_0 + n = 28,79 \quad \text{und} \quad b_1 = \frac{b_0}{b_0 \cdot t_{ges} + 1} = 1,26 \cdot 10^{-3} \quad (5.7)$$

Mittelwert:  $E = a_1 \cdot b_1 = 3,63 \cdot 10^{-2} \text{ h}$ ; Varianz:  $E = a_1 \cdot b_1^2 = 4,57 \cdot 10^{-5} \text{ h}$

Je größer die Anzahl der Versuche ist, desto geringer wird die Varianz der *Aposteriori-Verteilung* und desto mehr tendiert der Mittelwert gegen die geschätzte Ausfallrate aus Gl. 5.5.

Diese erhaltene *Aposteriori-Verteilung* kann nun für nachfolgende Analysen als Eingangsinformation genutzt werden. Tritt der Fall ein, dass im Folgenden weitere Informationen zugänglich werden, wie beispielsweise über weitere Versuche, so wird diese Verteilung dann als neue *Apriori-Verteilung* für eine erneute Aktualisierung der Information genutzt. So kann diese durchgängig erneuerte Information zum jeweiligen Zeitpunkt mit allen bis dahin zugänglichen Informationsquellen für Analysen genutzt werden.

Der Vorteil der Bayes'schen Informationsaktualisierung ist, dass sequentiell zugängige Daten verschiedener Quellen miteinander kombiniert werden können. Daher können diese Quellen optimal miteinander kombiniert werden und Expertenwissen und Vorkenntnisse über das Produkt können gut berücksichtigt werden. Von Nachteil ist allerdings bei dieser Methode, dass die Ermittlung der *Apriori-Verteilung* schwierig sein kann. Zudem kann der Berechnungsaufwand je nach gewählter *Apriori-Verteilung* – natürlich konvergierte Verteilung oder nicht – sehr hoch werden und eine Lösung kann in diesen Fällen nur noch simulativ erfolgen [Gan2006].

### 5.3 Berücksichtigung unscharfer Eingangsdaten

Ist die Unschärfe der Parameter bekannt, so kann diese Unschärfe auf zwei verschiedene Arten mit berücksichtigt werden. Zum einen können Randwertbetrachtungen getroffen werden. Diese dienen dazu, die Grenzen für das beste und schlechteste auftretende Ergebnis zu ermitteln (Best-Case- oder Worst-Case-Szenario). Dies ist allerdings in manchen Fällen schwierig, wenn von vornherein nicht klar ist, welcher Eingangsparameter zu einer Verbesserung oder Verschlechterung des Ergebnisses führt. In diesen Fällen oder wenn die Datenquellen eine Beschreibung der Unsicherheit liefern, dann können diese auch direkt genutzt werden. Dabei wird dann beispielsweise nicht allein die Ausfallzeit, sondern auch die das Ausfallverhalten beschreibenden Parameter als stochastisch verteilt angenommen. Der Einfluss dieser zweifachen stochastischen Verteilung wird anhand des Reparaturverhaltens einer Komponente dargestellt. Diese Komponente wird als exponentialverteilt mit unscharfem  $MTTF$  modelliert. Die Verteilung des  $MTTF$  wird anhand einer Dreieckverteilung beschrieben mit unterem Grenzwert  $a = 300$  h und oberem Grenzwert  $b = 500$  h. Der Einfluss der Form der Unschärfe des  $MTTF$  und damit des Parameters  $\lambda$  wird anhand des veränderlichen Modalwertes  $c$  der Dreieckverteilung ermittelt. Der Parameter  $c$  liegt dabei zwischen  $c_{\min} = 350$  h und  $c_{\max} = 450$  h, s. Bild 5.7 links. Durch diese Unschärfe des Parameters  $\lambda$  ergibt sich eine veränderte Beschreibung des Ausfallverhaltens, wie Bild 5.7 rechts zeigt. Das sich ergebende Verhalten bei streuendem Parameter  $\lambda$  liegt innerhalb der Grenzen des Best-Case ( $MTTF = 500$  h) und des Worst-Case ( $MTTF = 300$  h).

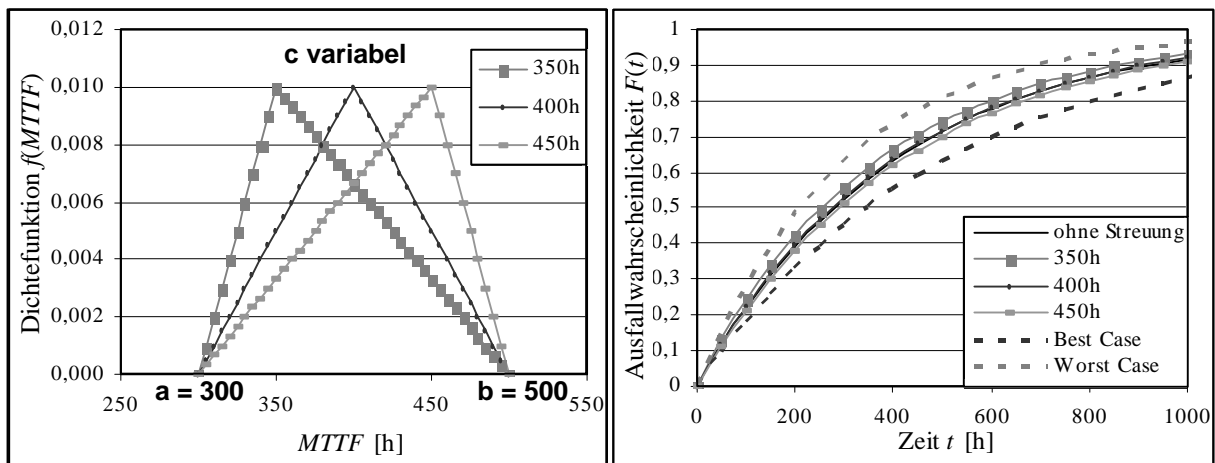


Bild 5.7: Unschärfe des  $MTTF$  und deren Auswirkung auf die Ausfallwahrscheinlichkeit

Die Auswirkungen dieser Unschärfe auf das prognostizierte Ergebnis, zum Beispiel die Reparaturwürdigkeit, wurden detaillierter in [Jäg2006, Tro2006] untersucht.

## 6 Modellbildung und -analyse

Ausgehend von der Systemanalyse und der zu Grunde liegenden Datenbasis werden in diesem Kapitel zunächst Anforderungen an ein geeignetes Analyseverfahren gestellt, die vorgestellten Verfahren dahingehend bewertet und das gewählte Verfahren vorgestellt.

### 6.1 Anforderungen an Analyseverfahren

Die Anforderungen, die an Analyseverfahren gestellt werden, lassen sich unterscheiden in allgemeine Anforderungen, die hauptsächlich die im Modell abbildbaren Eigenschaften und die Benutzerfreundlichkeit betreffen, und spezielle Anforderungen, die maßgebend dafür sind, ob ein Verfahren zur Modellierung von Produktions- und Instandhaltungsprozessen und zur Abbildung von Zuverlässigkeitsgrößen geeignet ist.

#### 6.1.1 Allgemeine Anforderungen

Zu den allgemeinen Anforderungen, die ein Produktionsmodell erfüllen sollte, gehören Bedingungen, die unabhängig von der Branche, der Unternehmensgröße und dem Produktionstyp sind. Dies sind vor allem Anforderungen, die die abbildbaren Eigenschaften und die Benutzerfreundlichkeit des Modells betreffen [Hor1995, Kos1995, Lin1999].

Bei der Modellbildung und -analyse spielt es eine entscheidende Rolle, dass die Elemente und Eigenschaften des realen Systems (z. B. Daten, Funktionen, Zeit, Entscheidungen, Ressourcen und Produkte) im Modell abgebildet werden können.

Die Akzeptanz eines Modells beim Anwender hängt zudem von der Benutzerfreundlichkeit der Modellierungsmethode ab. Um diese zu gewährleisten, sollte Wert auf eine einfache und übersichtliche Darstellung und die Möglichkeit der grafisch-symbolischen Darstellung gelegt werden. Der Einarbeitungsaufwand in die Funktionsweise der Methode sollte sich ebenso wie der Aufwand zur Erstellung eines Modells in Grenzen halten. Die Offenheit und Erweiterbarkeit gewährleistet die Anpassung des Modells an Veränderungen. Zudem sollte der Anwender die Wahl zwischen verschiedenen Detaillierungsebenen haben, um die Untersuchungen in dem von ihm angestrebten Detaillierungsgrad durchzuführen.

### 6.1.2 Spezielle Anforderungen

Ausgehend von den zu untersuchenden Aspekten ergeben sich zudem spezielle Anforderungen bezüglich der Abbildung des Produktionsprozesses, der Instandhaltung und der Verlustquellen, s. Tabelle 6.1.

So sollte ein adäquates Modellierungsverfahren die Abbildung von nebenläufigen und synchronisierten Prozessen sowie chronologischen Abläufen ermöglichen. Ebenso treten in Produktionsanlagen Konkurrenz um Ressourcen und dadurch bedingtes Warteschlangenverhalten auf. Die Daten, die für die Analyseverfahren als Eingangsdaten dienen, können mit Unsicherheiten behaftet sein (s. Kap. 5). In diesen Fällen ist eine reine Randwertbetrachtung teilweise nicht ausreichend, da Abhängigkeiten zwischen den Ereignissen dazu führen können, dass von vornherein nicht unbedingt klar ist, welcher der Grenzwerte mit den anderen zu kombinieren ist. Daher sollte ein geeignetes Analyseverfahren diese Datenunsicherheit mit berücksichtigen, um entsprechende Informationen für eine Entscheidungsfindung ausgeben zu können.

Zudem sollten die Teilsysteme wie der Materialfluss, Informationsfluss und Produktionsprozess mit zugehörigen Produktionsabhängigkeiten abgebildet werden. Durch die Abbildung der Verlustquellen wird zudem die Abbildung von Komponentenzuständen, Zustandsübergängen, Verweildauern, zeitabhängigen Übergangsraten, Alterung, Ausfall- und Instandhaltungsabhängigkeiten notwendig. Um die Bewertung verschiedener Optionen auf Basis entstehender Kosten zu ermöglichen, bedarf es der Abbildung von zeitdauerabhängigen, aktionsbezogenen sowie veränderlichen Kosten bzw. Einnahmen.

### 6.1.3 Bewertung

Ein in Tabelle 6.1 dargestellter Vergleich zeigt, dass nur wenige der betrachteten Verfahren für ein ganzheitliches Produktionsmodell geeignet sind. Ein großer Nachteil, den viele Modellierungsmethoden aufweisen, ist, dass zeitliche Vorgänge im Modell nicht oder nur eingeschränkt berücksichtigt werden können. Da sich mit diesen Verfahren das zeitliche Verhalten eines Produktionssystems nicht abbilden lässt, sind sie für die Modellierung der zuvor festgelegten Kennwerte von Produktionsprozessen ungeeignet. Die Forderung nach der Abbildung des zeitlichen Systemverhaltens wird lediglich von der UML, den Warteschlangensystemen, den Markovmodellen und den Petrinetzen erfüllt.

Tabelle 6.1: Bewertung der Methoden erweitert nach [Mer1994, Hor1995, Poz2005]

Bewertungs- kriterien		Modellierungs- methoden							ECSPN	
		SADT	EPK	UML	Programmablaufplan	Warteschlangen	Markovmodelle	ESPN		
allgemeine Anforderungen	Eigenschaften	Daten, Funktionen	+	+	+	0	0	0	0	+
		Zeit	-	-	0	0	+	+	+	+
		Entscheidungen	0	-	+	0	0	0	+	+
		Material, Ressourcen	0	0	+	0	+	0	+	+
		Produkte	0	0	+	0	+	0	+	+
	Benutzer- freundlichkeit	Einfache und übersichtliche Darstellung	0	+	0	+	+	0	+	0
		Graphisch-symbolische Darstellung	+	+	+	+	+	+	+	+
		Geringer Einarbeitungs-/Erstellungsaufwand	+	0	0	+	0	0	0	-
		Erweiterbarkeit und Offenheit	-	+	0	0	0	0	+	+
		Verschiedene Detaillierungsgrade	+	+	+	+	0	0	+	+
	Nutzung von Referenzmodellen	0	+	+	+	0	0	0	0	
spezielle Anforderungen	Allgemein	Nebenläufigkeit/Synchronisation	0	-	0	-	0	-	+	+
		Chronologische Abläufe	0	-	+	+	0	-	+	+
		Konkurrenz um Kapazitäten	-	-	0	0	0	0	+	+
		Warteschlangenverhalten	-	-	-	-	+	-	-	+
		Zeitliches Systemverhalten	-	-	0	-	+	+	+	+
		Unscharfe Eingangsinformationen	-	-	-	-	-	-	-	+
	Produktion	Abbildung des Materialflusses	0	-	0	0	+	0	+	+
		Abbildung des Informationsflusses	0	0	0	0	+	0	+	+
		Abbildung der Produktionsstruktur	0	-	0	0	+	-	+	+
		Produktionsabhängigkeiten	0	-	+	0	+	-	+	+
	Verlustquellen Instandhaltung	Komponentenzustände	-	-	+	-	0	+	+	+
		Zustandsübergänge	-	-	+	-	0	+	+	+
		Verweildauern	-	-	0	-	+	+	+	+
		Zeitabhängige Übergangsraten	-	-	-	-	-	-	+	+
		Alterung	-	-	-	-	-	-	-	+
		Instandhaltungsabhängigkeiten	0	-	0	0	+	-	+	+
		Ausfallabhängigkeiten	0	-	0	0	+	-	+	+
	Kosten	Zeitdauerabhängige Kosten	-	-	-	-	-	0	-	+
		Anzahlabhängige Kosten	-	-	-	-	-	0	-	+
		Veränderliche Kosten/Einnahmen	-	-	-	-	-	0	-	+

+ direkt modellierbar    0 eingeschränkt modellierbar    - nicht/mit hohem Aufwand modellierbar



Im Vergleich dieser Methoden in Bezug auf die Anforderungsgruppen Produktion, Instandhaltung und Verlustquellen zeigt sich, dass speziell die ECSPN die Anforderungen am umfassendsten erfüllen. Die besondere Eignung der ECSPN zur Modellierung von Produktionssystemen beruht auf mehreren Eigenschaften. ECSPN sind als einzige der betrachteten Modellierungsmethoden geeignet, Eigenschaften wie Konkurrenz, Konflikt, Synchronisation und geteilte Ressourcen, die für Produktionssysteme kennzeichnend sind, in befriedigender Weise abzubilden. Ebenso bieten die ECSPN die Möglichkeit, Zustandsübergänge mit zeitabhängigen Übergangsraten, Warteschlangenverhalten und Kosten abzubilden [Zim1997, Sil1998, Poz2005].

## 6.2 Petrinetze

Petrinetze wurden 1962 von dem Mathematiker *Carl Adam Petri* zur Modellierung komplexer Systeme entwickelt [Pet1962, Kuh1993, Gir2003]. Petrinetze leiten sich aus der allgemeinen Systemtheorie ab und stellen einen Formalismus für die Beschreibung von synchronen sowie von parallelen Prozessen, von kausalen Abhängigkeiten und von Konflikten (z. B. Zugriff auf geteilte Ressourcen) dar [DiC1993, Mer1994, Hor1995, Haa2002]. Ursprünglich wurden sie angewandt für die Analyse von Computer- und Kommunikationssystemen, werden aber zunehmend im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung sowie der Zuverlässigkeitstechnik eingesetzt [DiC1993, Pro1996, Jen1997b, Zim1997, Sch1999a, Sch1999b].

### 6.2.1 Statische Elemente

Petrinetze sind so genannte gerichtete bipartite Graphen, die aus gerichteten Kanten und zwei verschiedenen Arten von Knoten bestehen [Ros1983]. Diese Knoten lassen sich in zwei disjunkte Mengen unterscheiden, passive und aktive Elemente.

Die passiven Elemente eines Petrinetzes sind die Stellen  $P$  (engl.: place), die je nach Netztyp auch als Bedingungen, Zustände oder Plätze bezeichnet und durch Kreise dargestellt werden [Bau1996]. Die Stellen repräsentieren als die passiven Netzelemente die möglichen Zustände der Komponenten und des Systems [Kuh1993].

Transitionen  $Tr$  (engl.: transition), auch Ereignisse oder Aktionen genannt, sind die aktiven Elemente eines Petrinetzes und werden graphisch als Rechtecke dargestellt. Sie bilden die möglichen Übergänge zwischen den Zuständen ab.

Die Kanten  $A$  (engl.: arc oder flow relation) bilden durch die gerichtete Verbindung der Stellen mit den Transitionen die möglichen Zustandsübergänge des Systems ab [Bau1996]. Dabei dürfen die Kanten immer nur zwei Knoten aus verschiedenen Klassen verbinden: eine Kante verbindet immer eine Stelle mit einer Transition oder

eine Transition mit einer Stelle. Den Kanten ist ein so genannter Kantenausdruck zugeordnet, der die Vielfachheit der Kanten bestimmt. Ist keine Angabe vorhanden, so wird im Allgemeinen eine Vielfachheit von „1“ zugeordnet.

Entsprechend der Definition [Rei1998] eines Netzes gilt: Sind  $P$  und  $Tr$  zwei disjunkte Mengen und es gilt  $A \subseteq (P \times Tr) \cup (Tr \times P)$ , so wird  $N = (P, Tr, A)$  als Netz bezeichnet. Somit stellen die statischen Elementen des Petrinetzes bereits das eigentliche Netz dar und spiegeln die Logik und Struktur des Modells wider. Um die Abläufe und Zustandsänderungen innerhalb des Modells zu realisieren, bedarf es zudem dynamischer Elemente.

### 6.2.2 Dynamik der Petrinetze

Das dynamische Verhalten der Petrinetze – die Realisierung von Zuständen in Abhängigkeit der Realisation anderer Zustände [Ros1983] – erfolgt mit Hilfe von so genannten Marken, die Stellen belegen und über Transitionen gemäß bestimmter Spielregeln gelöscht und erzeugt werden können [Mer1994]. Stellen können je nach Netztyp mit einer oder mehreren dieser, bei anonymen Netzen als Punkte dargestellten, Marken besetzt sein, die den momentanen Wert des Zustandes repräsentieren. Dadurch spiegelt die Gesamtheit der Markenbesetzung der Stellen innerhalb des Netzes, die sog. Markierung, den momentanen Zustand des Systems wider [Bau1996, VDI2006].

Bevor ein solcher Schaltvorgang – Löschen und Erzeugen von Marken – stattfinden kann, ist die Erfüllung einer so genannten Aktivierungsbedingung erforderlich. Wenn alle Eingangsstellen einer Transition die ausreichende Anzahl und Art an Marken erreicht haben, dann ist die Transition aktiviert und „schaltet“ bzw. „feuert“ nach Ablauf der ihr gegebenen Schaltverzögerungszeit, einer deterministischen oder stochastischen Zeitdauer bzw. ohne Zeitverzögerung je nach Netztyp und Art der Transition. Die notwendige Anzahl an Marken wird über das Kantengewicht vorgegeben. Besitzt eine Kante kein gesondert angegebenes Kantengewicht, so ist das Kantengewicht gleich eins. In dem in Bild 6.1 dargestellten Beispiel muss somit die Stelle  $p_1$  mit mindestens zwei und die Stelle  $p_2$  mit mindestens einer Marke belegt sein, damit die Transition aktiviert ist und in diesem Beispiel unmittelbar schaltet. In einem ersten Teilschritt entnimmt die Transition eine Anzahl von Marken entsprechend der Vielfachheit des Kantenausdrucks aus den Eingangsstellen und löscht diese Marken. Damit befindet sich in der Stelle  $p_1$  nach dem Schaltvorgang ebenso wie in der Stelle  $p_2$  eine Marke. In einem zweiten Schritt werden dann gemäß der Vielfachheit des Kantenausdrucks der Ausgangskante der Transition Marken in den Ausgangsstellen der Transition erzeugt. Somit ist die Stelle  $p_3$  nach dem Schaltvorgang mit einer Marke belegt. Ein weiterer Schaltvorgang kann nun nicht mehr stattfinden, da die Vorbedingung nicht länger erfüllt ist.

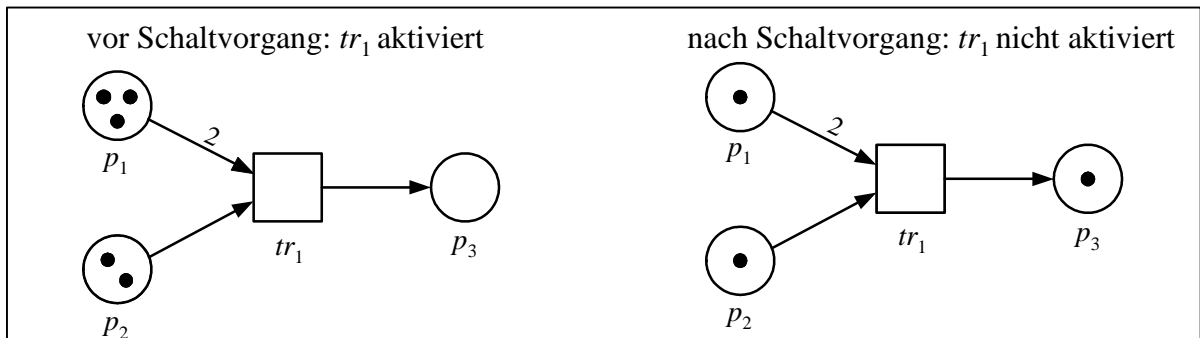


Bild 6.1: Petrinetz vor und nach dem Schaltvorgang

Dabei können je nach Netzklasse nicht allein Marken gelöscht und erzeugt, sondern bei farbigen Netzklassen die den Marken mit angehängte Information auch verändert werden. In einigen weiterentwickelten Klassen der Petrinetze werden zudem so genannte Lesekanten (bzw. Kommunikationskanten) und Verbotskanten (bzw. Sperrkanten) genutzt [VDI2006]. Diese werden im Folgenden als Doppelpfeil (Lesekanten) und als Linie mit Kreis als Pfeilspitze (Verbotskante) dargestellt. Damit eine Transition aktiviert ist, die mit einer Stelle über eine Lesekante verbunden ist, muss in der Eingangsstelle mindestens die Anzahl an Marken liegen, die das Kantengewicht vorgibt. Hingegen gilt für die Verbotskanten, komplementär zur Lesekante, dass eine Aktivierung einer Transition dann möglich ist, wenn in der Eingangsstelle eine geringere Anzahl an Marken vorhanden ist als es das Kantengewicht angibt. Bei einem Schaltvorgang bleibt die Markenanzahl der Eingangsstellen, die über Lese- oder Verbotkanten mit der Stelle verbunden sind, unverändert.

In dem in Bild 6.2 dargestellten Petrinetz müssen dementsprechend sowohl  $p_1$  mit mindestens drei Marken und  $p_2$  mit mindestens einer Marke als auch  $p_3$  mit maximal einer Marke belegt sein, damit die Transition aktiviert ist. Somit ist die Transition  $tr_1$  in Teil 1) des Bildes 6.2 nicht aktiviert.

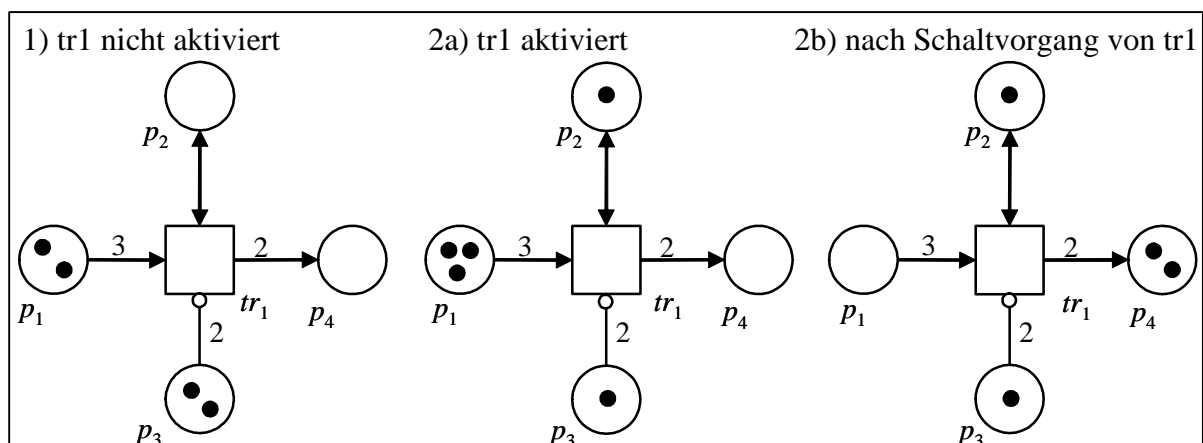


Bild 6.2: Petrinetz vor und nach dem Schaltvorgang

Bei einer Markenbelegung wie in Teil 2a) des Bildes ist die Transition  $tr_1$  aktiviert und kann schalten. Beim Schaltvorgang werden drei Marken in  $p_3$  gelöscht und zwei Marken in  $p_4$  erzeugt. Die Markierungen von  $p_2$  und  $p_3$  bleiben unverändert.

### 6.3 ECSPN

Die in dieser Arbeit verwendeten und weiterentwickelten erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze (engl. Extended Colored Stochastic Petri Nets, ECSPN) bieten eine leistungsfähige Modellierungsmethode für die Beschreibung komplexer Systeme [Poz2004b]. Sie stellen eine Erweiterung der farbigen Petrinetze (engl. Colored Petri Nets, CPN) dar, die informationstragende Marken so genannte farbige Marken verwenden [Jen1997a]. Die Farbe der Marke kann als abstrakter Datentyp verstanden werden. Eine Farbe kann beispielsweise einem Zahlenwert, einem booleschen Wert, einer Zeichenkette oder einer beliebigen Kombination (Produkt) mehrerer Zahlenwerte, booleschen Werte oder Zeichenketten entsprechen. Somit kann in einem als ECSPN modellierten Produktionssystem einer einzigen farbigen Marke die Auftragsinformationen, zu fertigende Bauteilvariante, zu fertigende Losgröße, Fertigungspriorität usw., aufprägt werden.

#### 6.3.1 Erweiterungen

Die Klasse der farbigen Netze wurde im Wesentlichen um die nachfolgenden Eigenschaften erweitert.

**Verteilungsfunktionen:** Die ECSPN besitzen neben unmittelbaren Transitionen und Transitionen mit deterministischer Schaltverzögerung auch solche, deren Zeitverzögerung sich entsprechend stochastischer Verteilungsfunktionen ergeben. Diese sind im Einzelnen die in Abschn. 3.2 vorgestellten Verteilungsarten Normalverteilung, Exponentialverteilung, Weibullverteilung, Lognormalverteilung, Erlangverteilung, Dreieckverteilung sowie Verteilungen, die über eine Datei eingelesen werden können.

**Konzept der Alterung:** Dieses Konzept ermöglicht die Abbildung des unterschiedlichen Alterungsverhaltens in verschiedenen Zuständen sowie die Einbindung einer zustandsabhängigen Instandhaltung. Durch die Integration der Altersinformation in die Komponentenmarke und die Anwendung eines neuen Schaltverfahrens können sowohl der Alterszuwachs als auch die Altersreduktion modelliert werden. Das Komponenten- bzw. Systemalter kann über Kantenfunktionen in die Ermittlung der Schaltdauern einfließen. Dieses Konzept der Alterung mit den entsprechenden Erweiterungen ist in [Poz2004a] ausführlich dargestellt.

**Erneuerungsgrad:** Der Erneuerungsgrad  $\varepsilon$  beschreibt die Güte einer Instandhaltungsmaßnahme. Mit dem erzielten Erneuerungsgrad kann in Bezug auf die Instandhaltungsmaßnahmen unterschieden werden zwischen

- Minimaler Instandsetzung ( $\varepsilon = 0$ ),
- Instandsetzung mit Erneuerungsgrad ( $0 < \varepsilon < 1$ ) und
- Vollständiger Erneuerung ( $\varepsilon = 1$ ).

**Warteschlangenstellen:** Diese Stellen bewirken, dass die Auswahl der für die Aktivierung einer Transition verwendeten Marken nach einer Warteschlangenregel erfolgt. Sie ermöglichen damit die Abbildung verschiedener Abarbeitungsstrategien beispielsweise LIFO (Last In First Out), FIFO (First In First Out), FIFO mit Priorität und zufällige Abarbeitung.

**Kostenvariablen:** Sie ermöglichen die Bestimmung der zeitdauer- und aktionsbezogenen Kosten. In den Kostenvariablen laufen die anfallenden Kosten auf und werden protokolliert. Ein Kostenfaktor berücksichtigt die Höhe der Kosten, die für die Markenbesetzung einer Stelle über der Zeit bzw. für die Schaltung einer Transition anfallen. Dadurch lassen sich sowohl zeitdauerabhängige als auch ereignisabhängige Kosten ermitteln.

**Referenzstellen und -transitionen:** Sie repräsentieren graphisch Originalstellen bzw. -transitionen. Sie stellen damit eine Modellierungshilfe dar und ermöglichen die hierarchische und thematische Dekomposition des Modells und sorgen damit für eine bessere Überschaubarkeit des Modells.

**Variablenkalkulation:** Um verschiedene Informationen miteinander zu kombinieren, besteht die Möglichkeit, über den Kantenausdruck Zufallsvariablen zu erzeugen und Variablen miteinander zu verrechnen.

**Zufallsvariablen auf Kanten:** Da verschiedene Faktoren wie beispielsweise der Erneuerungsgrad sich ebenso wie die Schaltdauern zufällig ergeben, besteht die Möglichkeit, Variablen über den Kantenausdruck mit zufälligen Werten zu belegen.

**Unschärfe Parameter:** Um die in Kapitel 5 vorgestellten unscharfen Parameter nutzen zu können, kann diese Unschärfe der Parameter direkt modelliert werden, indem nicht nur die Schaltverzögerung einer Transition als stochastisch verteilt definiert wird, sondern die Verteilungsparameter selbst als stochastisch verteilt definiert werden können. Dadurch können Variantenvergleiche unter Berücksichtigung dieser Unschärfe durchgeführt werden, wie sie auch in [Jäg2007] vorgeschlagen werden.

### 6.3.2 Definition des ECSPN

Im Folgenden werden die einzelnen Elemente des ECSPN definiert. Die Definition ist an [Jen1996, Poz2005] angelehnt.

Ein ECSPN ist ein Tupel mit  $ECSPN = (\Sigma, V, GV, IGV, CC, ICC, P, PC, QP, IP, RP, RPP, TR, G, D, FP, \Pi, W, RT, RTTR, CA, CF, A, AT, E, AF)$

$\Sigma = \{\sigma_i\}$ ,  $i = 1(1)N_\Sigma$ , die Menge von Farben  $\sigma$ , die den Typ „bool“, „int“, „real“, „string“ und „product“ (Kombination mehrerer anderer Farben bzw. Informationen) besitzen können.

$V = \{v_i\}$ ,  $i = 1(1)N_V$ , die Menge von lokalen Variablen  $v$ .

$GV = \{gv_i\}$ ,  $i = 1(1)N_{GV}$ , die Menge von globalen Variablen  $gv$ .

$IGV$ , eine Initialisierungsfunktion der globalen Variablen,  $IGV : GV \rightarrow N_0$ .

$CC = \{cc_i\}$ ,  $i = 1(1)N_{CC}$ , die Menge von Kostenvariablen  $cc$ , in denen zeitabhängige, stückzahlabhängige und fixe Kosten zusammengeführt werden können.

$ICC$ , eine Initialisierungsfunktion der Kostenvariablen,  $ICC : CC \rightarrow \mathfrak{R}$ .

$P = \{p_i\}$ ,  $i = 1(1)N_P$ , einer endlichen Menge von Stellen  $p$ , die mit Marken belegt sein können.

$PC : P \rightarrow \Sigma$ , einer Farbenfunktion, die einer Stelle eine bestimmte Farbe zuordnet, die Element der deklarierten Farbenmenge  $\Sigma$  ist.

$QP : P \rightarrow \{\text{„Normal“}, \text{„FIFO“}, \text{„FIFO with Priority“}\}$ , einer Warteschlangendisziplin, die einer Stelle eine von drei Warteschlangendisziplinen zuordnet.

$IP$ , eine Initialisierungsfunktion der Stellen  $P$ .

$RP = \{rp_i\}$ ,  $i = 1(1)N_{RP}$ , einer endlichen Menge von Referenzstellen  $rp$ .

$RPP : RP \rightarrow P$ , einer Funktion, die einer Referenzstelle eine bestimmte Stelle zuordnet.

$TR = \{tr_i\}$ ,  $i = 1(1)N_{TR}$ , einer endlichen Menge von Transitionen  $tr$ , die entweder unmittelbar oder zeitbehaftet sind.

$G$ , einer Wächterfunktion, die einer Transition eine Boolesche Funktion zuordnet.

$D : TR \rightarrow \{T, F(t)\}$ , der Zuweisung einer Schaltverzögerung  $d_i$ ,

$FP : TR \rightarrow \{\text{„Enabling Memory“}, \text{„Age Memory“}, \text{„Age Influence“}\}$ , einer Funktion, die den zeitbehafteten Transitionen ein Schaltverfahren zuweist.

$\Pi : TR \rightarrow N_0$ , einer Funktion, die den Transitionen eine Schulpriorität zuweist.

$W : TR \rightarrow N$ , ein Gewicht zur Bestimmung der Schulpwahrscheinlichkeit.

$RT = \{rt_i\}, i = 1(1)N_{RT}$ , einer endlichen Menge von Referenztransitionen  $rt$ .

$RTTR : RT \rightarrow TR$ , einer Funktion, die einer Referenztransition eine bestimmte Transition zuordnet.

$CV$ , eine Kostenvariablenzuweisung für die Stellen und Transitionen.

$CF$ , eine Kostenfaktorfunktion für die Stellen und Transitionen.

$A = \{a_i\}, i = 1(1)N_A$ , einer endlichen Menge von Kanten  $a$ .

$AT : A \rightarrow \{\text{„Normalkante“}, \text{„Verbotskante“}, \text{„LeseKante“}\}$ , eine Funktion, die den Kanten eine Kanteneigenschaft zuweist.

$AE$ , eine Funktion, die den Kanten einen Kantenausdruck zuweist.

$AF$ , eine Funktion, die den Kanten eine Kantenfunktion zuweist,  $AF : A \rightarrow \{\text{„AgeEnter} = v\text{“}, \text{„Priority} = v\text{“}, \text{„Set}(gv = x)\text{“}\}, x \in GV$ .

Die Modellierung dieser Bestandteile des ECSPN erfolgt über die Deklarationen (mit  $\Sigma, V, GV$  und  $CC$ ), den Netzgraphen (mit  $P, TR$  und  $A$ ) und die Netzbeschriftungen (mit  $PC, QP$  und  $IP$  für die Stellen  $P, G, D, FP, \Pi, W$  und  $S$  für die Transitionen  $TR, AT, E$  und  $AF$  für die Kanten  $A$  sowie  $CV$  und  $CF$  für die Stellen  $P$  und Transitionen  $TR$ ).

## Deklaration

**Farben ( $\Sigma$ ):** Wie jeder Datentyp, so muss auch eine Farbe vor ihrer Verwendung deklariert werden. Eine Farbe kann die Struktur eines booleschen Datentyps („bool“), eines ganzzahligen Datentyps („int“), eines reellen Datentyps („real“) oder eines Zeichenketten-Datentyps („string“) zugewiesen werden. Farben, die verschiedene elementare Datentypen kombinieren, werden als „product“ aus diesen zuvor deklarierten elementaren Datentypen festgelegt. Als Beispiel können für ein Modell eines Produktionssystems die Farben, zu fertigende Bauteilvariante ( $BV$ ) als Zeichenketten-Datentyp sowie die Auftrags-ID ( $ID$ ) und die Fertigungspriorität ( $FP$ ) als Integer-Datentyp, definiert werden, s. Bild 6.3.

color $BV$	= string;	var $bv : BV$ ;
color $ID$	= int;	var $id : ID$ ;
color $FP$	= int;	var $fp : FP$ ;
color $Bauteil$	= product $BV * ID * FP$ ;	var $a : Alter$ ;
color $Alter$	= real;	globalVar $Stückzahl : ID = 0$ ;
color $C$	= real;	costVar $Kosten : C = 0.0$ ;

Bild 6.3: Deklaration der Farben und Variablen

Diese werden dann durch das Produkt der Farben zu einer einzelnen neuen Farbe (*Bauteil*) zusammengefasst, so dass alle drei Daten in einer Marke weitergegeben werden können. Als weitere Farben wurde die Farbe *C* für die anlaufenden Kosten und die Farbe *Alter* für das Maschinenalter als reelle Datentypen deklariert. Neben den Farben werden innerhalb der Deklaration zusätzlich die Variablen definiert. Die Variablen ermöglichen den Austausch und die Abfrage von bestimmten Informationen innerhalb des Petrinetzes. Bei den ECSPN werden drei verschiedene Klassen von Variablen unterschieden:

**Lokale Variablen (*V*):** Diese Variablen können nur von einer einzelnen Transition verarbeitet werden, gelten demnach nur für abgeschlossene Bereiche des Netzes und besitzen somit nur lokal Gültigkeit. Sie können über Transitionen lokal in Wächterbedingungen abgefragt bzw. über Zuweisungen in der Kantenausdrucksfunktion der Ausgangskanten verändert werden. Ihnen wird in der Deklaration neben dem Variablennamen eine bestimmte Farbe zugeordnet wird. Im Beispiel werden die Variablen mit den Namen *bv*, *id* und *fp* definiert und ihnen jeweils die Farbe *BV*, *ID* und *FP* zugeordnet.

**Globale Variablen (*GV*):** Diese Variablen können über das gesamte Petrinetz hinweg ausgelesen und verändert werden. Dies bedeutet, ändert sich die Variable an einer Stelle im Netz, so ändert sich ihr Wert auch an allen anderen Stellen, an denen diese Variable auftaucht. Sie besitzen somit global Gültigkeit. Da diese Variablen nicht nur lokal gültig sind, muss daher bereits zu Beginn in der Deklaration neben Variablenname und Farbe ein Initialwert (*IGV*) für diese Variable festgelegt werden. Im Beispiel aus Bild 6.3 werden der globalen Variablen *Stückzahl* die Farbe *ID* und der Initialisierungswert 0 zugeordnet.

**Kostenvariablen (*CC*):** Diese Variablen werden für die Erfassung von zeit- und aktionsbezogenen Kosten verwendet, die durch Schaltungen von Transitionen bzw. durch die Besetzung einer Stelle mit Marken über der Zeit modelliert werden. Da Kosten an verschiedenen Stellen im Netz entstehen können, sind diese Kostenvariablen ebenfalls globale Variablen, deren Startwert (*ICC*) zu Beginn in der Deklaration festgelegt wird. Den Kostenvariablen muss eine Farbe zugewiesen werden, die ein reeller Datentyp ist. Diese Kostenvariablen können ebenfalls für Abfragen in Wächterfunktionen oder auch für abschließende Kostenauswertungen genutzt werden. In diesem Beispiel wird der Kostenvariablen die Farbe *C* (reeller Datentyp) und ein Initialisierungswert von 0,0 zugeordnet.



## Netzgraph und -beschriftung

Innerhalb der Erstellung des Netzgraphen und dessen Beschriftung wird das Netz mit den Elementen – Stellen, Transitionen und Kanten – aufgebaut und die Eigenschaften der einzelnen Elemente definiert sowie die Anfangsmarkierung des Netzes festgelegt.

### Stellen

Den **Stellen** wird dabei zum einen über die Funktion  $PC$  eine **Farbe** zugeordnet. Dadurch ist eindeutig festgelegt, welche Farbe den Marken zugeordnet sein muss, mit denen diese Stelle belegt sein kann.




Stelle	Stelle mit Warteschlangeneigenschaft	Referenzstelle
intakt $\frac{1}{p_{10}}$  $p_{10}$ Alter	Puffer vor Fräsen  $p_{22}$ Bauteil	intakt $\frac{1}{rp_1/p_{10}}$  $rp_1/p_{10}$ Alter

Bild 6.4: Übersicht verschiedener Stellenarten

Zum anderen wird der Stelle eine bestimmte Warteschlangeneigenschaft zugeordnet. Dadurch können die Marken beim Eintreffen in der Stelle gemäß dem gewählten **Warteschlangenprinzip**  $QP$  (Normal, FIFO, FIFO with Priority) in eine Warteschlange einsortiert werden, um nacheinander abgearbeitet zu werden. Bei Wahl der Warteschlangendisziplin „Normal“ erfolgt eine wahlfreie (zufällige) Einsortierung und Abarbeitung. Die Warteschlangendisziplin „FIFO“ (First In First Out) bedeutet, dass die Marken in einer Stelle in der Reihenfolge des Eintritts in die Warteschlange einsortiert werden und somit immer die Marke mit der längsten Aufenthaltsdauer in der Stelle zuerst abgearbeitet werden. Bei der Warteschlangendisziplin „FIFO with Priority“ können priorisierte Marken bevorzugt abgearbeitet werden. Diese bedeutet, dass die Marken zunächst in der Reihenfolge ihrer Priorität und bei gleicher Priorität in der Reihenfolge ihres Eintreffens in die Warteschlange einsortiert und abgearbeitet werden. Trifft demnach eine Marke mit einer zugewiesenen Priorität ein, so wird sie vor alle Marken mit einer geringeren Priorität jedoch hinter allen Marken mit höherer oder gleicher Priorität in die Warteschlange einsortiert.

Neben dem Warteschlangenprinzip wird zudem festgelegt, ob diese Stelle für eine **Kostenberechnung** mitberücksichtigt wird. Durch die Zuordnung der Kostenvariablen  $CV$  wird bestimmt, in welcher Variablen die Kosten aufsummiert werden. Zudem bestimmt die Zuordnung des Kostenfaktors  $CF$ , in welcher Höhe die Belegungsdauer dieser Stelle in der Kostenvariablen berücksichtigt wird. Damit können über die Bele-

gungsdauer der Stellen zeitabhängige Kosten ermittelt werden. Wird zum Beispiel die Stelle für den Zustand „In Reparatur“ betrachtet, so kann eine Kostenvariable „Instandhaltungskosten“ und ein Kostenfaktor von „60“ zugeordnet werden, so dass ein Stundenlohn von 60€ für eine Reparaturstunde veranschlagt und in den „Instandhaltungskosten“ mit aufsummiert wird.

Zuletzt wird die **Anfangsmarkierung** der Stelle über die Funktion  $IP$  festgelegt. Diese bestimmt, ob die Stelle zu Beginn mit einer Marke bzw. mehreren Marken belegt ist und welche Information der Marke bzw. den Marken zu Beginn zugeordnet wurde. In Bild 6.4 bedeutet der Initialisierungsausdruck „ $1'(0)$ “, dass zu Beginn der Zustand „intakt“ mit einer „1“ Marke belegt ist, die den Wert „0“ besitzt, der für das Anfangsalter der modellierten Maschine steht.

Auf eine Stelle kann mit Hilfe einer **Referenzstelle** verwiesen werden. Diese ist ein Spiegelbild der eigentlichen Stelle – alles, was in der Originalstelle passiert, ereignet sich ebenso in der Referenzstelle und umgekehrt – und dient einer übersichtlicheren Modellierung. Die Referenzstelle wird wie Bild 6.4 zeigt durch einen Doppelkreis dargestellt. Da sie nur eine Referenz darstellt, werden ihre Eigenschaften durch die Originalstelle definiert.

## Transitionen

Bei den Transitionen werden im Wesentlichen zwei verschiedene Klassen unterschieden. **Unmittelbare Transitionen** schalten sofort, wenn die Aktivierungsbedingung erfüllt ist. Sie werden durch ein Quadrat mit der Beschriftung „0“ gekennzeichnet. **Zeitbehaftete Transitionen** auf der anderen Seite schalten erst nach Ablauf einer bestimmten Aktivierungsdauer. Der Schaltvorgang kann somit nach einer festen Zeitdauer (deterministisch) oder nach einer zufälligen Zeitspanne (stochastisch) gemäß verschiedener Verteilungsfunktionen stattfinden, wie sie in Abschn. 3.2 vorgestellt wurden. Diese **Schaltverzögerung** wird über die Funktion  $D$  zugeordnet, die ein deterministischer Wert  $T_{tri}$  oder eine bestimmte Verteilungsfunktion  $F_{tri}(t)$  mit den entsprechenden, auch stochastisch verteilten, Parametern sein kann. Diese zeitbehafteten Transitionen werden als Quadrat mit der Inschrift „ $\tau$ “ dargestellt, s. Bild 6.5.

unmittelbare Transition	zeitbehaftete Transition	Referenztransition
Filter Bau- teilvariante $tr_{22}$ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px;">0</div> $[bv = a]$	Lebens- dauer $tr_{10}$ <div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px;"><math>\tau</math></div> Wb AgeIn	Lebens- dauer $rtr_1/tr_{10}$ <div style="display: inline-block; border: 3px double black; padding: 5px; margin: 5px;"><math>\tau</math></div> Wb AgeIn

Bild 6.5: Übersicht verschiedener Transitionsarten

Da die nachfolgende Simulation immer nur einen einzelnen Schaltvorgang gleichzeitig abarbeitet und um mögliche Konflikte und Konkurrenzsituationen zu lösen, die bei gleichzeitigem Schaltzeitpunkt verschiedener Transitionen auftreten könnten, werden den Transitionen jeweils eine **Schaltpriorität  $\Pi$**  und ein **Gewicht  $W$**  zugeordnet.

Bei gleichzeitiger Schaltbereitschaft verschiedener Transitionen schaltet zunächst die Transition mit der höchsten Schaltpriorität. Besitzen mehrere aktivierte und schaltbereite Transitionen dieselbe Schaltpriorität, wird über das Gewicht wahrrscheinlichkeitstheoretisch ermittelt, welche der Transitionen zuerst schaltet. Die Wahrscheinlichkeit mit der eine der bereiten Transitionen schaltet, berechnet sich gemäß

$$Pr(tr_k) = \frac{W(tr_k)}{\sum W(tr_i)} \text{ mit } tr_i \text{ schaltbereit.} \quad (6.1)$$

Besitzen beispielsweise drei schaltbereite Transitionen die Gewichte 2, 3 und 5, so schaltet die erste Transition mit einer Wahrscheinlichkeit von 20%, die zweite von 30% und die dritte schaltet mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% zuerst.

Beiden oben beschriebenen Klassen an Transitionen kann über die **Wächterbedingung  $G$**  eine Boolesche Funktion zugeordnet werden, die aus einzelnen Booleschen Ausdrücken aufgebaut ist. Ist diese Funktion für eine Marke bzw. für mehrere Marken – je nach Kantenausdruck – erfüllt, so darf die Transition eine Bindung zu dieser Marke aufbauen und je nach Art der Transition direkt oder nach einer entsprechenden Aktivierungsdauer feuern. Diese Booleschen Ausdrücke können bestimmte Abfragen auf Werte von Variablen sein, z. B. die geforderte Bauteilvariante [ $bv = a$ ]. Diese Transition darf somit nur eine Bindung zu einer Marke aufbauen, die als Variablenwert für die Bauteilvariante „bv“ den Wert „a“ besitzt und diese für den Schaltvorgang nutzen.

Den zeitbehafteten Transitionen wird zudem ein **Schaltverfahren** zugeordnet. Beim Schaltverfahren „**Enabling Memory**“ werden beim Schalten einer beliebigen Transition die Schaltzeiten aller deaktivierten zeitbehafteten Transitionen verworfen. Alle weiterhin aktivierten zeitbehafteten Transitionen behalten ihre ursprüngliche Schaltverzögerung bei. War eine Transition auf diese Weise aktiviert und wird danach deaktiviert, so wird bei einer erneuten Aktivierung eine neue Schaltverzögerung gewürfelt. Beim Schaltverfahren „**Age Memory**“ behalten beim Schalten einer Transition alle zeitbehafteten Transitionen ihre ursprünglichen Schaltverzögerungen  $t_{\text{Fire},1}$  bei. Dies bedeutet, das bis dahin erreichte Alter  $Age_{\text{Exit},1}$  (bis dahin erreichter Wert der Verteilungsfunktion  $F_k(t_{\text{Exit},1})$ ), wird bei einer erneuten Aktivierung als Eintrittsalter  $Age_{\text{Enter},2}$  genutzt, s. Bild 6.6. Wird somit eine Transition deaktiviert, wird ihre Schaltzeit nicht verworfen, sondern die verbliebene Schaltverzögerung gespeichert und bei einer Wiederaktivierung als neue Schaltverzögerung bis  $t_{\text{Fire},2}$  verwendet. Das Schaltverfahren

„Age Influence“ ermöglicht die Abbildung von unterschiedlichem Alterungsverhalten in verschiedenen Zuständen, beispielsweise unterschiedlichen Laststufen. Über dieses Verfahren kann die aktuelle Alterung bei Verlassen eines Zustands  $Age_{Fire,2}$  (Wert der Verteilungsfunktion  $F_k(t_{Fire,2})$ ) oder bei Deaktivierung  $Age_{Exit,1}$  (Wert der Verteilungsfunktion  $F_k(t_{Exit,1})$ ) der Transition  $tr_k$  über eine Variable an die nächste Transition  $tr_{k+1}$  übermittelt werden. Diese Transition nimmt dieses Alter  $Age_{Exit,1}$  als Eintrittsalter  $Age_{Enter,2}$  und rechnet das bis dahin erreichte Alter  $Age_{Exit,1}$ , bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit  $F_k(t_{Exit,1})$ , in den Zeitraum um, der in diesem Zustand, gemäß der zugehörigen Transition  $tr_{k+1}$ , bis zum Erreichen dieser Alterung benötigt worden wäre  $\bar{t}_{Exit,1} = F_{k+1}^{-1}(Age_{Exit,1})$ . Dieser Zeitraum wird als bereits verstrichene Aktivierungszeit bei der Ermittlung der Zeitdauer bis zum Feuern der Transition berücksichtigt. Eine andere Möglichkeit für die Anwendung dieses Schaltverfahren besteht in der Möglichkeit, das bis dahin erreichte Alter  $Age_{Exit,1}$  z. B. zu reduzieren, wie dies bei einer Instandhaltung erfolgt. Die Informationen, welche Variable den Alterungswert trägt und wie das Alter weiterhin übergeben wird, wird über Kantenausdruck und -funktionen an die Transition übermittelt und im Folgenden näher erläutert. In Bild 6.6 ist entsprechend das Alterungsverhalten einer Komponente für die drei verschiedenen Schaltverfahren aufgezeigt, wobei die Komponente während der Deaktivierung bei der Modellierung mit dem Schaltverfahren „AgeInfluence“ einen Alterszuwachs in einem anderen Zustand hatte, wodurch  $Age_{Exit,1} \neq Age_{Enter,2}$  ist. Das gesamte Konzept der Alterung ist im Detail in [Poz2005] beschrieben.

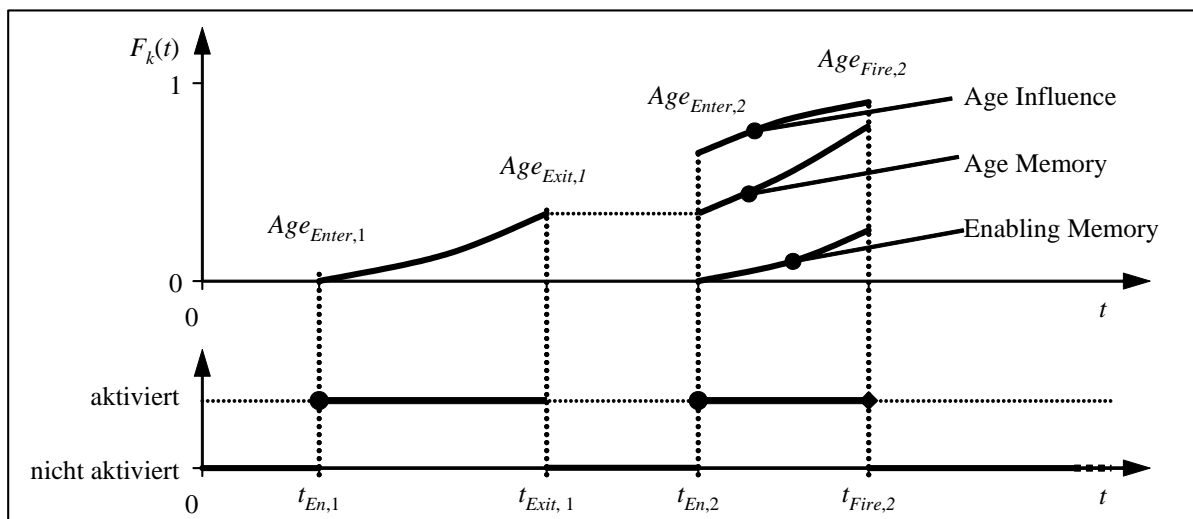


Bild 6.6: Schaltverfahren „AgeInfluence“ angepasst nach Poszgai [Poz2005]

Als letzte Eigenschaft kann den Transitionen ähnlich wie den Stellen eine Kostenvariable  $CV$  und ein entsprechender Kostenfaktor  $CF$  für eine **Kostenberechnung** zugeordnet werden. In diesem Fall werden die aktionsbezogenen Kosten ermittelt. Dies bedeutet, dass bei jedem Schaltvorgang der Transition ein Wert in Höhe des Kosten-

faktors zum aktuellen Wert der gewählten Kostenvariablen hinzuaddiert wird. Wird zum Beispiel die Transition für die „Reparaturdauer“ betrachtet und es wird wieder die Kostenvariable „Instandhaltungskosten“ und ein Kostenfaktor von „200“ zugeordnet, so kann abgebildet werden, dass Ersatzteilkosten von 200€ für jede Reparatur veranschlagt werden, die ebenfalls in den „Instandhaltungskosten“ mit aufsummiert werden.

Um eine Dekomposition des Modells zu ermöglichen, können zudem ebenfalls **Referenztransitionen** eingesetzt werden. Diese werden als Doppelquadrate dargestellt (s. Bild 6.5) und sind ebenfalls ein Spiegelbild der Originaltransition, d. h. schaltet die Originaltransition, so schaltet auch die Referenztransition und umgekehrt.

### Kanten

Die Kanten werden in drei Arten unterteilt: Normalkante, Lese-kante und Verbotskante. Die **Normalkante** führt entweder von einer Stelle zu einer Transition oder von einer Transition zu einer Stelle. Normalkanten bilden die mögliche Struktur der Übergänge zwischen verschiedenen Zuständen bzw. Objekten ab. Lese-kanten und Verbotskanten können nur von einer Stelle zu einer Transition führen. **Lese-kanten** werden durch einen Doppelpfeil gekennzeichnet. Sie ermöglichen die Abfrage von Nebenbedingungen, die gelten müssen, damit eine Aktivierung erfolgen kann. Der Schaltvorgang einer Transition beeinflusst die Menge der Marken in einer durch einen Lese-kante an die Transition angeschlossenen Stelle nicht. Eine **Verbotskante** wird durch eine Linie mit einem kleinen Kreis am zur Transition zeigenden Ende abgebildet. Sie stellt eine negierte Lese-kante dar, d. h. sie ermöglicht die Abfrage von Bedingungen, die nicht erfüllt sein müssen, damit eine Transition aktiviert ist und schalten kann. Über diese Kante werden ebenfalls keine Marken gelöscht oder erzeugt.

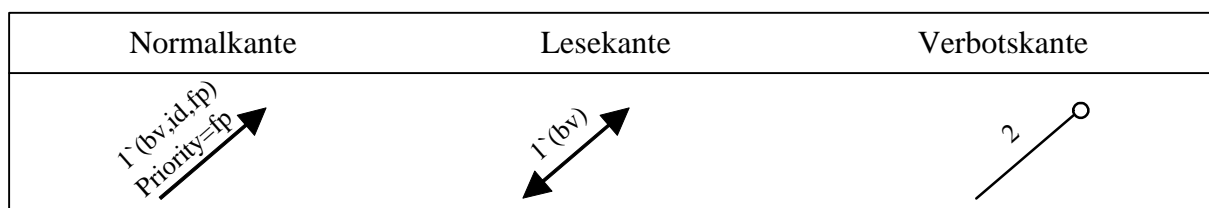


Bild 6.7: Übersicht verschiedener Kantenarten

Den Kanten werden Kantenausdrucksfunktionen und Kantenfunktionen zugeordnet. Die **Kantenausdrucksfunktion** ordnet jeder Kante ein Vielfaches der Farbenmenge jener Stelle zu, mit der sie verbunden ist. Sie regeln den Informationsfluss innerhalb des Petrinetzes. Für Eingangskanten der Transitionen wird über die Kantenausdrucksfunktion der Informationsfluss von der Eingangsstelle zu den lokalen Variablen der Transition gewährleistet. Nach dem Schaltvorgang werden über den Kantenausdruck der Ausgangskante die Informationen der lokalen Variablen der Transition den neu

erzeugten Marken zugeordnet. Neben konstanten Werten, Variablen und Rechenoperationen existieren weitere spezielle Ausdrücke für die Verwendung in Kantenausdrücken von Ausgangskanten der Transitionen für die Abbildung der Alterung und der Instandhaltung. Diese sind „AgeFire“, „AgeExit()“, „TimeToFiring()“, und „Uniform()“ bzw. „Normal()“. Durch den Kantenausdruck „1\` (AgeFire)“ wird beim Schalten der Transition eine Marke erzeugt, der die Alterung beim Schalten der der Transition zugeordnet wird [Poz2005]. Der Ausdruck „1\` (AgeExit( $tr_k$ ))“ ordnet der Marke beim Schalten der Transition  $tr_m$  die bis dahin erreichte Alterung an einer anderen Transition  $tr_k$  zu [Poz2005]. Entsprechend versieht der Ausdruck „1\` TimeToFiring( $tr_k$ )“ beim Schalten der Transition  $tr_m$  die Marke mit der Zeit, die die Transition  $tr_k$  noch bis zur Schaltung benötigt hätte. Über die Ausdrücke „Uniform()“ bzw. „Normal()“ werden die Variablen mit gleich- bzw. normalverteilten Werten belegt.

Über den Kanteausdruck „1\` (Insp( $tr_k$ ,  $T_{I,i}$ ,  $Age_i(t_i)$ ,  $Age_{Rel,Limit}$ ,  $Code_{True}$ ,  $Code_{False}$ ))“ wird prognostiziert, ob das anwachsende Alter über die Transition  $tr_k$  zu der aktuellen Alterung  $Age_i(t_i)$  im Inspektionsintervall  $T_{I,i}$  ein bestimmtes Grenzalter  $Age_{Rel,Limit}$  überschreitet. Liegt das prognostizierte Alter oberhalb des Grenzalters, so wird  $Code_{True}$  ausgegeben, andernfalls  $Code_{False}$  [Poz2004b]. Dieser Ausdruck ermöglicht ähnlich wie der vorhergehende Ausdruck die Abbildung der zustandsorientierten Instandhaltung.

Der Kanteausdruck 1\` (Uniform(50,100,inclusive)) erzeugt eine Marke, der eine gleichverteilte Zufallszahl zwischen einschließlich 50 und 100 zugeordnet wird. Ebenso wird durch den Ausdruck „1\` (Normal(5,1))“ der Wert der Marke mit einer Normalverteilten Zufallszahl belegt mit Mittelwert  $\mu = 5$  und Standardabweichung  $\sigma = 1$ . Diese Zufallszahlen werden benötigt, um zufällige Reparaturgrade oder einen stochastischen Preisprozess abbilden zu können [Jäg2006].

Die **Kantenfunktionen** stellen Sonderregeln für den Informationsfluss dar. Sie sind für die Beschreibung des Zustandverhaltens, das Konzept der Alterung, die Veränderung globaler Variablen und für die Warteschlangenregel notwendig. Mit der Funktion „AgeEnter = *expression*“ kann einer Transition mit dem Schaltverfahren „AgeInfluence“ eine Voralterung übergeben werden [Pozs2005]. Die Funktion „Set(gv\_name = *expression*)“ dient der Wertzuweisung an eine globale Variable mit dem Name gv\_name eines ECSPN. Die Kantenfunktion „Priority = *expression*“ weist einer neu erzeugten Marke in einer Warteschlangenstelle eine dynamische Prioritätszahl zu, die für die Reihenfolge in der Warteschlange eingesetzt werden soll. Der zugewiesene Ausdruck *expression* kann dabei bei allen Kantenfunktionen ein konstanter Wert oder der Wert einer lokalen oder eine globalen Variablen sein.

### 6.3.3 Beispiel eines ECSPN

Anhand eines Ausschnitts einer Zahnradfertigung werden im Folgenden der Aufbau und die Funktionsweise der ECSPN erläutert. Dabei werden die beiden ersten Fertigungsschritte – das Sägen und das Drehen – dargestellt, wobei die Säge auf Grund von Ausfällen und Instandhaltungsmaßnahmen zwischenzeitlich für den Produktionsprozess nicht zur Verfügung steht.

Im ersten Schritt der Modellierung erfolgt die Deklaration der Farben und Variablen. Dafür wurde eine Farbe  $E$  und eine Variable  $e$  der Farbe  $E$  deklariert, die eingesetzt wird, wenn keine Informationen übermittelt werden müssen. Für die Beschreibung der produzierten Bauteile werden wiederum Farben für die Bauteilvarianten  $BV$ , die Auftrags-ID  $ID$  und Fertigungspriorität  $FP$  mit zugehörigen Variablen sowie deren Produkt  $Bauteil$  festgelegt. Zudem werden für das Sägenalter  $Alter$  und die Überlebenszeit bis zum Ausfall der Säge  $Zeit$  Farben mit entsprechenden Variablen  $a$  und  $z$  für die Beschreibung des Ausfallverhaltens benötigt. Die Variable  $r$  der Farbe  $R$  wird mit dem Wert des Reparaturgrades belegt, der die Güte einer Reparatur kennzeichnet. Die Kostenvariable  $Kosten$  der Farbe  $C$  wird für die Modellierung der anlaufenden Instandhaltungskosten genutzt.

color $E$	= int;	var $e : E$ ;
color $BV$	= string;	var $bv : BV$ ;
color $ID$	= int;	var $id : ID$ ;
color $FP$	= int;	var $fp : FP$ ;
color $Bauteil$	= product $BV * ID * FP$ ;	var $a : Alter$ ;
color $Alter$	= int;	var $z : Zeit$ ;
color $Zeit$	= real;	var $r : R$ ;
color $AlterZeit$	= product $Alter * Zeit$ ;	costVar $Kosten : C = 0.0$ ;
color $R$	= real;	
color $C$	= real;	

Bild 6.8: Deklaration der Farben und Variablen des Beispiels

Im ersten Schritt des modellierten Teilsystems erfolgt der Auftragseingang. Dabei sind zu Beginn in der Stelle  $p_1$  insgesamt 17 Marken entsprechend dem Initialisierungsausdruck „ $5(a)+3(b)+9(c)$ “ vorhanden: fünf Marken der Bauteilvariante  $BV = a$ , drei Marken der Variante  $BV = b$  und neun Marken der Variante  $BV = c$ . Die Stelle  $p_2$  ist mit einer Marke belegt, die den Wert „2“ für die Zuweisung der Fertigungspriorität besitzt. Die Stelle  $p_3$  ist zu Beginn mit einer Marke mit dem Wert „12“ besetzt. Dementsprechend sind alle drei Eingangsstellen der Transition  $tr_1$  entsprechend dem Kanten-gewicht belegt, die Transition kann demnach mit einer beliebigen Marke aus  $p_1$

(z. B.  $1'(c)$ ) sowie den Marken aus  $p_2$  und  $p_3$  eine Bindung aufbauen und die Variablenwerte übernehmen. Die Transition ist aktiviert und kann sofort schalten, s. Bild 6.9.

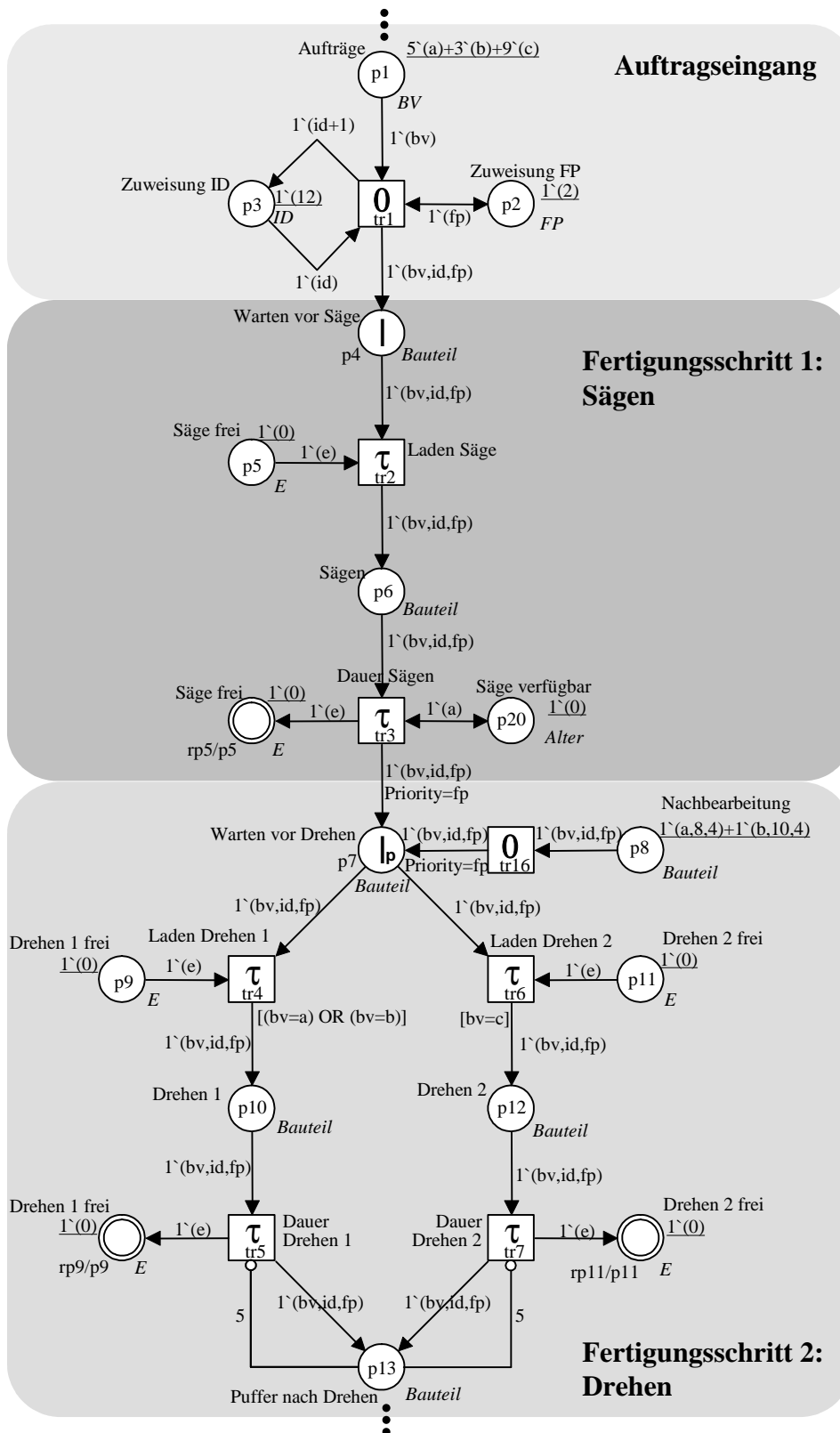


Bild 6.9: Modell des Fertigungsprozesses



Beim Schaltvorgang wird die gebundene Marke  $1'(c)$  aus  $p_1$  und die Marke aus  $p_3$  gelöscht sowie die Information der Marke aus  $p_2$  eingelesen. Es wird eine neue Marke in  $p_4$  erzeugt. Diese trägt als Informationen die Bauteilvariante „c“, die Auftrags-ID „12“ und die Fertigungspriorität „2“. Zudem wird in der Stelle  $p_3$  eine neue Marke erzeugt, mit dem Wert „13“, da der Wert der Auftrags-ID bei jedem Schaltvorgang über den Kantenausdruck „ $1'(id+1)$ “ um eins erhöht wird. So wird die Transition  $tr_1$  17mal schalten, bis keine Marken mehr in der Stelle  $p_1$  vorhanden sind.

Diese Marken warten nun in der Stelle  $p_4$  auf ihre Abarbeitung. Für die Abarbeitung wurden die Marken entsprechend ihrer Ankunft (FIFO) in die Stelle  $p_4$  einsortiert, da ihr eine Warteschlangenstrategie FIFO zugewiesen wurde.

Ist die Säge frei ( $p_5$  mit einer Marke belegt), so wird die Säge mit Rohmaterial beladen – die Transition  $tr_2$  schaltet. Dabei wird nach einer deterministischen Zeitverzögerung  $\tau_2$  die erste Marke aus der Warteschlange von  $p_4$  ebenso wie die Marke in  $p_5$  gelöscht und es wird eine Marke in  $p_6$  erzeugt, die die Daten der Marke aus  $p_4$  weiterhin mit sich führt, z. B.  $1'(c,12,2)$ . Nun findet der Vorgang des Sägens statt. Der Vorgang ist nach Ablauf einer konstanten Zeit  $\tau_3$  abgeschlossen – die Transition  $tr_3$  schaltet. Da der Transition  $tr_3$  als Schaltverfahren „EnMem“ zugewiesen wurde und sie über eine Lesekannte mit der Stelle  $p_{20}$  „Säge verfügbar“ verbunden ist, muss  $p_{20}$  während der Dauer des Sägevorgangs durchgängig mit einer Marke belegt sein. War dies der Fall, so schaltet die Transition  $tr_3$ , gibt die Säge wieder frei (Marke in  $p_5$ ) und sortiert eine Marke in der Stelle  $p_7$  gemäß der Warteschlangenverfahren FIFO mit Priorität ein. Dafür wird der Warteschlangenstell über die Kantenfunktion „Priority = fp“ übermittelt, dass die Variable fp den Wert für die Priorität trägt. Dies ist hierbei notwendig, da weitere Aufträge zur Nacharbeit anliegen ( $p_8$ ), die bevorzugt mit einer Priorität von „4“ im nächsten Arbeitsschritt berücksichtigt werden sollen.

Im nächsten Schritt wird das Drehen der Bauteile abgebildet. Hierbei stehen zwei Drehmaschinen zur Verfügung, wobei Drehmaschine 1 Bauteilvarianten „a“ und „b“ und Drehmaschine 2 Bauteilvariante „c“ bearbeitet. Die Wächterbedingung an  $tr_4$   $[(bv=a) \text{ OR } (bv=b)]$  stellt sicher, dass die Transition nur Bindungen zu Marken aufbaut, die als Wert für die Bauteilvariante „a“ oder „b“ besitzen. Ist eine solche Marke an erster Position der Warteschlange und ist die Stelle  $p_9$  „Drehmaschine 1 frei“ mit einer Marke belegt, so kann die Drehmaschine geladen werden ( $tr_4$ ) und der Drehvorgang ( $tr_5$ ) findet statt. Ist allerdings die Marke  $1'(c,12,2)$  an erster Stelle der Warteschlange, so stellt die Transition  $tr_6$  eine Bindung zu dieser Marke her. Ist die Stelle  $p_{11}$  „Drehmaschine 2 frei“ belegt, ist  $tr_6$  aktiviert und führt zeitverzögert nach der Zeitdauer  $\tau_6$  den Schaltvorgang durch. Danach ist die Transition  $tr_7$  aktiviert, schaltet nach Ablauf der Zeitdauer  $\tau_7$  und gibt die Drehmaschine 2 wieder frei und erzeugt eine Marke in  $p_{13}$  „Puffer nach Drehen“. Auf Grund der Verbotskannte mit Kantengewicht „5“ gilt:

Ist die Stelle  $p_{13}$  mit fünf Marken belegt, so sind  $tr_5$  und  $tr_7$  nicht mehr aktiviert. Dies bedeutet bezogen auf den Fertigungsprozess, dass dieser Puffer auf fünf Bauteile beschränkt ist und die vorhergehenden Prozessschritte blockiert, wenn die Befüllung die Kapazitätsgrenze erreicht hat. Danach folgen weitere Prozessschritte, die hier nicht weiter dargestellt werden.

Für den ersten Prozessschritt – das Sägen – ist wie oben beschrieben eine der Voraussetzungen, dass die Säge verfügbar ist ( $p_{20}$ ). Die Säge kann aus drei verschiedenen Gründen nicht verfügbar sein, s. Bild 6.10.

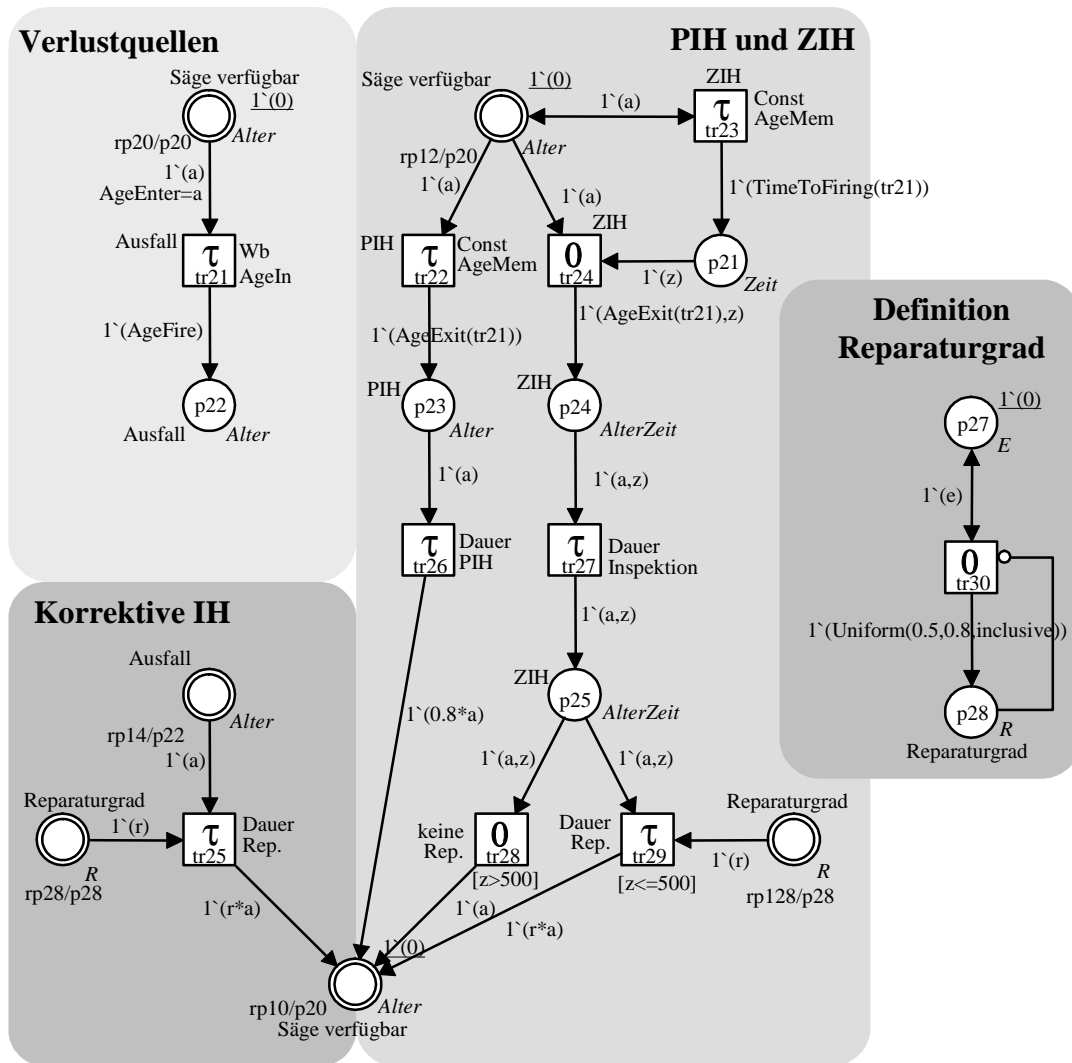


Bild 6.10: Modell der Verlustquellen und Instandhaltung

Zum einen können Maschinenausfälle dazu führen, dass die Maschine nicht zur Verfügung steht. Über die Transition  $tr_{21}$  wird das zufällige Ausfallverhalten der Maschine mit Hilfe einer Weibullverteilung modelliert. Dieser Transition wird das Schaltverfahren „AgeInfluence“ zugewiesen, um das Alter der Maschine bei einem Ausfall oder einer zuvor durchgeführten Instandhaltungsmaßnahme oder die verbleibende Zeit bis

zum Ausfall dieser Maschine auslesen zu können. Kommt es nach einer zufälligen Zeit zum Ausfall der Säge –  $tr_{21}$  schaltet – wird die Marke in  $p_{20}$  gelöscht und eine neue Marke in  $p_{22}$  erzeugt. Dieser Marke wird als Wert das bis zum Schalten der Transition erreichte Alter zugewiesen.

Bei einem Ausfall wird eine korrektive Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt. Transition  $tr_{25}$  ist aktiviert und schaltet nach Ablauf einer zufälligen Reparaturdauer. Dabei werden die Marken in  $p_{22}$  und  $p_{28}$  gelöscht und eine neue Marke erzeugt, der ein reduziertes Alter zugewiesen wird ( $1 \cdot (r \cdot a)$ ). Der Variablenwert  $r$  definiert den Reparaturgrad. Für einen Wert  $r = 0$  würde eine komplette Erneuerung (neues Alter gleich null) für einen Wert  $r = 1$  eine minimale Erneuerung (neues Alter gleich vorheriges Alter) stattfinden. Um zufällige Reparaturgrade abzubilden, werden an der Transition  $tr_{30}$  über die Kantenfunktion  $1 \cdot (\text{Uniform}(0.5, 0.8, \text{inclusive}))$  Zufallszahlen zwischen 0,5 und 0,8 für den Wert  $r$  erzeugt. Ist die Reparatur erfolgt –  $tr_{25}$  schaltet – ist die Säge wieder verfügbar.

Zum anderen kann die Säge auf Grund von Instandhaltungsmaßnahmen nicht verfügbar sein. Die beiden Instandhaltungsmaßnahmen untergliedern sich in planmäßige (PIH) und zustandsorientierte Instandhaltungen (ZIH).

Die planmäßigen Instandhaltungsmaßnahmen werden so modelliert, dass die Transition  $tr_{23}$  nach einer konstanten Aktivierungsdauer von 2400 h schaltet. Dabei wird die Marke in  $p_{20}$  gelöscht – die Säge ist nicht mehr für den Produktionsprozess verfügbar – und es wird eine neue Marke in  $p_{23}$  erzeugt. Diese trägt als Wert das bis dahin erreichte Alter gemäß  $tr_{21}$ . Wird die planmäßige Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt ( $tr_{26}$ ), so benötigt dieser Vorgang eine bestimmte Zeitdauer und das bis dahin erreichte Alter wird durch den Kantenausdruck ( $1 \cdot 0.8 \cdot a$ ) auf 80% des Wertes reduziert.

Für die zustandsorientierten Instandhaltungsmaßnahmen wird über die Transition  $tr_{23}$  alle 500 h eine Marke erzeugt. Diese Marke beinhaltet mit dem Kantenausdruck „ $1 \cdot (\text{TimeToFiring}(tr_{21}))$ “ als Wert die verbleibende Zeit bis die Transition  $tr_{21}$  schalten würde, bis es somit zum Ausfall käme. Nachdem diese Marke erzeugt ist, ist Transition  $tr_{24}$  aktiviert, schaltet und prägt der Marke als zweiten Wert das bis zu diesem Zeitpunkt erreichte Alter gemäß  $tr_{21}$  auf „ $1 \cdot (\text{AgeExit}(tr_{21}), z)$ “. Nach Ablauf der Zeitdauer  $\tau_{27}$  für die Inspektion wird die Marke in  $p_{24}$  gelöscht und eine neue Marke mit den zuvor ermittelten Werten (Restlebenszeit und Alter) in  $p_{25}$  erzeugt. Über die Wächterbedingungen an den beiden konkurrierenden Transitionen  $tr_{28}$  „keine Reparatur“ und  $tr_{29}$  „Dauer Reparatur“ wird entschieden, welche der beiden Transitionen eine Bindung zu der Marke aufbauen kann, aktiviert ist und schaltet. Ist die ermittelte Restlebensdauer größer als 500 h „ $[z > 500]$ “, dem Zeitraum bis zur nächsten Inspektion, ist  $tr_{28}$  „keine Reparatur“ aktiviert und schaltet sofort, da keine Reparatur stattfindet.

Dabei wird der in  $p_{20}$  „Säge verfügbar“ erzeugten Marke als Wert das unveränderte Alter zugewiesen. Ist andererseits die Restlebensdauer kleiner oder gleich dem Zeitraum bis zur nächsten Inspektion „ $[z \leq 500]$ “, dann muss eine Reparatur durchgeführt werden, um einen Ausfall bis zur nächsten Inspektion zu verhindern. Die Transition  $tr_{29}$  „Dauer Reparatur“ ist aktiviert und schaltet nach Ablauf einer stochastischen Reparaturdauer. Dabei wird die Marke in  $p_{25}$  gelöscht und eine neue Marke mit zufällig verringertem Alter „ $1 \cdot (r \cdot a)$ “ erzeugt. Dadurch ist die Säge wieder verfügbar und das veränderte Alter kann für eine Anpassung des Sägenausfallverhaltens  $tr_{21}$  genutzt werden.

## 6.4 Analyse des Modells

Für die Analyse des Petrinetzmodells wird eine ereignisdiskrete zweistufige Monte-Carlo-Simulation genutzt.

### 6.4.1 Grundlagen der Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation ist ein Verfahren, bei dem über eine Vielzahl durchgeführter Zufallsexperimente mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie eine numerische Lösung für ein analytisch unlösbares Problem gesucht wird [Met1949, Dub2000, Mar2002]. Durch eine hohe Anzahl an zufälligen Realisierungen wird eine Näherung für den gesamten Wahrscheinlichkeitsraum durchgeführt, begründet über das Gesetz der großen Zahlen.

Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation kann z. B. eine Abschätzung des Erwartungswerts einer Zufallsgröße durchgeführt werden. Diese Abschätzung ist notwendig, wenn die betrachtete Verteilungsfunktion sehr komplex ist oder sich aus einer Vielzahl von einzelnen überlagerten Funktionen zusammensetzt, so dass eine analytische Lösung nicht mehr möglich ist.

Im Folgenden wird vorausgesetzt, dass ein zweites Moment der zu untersuchenden Zufallsgröße existiert.

Der Erwartungswert  $E(\theta)$  einer Zufallsgröße  $\theta$  mit der Dichtefunktion  $f(\theta)$  ist definiert als

$$E(\theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \theta \cdot f(\theta) d\theta. \quad (6.2)$$

Liegen  $N$  Realisierungen der Zufallsgröße  $\theta$  als  $\theta_i$ ,  $i = 1(1)N$  vor, die unabhängig und identisch verteilt sind, so folgt aus dem Gesetz der großen Zahlen, dass die Größe  $\hat{\theta}$  mit

$$\hat{\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i \quad (6.3)$$

eine asymptotisch erwartungstreue Schätzung für den Erwartungswert liefert, so dass

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \hat{\theta} = E(\theta) = \bar{\theta} \quad (6.4)$$

gilt. Das bedeutet, dass der arithmetische Mittelwert für  $N \rightarrow \infty$  gegen den Erwartungswert konvergiert [Fis1996, VDI1999b].

Da keine unendliche Anzahl an Realisierungen untersucht werden kann, kann nicht direkt  $\bar{\theta} = \hat{\theta}$  gesetzt werden.

Gemäß dem zentralen Grenzwertsatz gilt, dass eine Zufallsgröße annähernd normalverteilt ist, wenn sie die Summe einer großen Anzahl an voneinander unabhängigen Zufallsgrößen darstellt [Kle1993, Bro2001]. Somit kann die Genauigkeit, mit der dieser Erwartungswert abgeschätzt wird, über den zentralen Grenzwertsatz erfolgen. Dieser besagt, dass bei  $t_i$ ,  $i = 1(1)N$  unabhängigen normalverteilten Zufallsvariablen und bekanntem Erwartungswert  $E(\tau)$  und bekannter Varianz  $\sigma^2$  für die Zufallszahl  $\hat{\tau}$

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P\left(\left|\bar{\theta} - E(\theta)\right| \leq \frac{x \sigma}{\sqrt{N}}\right) = \lim_{N \rightarrow \infty} P\left(-\frac{x \sigma}{\sqrt{N}} \leq \bar{\theta} - E(\theta) \leq \frac{x \sigma}{\sqrt{N}}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-x}^{+x} e^{-u^2/2} du \quad (6.5)$$

gilt.

Daraus folgt, dass für  $x = 1, 2$  bzw.  $3$  der absolute statistische Fehler  $\varepsilon_{abs} = \left|\hat{\theta} - \bar{\theta}\right|$  mit einer Wahrscheinlichkeit von 68%, 95% bzw. 99,7% kleiner als  $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ ,  $\frac{2\sigma}{\sqrt{N}}$  bzw.  $\frac{3\sigma}{\sqrt{N}}$  ist. Somit hängt die Genauigkeit der Aussage über den Erwartungswert zum einen von der Anzahl der Messwerte (Replikationen) und zum anderen von der Streuung der Werte ab.

### 6.4.2 Erzeugung von Pseudozufallszahlen

Im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation wird über eine Anzahl an zufälligen Realisierungen eine Aussage das komplette stochastische Verhalten getroffen. Für die Erzeugung dieser zufälligen Realisierungen werden Generatoren für so genannte Pseudozufallszahlen benötigt. Um eine möglichst gute Aussage treffen zu können, sollten sich diese Generatoren auszeichnen durch eine hohe Unabhängigkeit der einzelnen Pseudozufallszahlen, eine große Periode (Abfolge wiederholt sich erst nach einer großen Anzahl an Werten), Reproduzierbarkeit, gleichverteilte Werte (alle möglichen Werte kommen mit gleicher Wahrscheinlichkeit vor) und eine schnelle und effiziente Berechnung [Ban2000].

Als Generator für den nachfolgend beschriebenen Simulationsalgorithmus wird der so genannte „Mersenne Twister“ genutzt, da er im Vergleich mit anderen Generatoren die zuvor genannten Anforderungen sehr gut erfüllt [Poz2005]. Er wurde speziell für die Verwendung in Monte-Carlo-Simulationen entwickelt und besitzt eine Periodenlänge von  $2^{19937} - 1$  (entspricht ca.  $10^{6000}$ ) sowie eine gute Gleichverteilung der erzeugten Pseudozufallszahlen [Mat1998]. Um die Pseudozufallszahlen für eine nachfolgende Transformation in verteilte Zufallszahlen nutzen zu können, werden sie auf das Intervall  $]0,1[$  bzw.  $[0,1]$  je nach der im Folgenden notwendigen Transformation normiert [Neb2005].

### 6.4.3 Ablauf der Simulation

Um ein Produktionssystem zu bewerten, dessen Eingangsparameter mit Unsicherheiten behaftet sind, können einerseits Randbetrachtungen durchgeführt werden. Aufgrund existierender Abhängigkeiten können andererseits Randbetrachtungen nur schwierig durchführbar sein. Denn es ist nicht unbedingt im Voraus bekannt, dass die Kombination der Obergrenzen aller unsicheren Parameter auch wiederum die Obergrenze des Endwertes ergibt. Durch diese mangelnde Monotonieeigenschaft aufgrund von Abhängigkeiten können die Parameter direkt mit ihren Unsicherheitsverteilungen eingesetzt werden. Dabei wird eine zweistufige ereignisorientierte Monte-Carlo-Simulation durchgeführt.

Die bestimmenden Ereignisse sind die Aktivierungen und die Schaltungen der Transitionen. Die Abarbeitung eines Ereignisses kann beispielsweise eine Markierungsänderung des ECSPN (Menge und Informationen der Marken) und somit eine Deaktivierung oder eine Neuaktivierung von Transitionen bewirken. In Bild 6.11 ist der Ablauf des Simulationsalgorithmus vereinfacht dargestellt.

Während eines Simulationslaufes wird eine vorgegebene Anzahl an Replikationen  $r = 1(1)N_{\text{Repl}}$  über eine Simulationszeit  $0 \leq t_{\text{Sim}} \leq t_{\text{SimEnd}}$  durchgeführt.

Zu Beginn erfolgt die Initialisierung der Replikation  $r$ . Dabei werden die Simulationszeit  $t$  und die Simulationsvariablen initialisiert sowie die Initialisierungsfunktionen des ECSPNs  $I$ ,  $IGV$  und  $ICC$  zur Generierung der Anfangsmarkierung  $M_0$  ausgewertet.

Nach der Initialisierung werden im ersten Schritt des Simulationsablaufes alle Transitionen  $tr_k$  ermittelt, die aktiviert sind. Aktiviert sind all die Transitionen, deren Eingangsstellen die entsprechende über die Kantenart und zugehörigen -ausdruck vorgegebene Anzahl an Marken besitzen und für die die Wächterbedingungen erfüllt sind. Für diese aktivierten Transitionen werden die zugehörigen Schaltverzögerungen ermittelt.

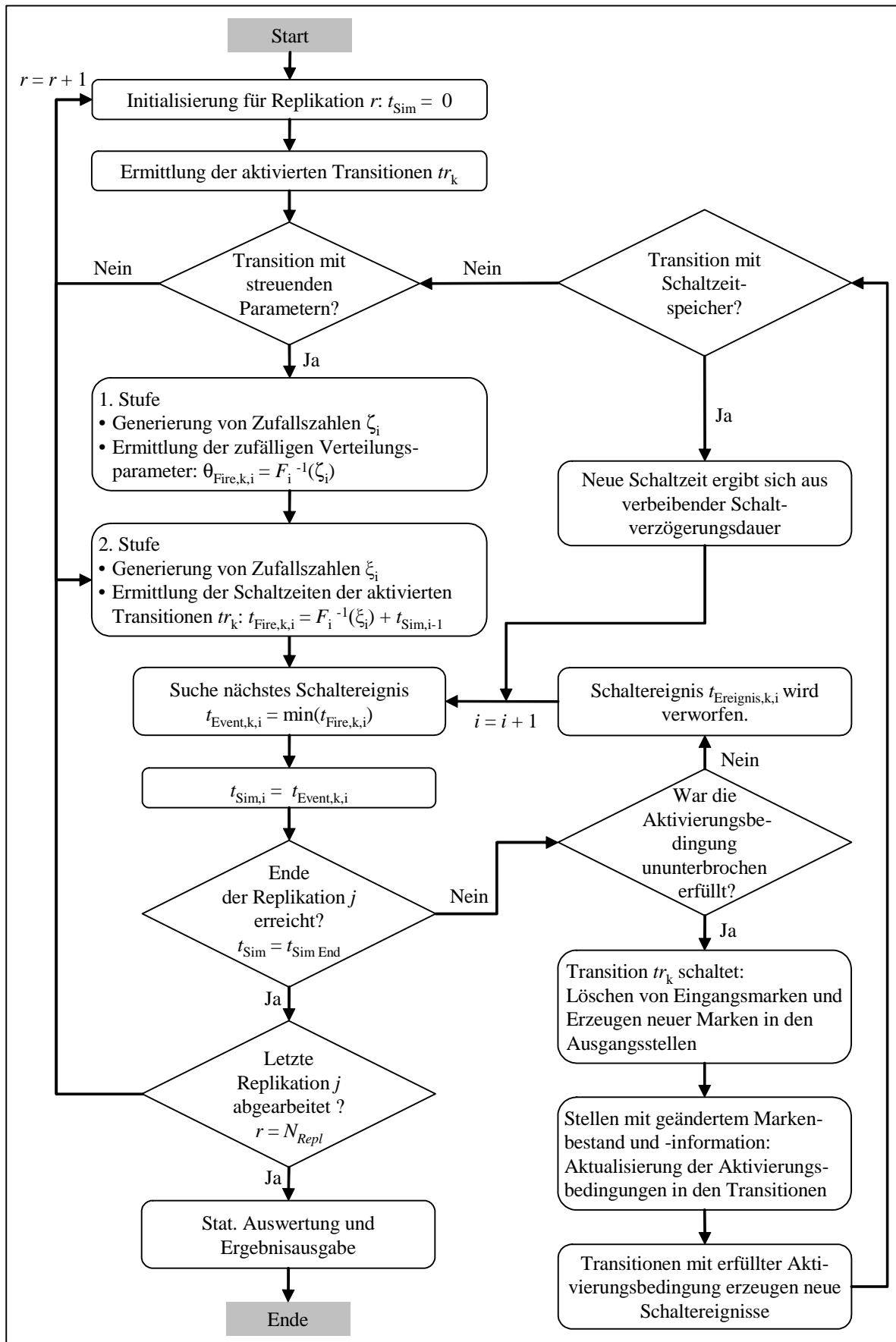


Bild 6.11: Ablauf der Simulation

Unmittelbare Transitionen schalten sofort und ohne Zeitverzögerung. Diese unmittelbaren Schaltereignisse werden gemäß ihrer Prioritäten und Gewichte abgearbeitet, d. h. es werden Marken gelöscht, neue Marken unter Umständen mit veränderter Information erzeugt und globale Variablen verändert. Für alle nach dem Schalten der unmittelbaren Transitionen weiterhin aktivierten zeitbehafteten Transitionen wird über eine zweistufige Monte-Carlo-Simulation die Zeit bis zum Schalten der Transition bestimmt. Zunächst wird ermittelt, ob es sich um eine Simulation mit unscharfen Parametern handelt. Bei zeitbehafteten Transitionen mit scharfen Parametern kann direkt zur zweiten Stufe übergegangen werden. Für zeitbehaftete Transitionen mit deterministischer Schaltverzögerung wird diese deterministische Angabe als Schaltverzögerung für die Transition übernommen.

Bei zeitbehafteten Transitionen mit stochastischer Schaltverzögerung erfolgt eine zufällige Ermittlung der Zeit bis zum möglichen Schaltvorgang der Transition. Dafür wird zunächst eine gleichverteilte Zufallszahl  $\xi_i$  zwischen Null und Eins erzeugt.

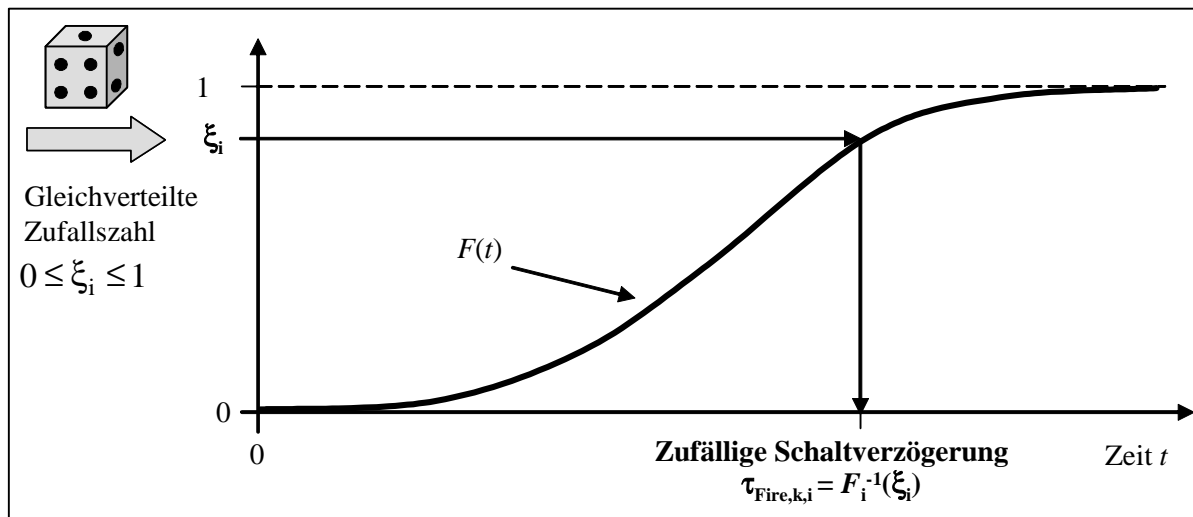


Bild 6.12: Ermittlung der stochastischen Schaltverzögerungen [Fri2001]

Für diese Zufallszahl  $\xi_i$  wird über die Inverse der Verteilungsfunktion  $F_i^{-1}$ , die die Zeitverzögerung einer Transition beschreibt, die Schaltverzögerung  $\tau_{\text{Schalt},k,i}$  der Transition ermittelt, s. Bild 6.12. Je nach Verteilungsfunktion  $F(t)$  erfolgt die Ermittlung der Inversen analytisch (Weibull-, Dreieck- und Exponentialverteilung) oder über Näherungsverfahren (Normal-, Lognormal- und Erlangverteilung) [Pre1992, Fri2001, Neb2006].

Bei zeitbehafteten stochastischen Transitionen mit unscharfen Parametern wird zunächst der Parameter der Verteilung ermittelt. Dafür wird ebenfalls eine gleichverteilte Zufallszahl  $\zeta_i$  zwischen Null und Eins erzeugt. Über die Inverse der Verteilung  $F_i^{-1}$ , die die Unschärfe des Parameters beschreibt, wird für diese Zufallszahl  $\zeta_i$  der zugehörige



rige Parameter ermittelt  $\theta_{\text{Fire},k,i} = F_i^{-1}(\zeta_i)$ . Erst in einem zweiten Schritt wird eine weitere gleichverteilte Zufallszahl  $\xi_i$  zwischen Null und Eins gewürfelt. Für diese Zufallszahl  $\xi_i$  wird über die Inverse der Verteilungsfunktion  $F_i^{-1}$ , die die Zeitverzögerung einer Transition beschreibt (jetzt mit scharfem Parameter  $\theta_{\text{Fire},k,i}$ ), die Schaltverzögerung  $\tau_{\text{Schalt},k,i}$  der Transition ermittelt. Für Transitionen mit scharfen Parametern entfällt wie oben beschrieben die erste Stufe der Monte-Carlo-Simulation.

Je nach vorgegebenem Schaltverfahren der Transitionen wird der Schaltzeitpunkt  $t_{\text{Fire},k,i}$  unterschiedlich ermittelt.

Für das Schaltverfahren „Enabling Memory“ ergibt sich der Schaltzeitpunkt als Summe der ermittelten Schaltverzögerung  $\tau_{\text{Fire},k,i} = F_i^{-1}(\xi_i)$  und dem bislang vorliegenden Simulationszeitpunkt  $t_{\text{Sim},i-1}$

$$t_{\text{Fire},k,i} = F_i^{-1}(\xi_i) + t_{\text{Sim},i-1}. \quad (6.6)$$

Beim Schaltverfahren „Age Memory“ wird bei einer Deaktivierung über die bisherige Aktivierungszeit  $\tau_{\text{Active},k,i}$  die verbleibende Aktivierungszeit  $\tau_{\text{Rest},k,i}$  bis zum Schalten zwischengespeichert

$$\bar{t}_{\text{Rest},k,i} = F_i^{-1}(\xi_i) - \tau_{\text{Active},k,i} \quad (6.7)$$

und als neue Zeitdauer  $t_{\text{Schalt},k,i+1}$  bis zum Schalten bei einer erneuten Aktivierung genutzt, so dass daraus folgt

$$t_{\text{Fire},k,i+1} = \tau_{\text{Rest},k,i} + t_{\text{Sim},i-1}. \quad (6.8)$$

Für das Schaltverfahren „Age Influence“ wird der Wert  $\text{Age}_{\text{Enter},k,i}$  der Voralterung in einem andern Zustand mitberücksichtigt, so dass sich die Zeit bis zum Schalten der Transition über die bedingte Wahrscheinlichkeit ergibt zu [Poz2005, Neb2006]

$$t_{\text{Fire},k,i} = \left[ F_{k,i}(t, t_{\text{Origin},k,i} | t_{\text{Sim},i-1}) \right]^{-1}(\xi_i). \quad (6.9)$$

Diese deterministischen oder zufälligen Schaltzeiten werden für alle aktivierten zeitbehafteten Transitionen ermittelt. Das Schaltereignis mit der geringsten Schaltzeit wird zuerst abgearbeitet  $t_{\text{Event},k,i} = \min(t_{\text{Fire},k,i})$ . Zunächst wird überprüft, ob die Transition während der kompletten Zeitdauer ununterbrochen aktiviert war. Ist dies der Fall, so findet der Schaltvorgang der Transition statt. Bei der Abarbeitung des Schaltereignisses werden entsprechend der Theorie der Petrinetze die Markenbesetzungen in der Eingangs- und Ausgangsstellen verändert sowie evtl. zusätzlich die Information, die die Marke mit sich trägt, über die Vorgabe des Kantenausdrucks der Ausgangskante abgeändert und globale Variablen über die Kantenfunktion manipuliert. Zusätzlich wird die Simulationszeit auf  $t_{\text{Sim},i} = t_{\text{Event},k,i}$  erhöht. Nach dem Abarbeiten dieser Transi-

tion wird mit der neuen veränderten Markenbelegung im Netz nach den nun aktivierten Transitionen gesucht und die Abarbeitung der Ereignisse startet wieder.

War die Transition nicht durchgängig aktiviert, so wird das Schaltereignis verworfen. Bei Transitionen mit Schaltzeitspeicher („Age Memory“) wird die bisherige Aktivierungsdauer gespeichert und die Schaltzeit bei einer Wiederaktivierung ergibt sich aus der verbleibenden Schaltverzögerung, s. oben. Bei Transitionen ohne Schaltzeitspeicher („Enabling Memory“ und „Age Influence“) wird die bisherige Aktivierungszeit der Transition verworfen.

Auf diese Art und Weise werden nach und nach die verschiedenen Ereignisse – Schaltvorgänge – abgearbeitet, bis das Ende der Simulation  $t_{\text{Sim},i} \geq t_{\text{Sim End}}$  erreicht ist. Die Besetzungszeiten der Stellen bzw. die Schaltzeiten der Transitionen werden zwischengespeichert.

Nach der Abarbeitung aller  $N_{\text{Repl}}$  Replikationen eines Simulationslaufes erfolgt die statistische Auswertung der einzelnen Netzelemente wie Stellen und Transitionen.

### Auswertung des Petrinetzes

Innerhalb der statistischen Auswertung der Ergebnisse werden für Stellen, Transitionen und globale Variablen bestimmte statistische Kennwerte für die abgearbeiteten Ereignisse ermittelt.

Für die Stellen werden während des Simulationslaufes die Besetzungsdauern der Stellen gespeichert. Über diese gespeicherten Besetzungsdauern kann eine statistische Auswertung der Markenbesetzung erfolgen. In Bild 6.13 ist ein beispielhafter Markierungsverlauf einer Stelle  $p_k$  dargestellt.

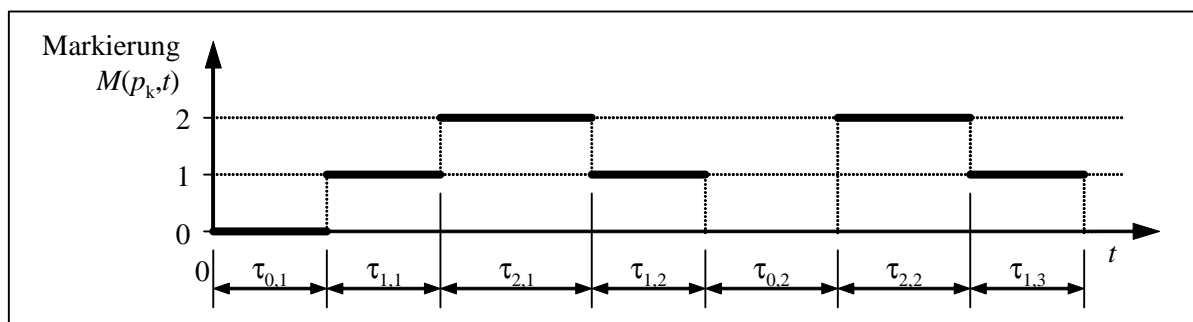


Bild 6.13: Ermittlung der stochastischen Schaltverzögerungen modifiziert nach [Poz2005]

In diesem Zusammenhang wird zum einen der gemittelte zeitliche Verlauf über alle  $m$  Replikationen zu diskreten Abtastzeitpunkten bestimmt über

$$\hat{M}(p_k, t) = \frac{1}{N_{\text{Repl}}} \cdot \sum_{r=1}^{N_{\text{Repl}}} M_r(p_k, t), \quad 0 \leq t \leq t_{\text{Sim End}}, \quad (6.10)$$

wie Bild 6.14 zeigt. Damit kann für die interessierende Zufallsgröße  $\theta$  der gemittelte zeitliche Verlauf  $\hat{\theta}(t)$  angegeben werden.

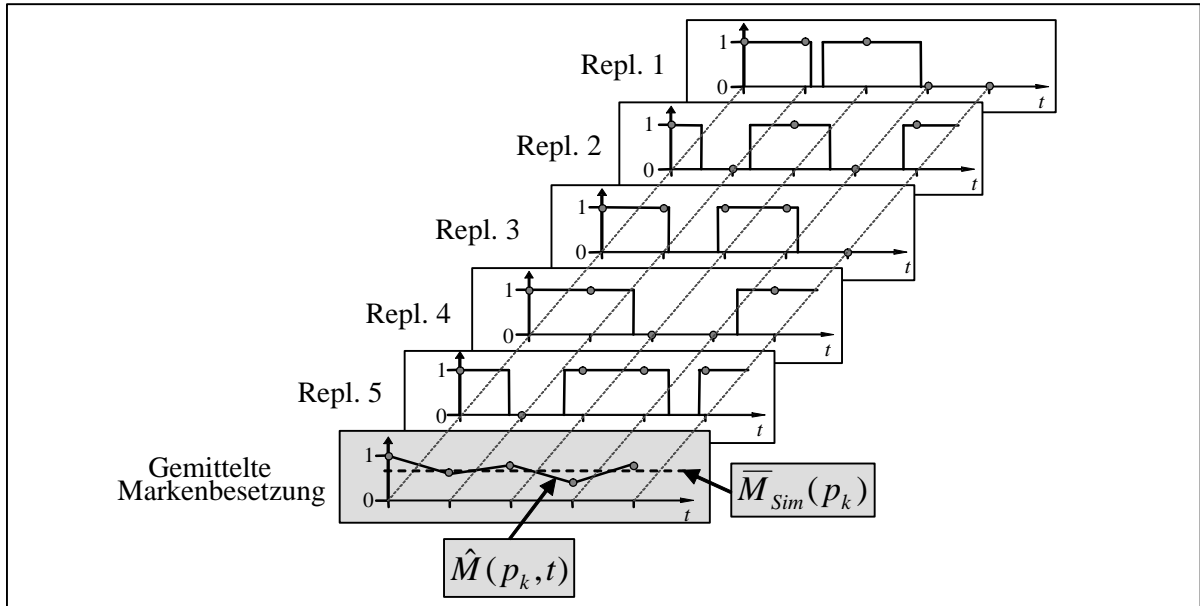


Bild 6.14: Ermittlung der stochastischen Schaltverzögerungen modifiziert nach [Neb2006]

Zudem wird innerhalb der Auswertung der mittlere Markenbestand über alle Replikationen und den interessierenden kompletten Simulationszeitraum bzw. zusätzlich festgelegten Auswertungsbereich bestimmt über

$$\bar{M}_{\text{Sim}}(p_k) = \frac{1}{t_{\text{Sim End}}} \cdot \int_0^{t_{\text{Sim End}}} \hat{M}(p_k, t) dt \quad \text{bzw.} \quad (6.11)$$

$$\bar{M}_{\text{Ausw}}(p_k) = \frac{1}{t_{\text{Sim End}} - t_{\text{Ausw}}} \cdot \int_{t_{\text{Ausw}}}^{t_{\text{Sim End}}} \hat{M}(p_k, t) dt. \quad (6.12)$$

Analog werden für globale Variablen  $gv_k$  der zum Zeitpunkt  $t$  über alle Replikationen gemittelte Wert  $\hat{g}v_k(t)$  sowie der zusätzlich über den gesamten Simulations- bzw. Auswertezeitraum gemittelte Wert  $\bar{g}v_{k,\text{Sim}}$  bzw.  $\bar{g}v_{k,\text{Ausw}}$  bestimmt.

Bei den Transitionen werden die Aktivierungsdauern  $\tau_{\text{EnDis}}$ , die Zeitdauern zwischen zwei Aktivierungen  $\tau_{\text{EnEn}}$  sowie die Zeitdauern von Aktivierung bis zum tatsächlichen Schaltvorgang  $t_{\text{EnFire}}$  aller Replikationen gespeichert und ausgewertet. Zudem wird die Anzahl der Aktivierungen und der Schaltvorgänge ermittelt, s. Bild 6.15.

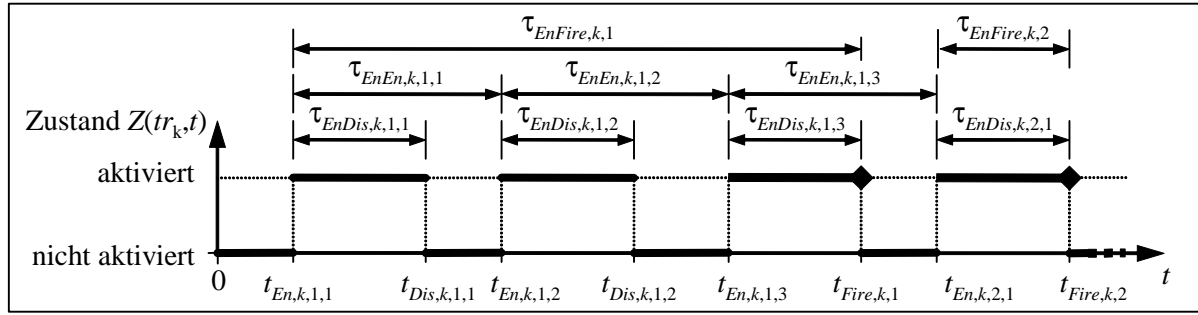


Bild 6.15: Ermittlung der stochastischen Schaltverzögerungen modifiziert nach [Poz2005]

Dadurch kann bei der Auswertung der Transitionen ermittelt werden, wie häufig die betrachtete Transition im Mittel schaltete und wie häufig sie im Mittel über alle Replikationen aktiviert war.

Die Ermittlung des numerischen Fehlers erfolgt gemäß der Vorgehensweise aus Abschn. 6.5.1. Der geschätzte Erwartungswert wird angenähert durch den gemittelten zeitlichen Verlauf

$$E(M(p_k, t)) \approx \hat{M}(p_k, t), \quad 0 \leq t \leq t_{\text{Sim End}}. \quad (6.13)$$

Für die Berechnung des numerischen Fehlers wird zudem die Standardabweichung der Markierung über alle  $N_{\text{Repl}}$  Replikationen zu dem jeweiligen Zeitpunkt  $t$  benötigt.

$$\sigma(M(p_k, t)) \approx \sqrt{\frac{1}{N_{\text{Repl}} - 1} \sum_{r=1}^{N_{\text{Repl}}} (M_r(p_k, t) - \hat{M}(p_k, t))^2} = \hat{\sigma}(M(p_k, t)), \quad (6.14)$$

$$0 \leq t \leq t_{\text{Sim End}}.$$

Für die jeweiligen Vertrauensbereichsangaben von 68,3 %, 95,5 % bzw. 99,7 % ergeben sich dann mit  $x = 1, 2$  bzw.  $3$  die Grenzen für den numerischen Fehler zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  zu

$$\hat{M}_{\text{Lower},x}(p_k, t) = \hat{M}(p_k, t) - \frac{x \cdot \hat{\sigma}(M(p_k, t))}{\sqrt{N_{\text{Repl}}}}, \quad 0 \leq t \leq t_{\text{Sim End}} \text{ bzw.} \quad (6.15)$$

$$\hat{M}_{\text{Upper},x}(p_k, t) = \hat{M}(p_k, t) + \frac{x \cdot \hat{\sigma}(M(p_k, t))}{\sqrt{N_{\text{Repl}}}}, \quad 0 \leq t \leq t_{\text{Sim End}}.$$

## 6.5 Programmpaket REALIST

Für die Modellierung und Analyse (Auswertung) der Studie wurde das am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart entwickelte Programmpaket

REALIST (Reliability, Availability, Logistics and Inventory Simulation Tool) weiterentwickelt. Das Programmpaket besteht aus einem grafischen Editor und einem Simulationsprogramm. Beide Programme wurden objektorientiert in C++ für Microsoft Windows entwickelt.

Der Editor ermöglicht eine intuitive, graphische Netz-Modellierung sowie die Konfiguration der Eigenschaften sämtlicher Netz-Elemente über Kontext-Menüs. Neben der Unterstützung von Referenzstellen und -transitionen können Netzelemente farblich hervorgehoben und kommentiert werden, um eine übersichtliche Netzgestaltung zu gewährleisten.

Der Editor unterstützt die einzelnen Arbeitsschritte zur Erstellung eines ECSPN-Modells: Erstellung der Deklarationen, Modellierung des abzubildenden Produktionssystems, der Verlustquellen und der Instandhaltung als ECSPN sowie Zuweisung von Eigenschaften zu den einzelnen Netzelementen.

Das ECSPN wird im Hauptarbeitsbereich der Oberfläche von REALIST-Editor erstellt. Im Bild 6.16 ist die komplette Benutzeroberfläche dargestellt mit Menü, Schaltflächen der Modellierungselemente und -werkzeuge und dem Modellierungsbereich.

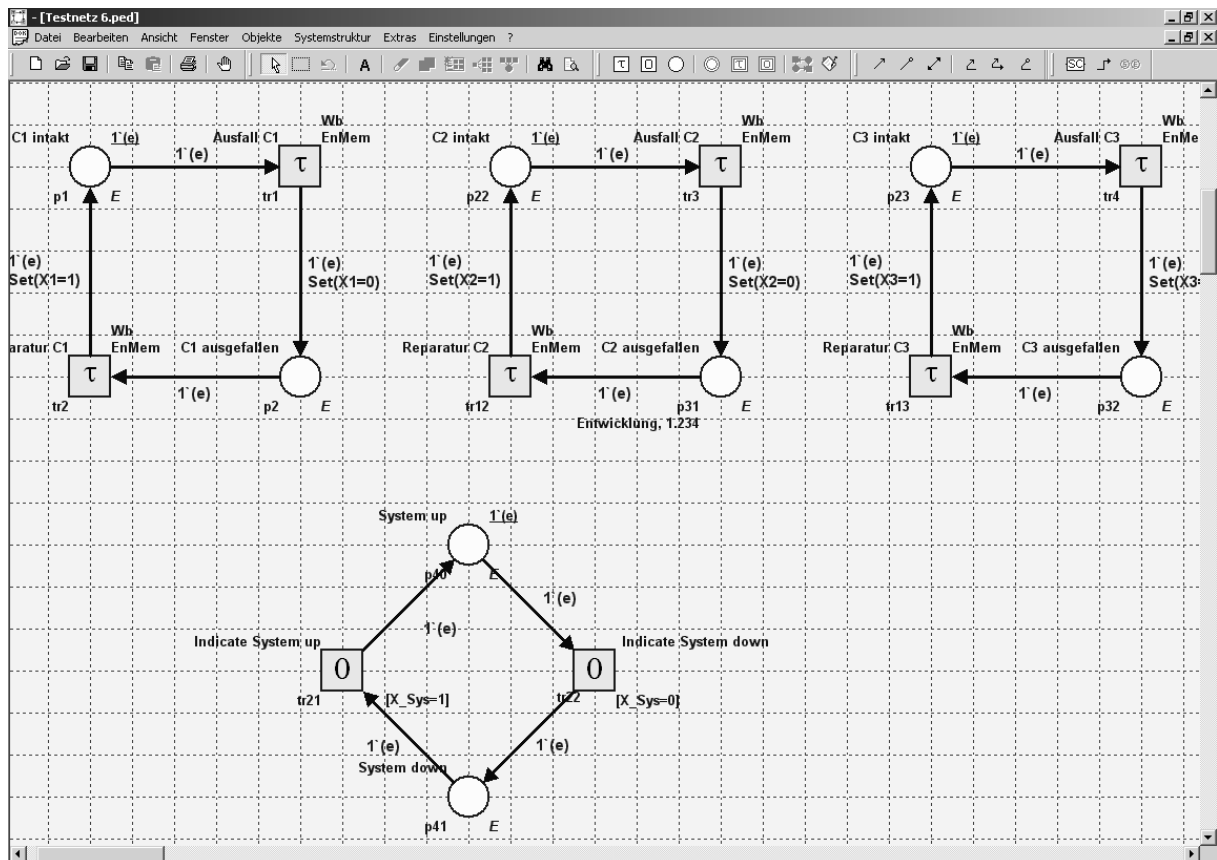


Bild 6.16: Die Benutzeroberfläche des REALIST-Editors

Die Erstellung der Deklarationen erfolgt im Deklarationsdialog von REALIST-Editor. Mit Hilfe des Deklarationsdialoges werden Farben, lokale, globale und Kostenvariablen des ECSPN verwaltet. Für die zu deklarierenden Farben lassen sich die Farbnamen und der Typ festlegen. Den lokalen Variablen, globalen Variablen und Kostenvariablen werden Namen und Farben zugeordnet.

Für die graphische Modellierung des ECSPN ermöglicht REALIST-Editor die Modellierung der Netzelemente Stellen, zeitbehaftete Transitionen, unmittelbare Transitionen und die jeweiligen Referenzobjekte sowie gewöhnliche Kanten, Lesekanten und Verbotskanten über Schaltflächen und über das Auswahlmü. Über Dialoge können den Elementen ihre jeweiligen gewünschten Eigenschaften zugewiesen werden [Poz2005]. Im Einzelnen sind dies für die jeweiligen Elemente:

- **Stellen:** Name und Identifikationsnummer, Anfangsmarkierung; Warteschlangendisziplin, Stellenfarbe, Kostenvariable und Kostenfaktor sowie Stellenauswertung.
- **Transitionen:** Name und Identifikationsnummer, Verteilungsfunktion und Parameter der Schaltverzögerung (unscharfe oder scharfe Parameter), Schaltregel, Priorität, Gewicht, Wächterbedingung, Kostenvariable und Kostenfaktor sowie Transitionsauswertung.
- **Gewöhnliche Kanten, Lesekanten und Verbotskanten:** Identifikationsnummer, Kantenausdruck und Kantenfunktionen.

Der Datentransfer zum Analyseprogramm findet über ein flexibles und erweiterbares XML-Dateiformat statt, das an das PNML-Format (Petri Net Markup Language) angelehnt ist [Jün2000].

Im daran angeschlossenen Programm REALIST-Simulation erfolgt die numerische Analyse des zuvor modellierten und exportierten ECSPNs.

Das Simulationsprogramm erlaubt die Eingabe aller numerischen Simulationsparameter und beinhaltet neben einer Projektverwaltung eine Stapelverarbeitung. Durch diese Stapelverarbeitung kann eine Anzahl unterschiedlicher Simulationsaufgaben sequenziell automatisiert abarbeitet werden und diese Simulationsaufgaben können in Form einer Projektdatei gespeichert und erneut geladen werden.

Im Bild 6.17 ist der Arbeitsbereich der REALIST-Simulation dargestellt. Er untergliedert sich in die Projektverwaltung (linker Bereich) und in den Bereich Simulationsbeschreibung (rechter Bereich). Die Projektverwaltung übernimmt die Verwaltung der einzelnen Simulationen. Dort können neue Simulationen hinzugefügt, bereits bestehende Simulationen gelöscht oder ihre Reihenfolge geändert werden.

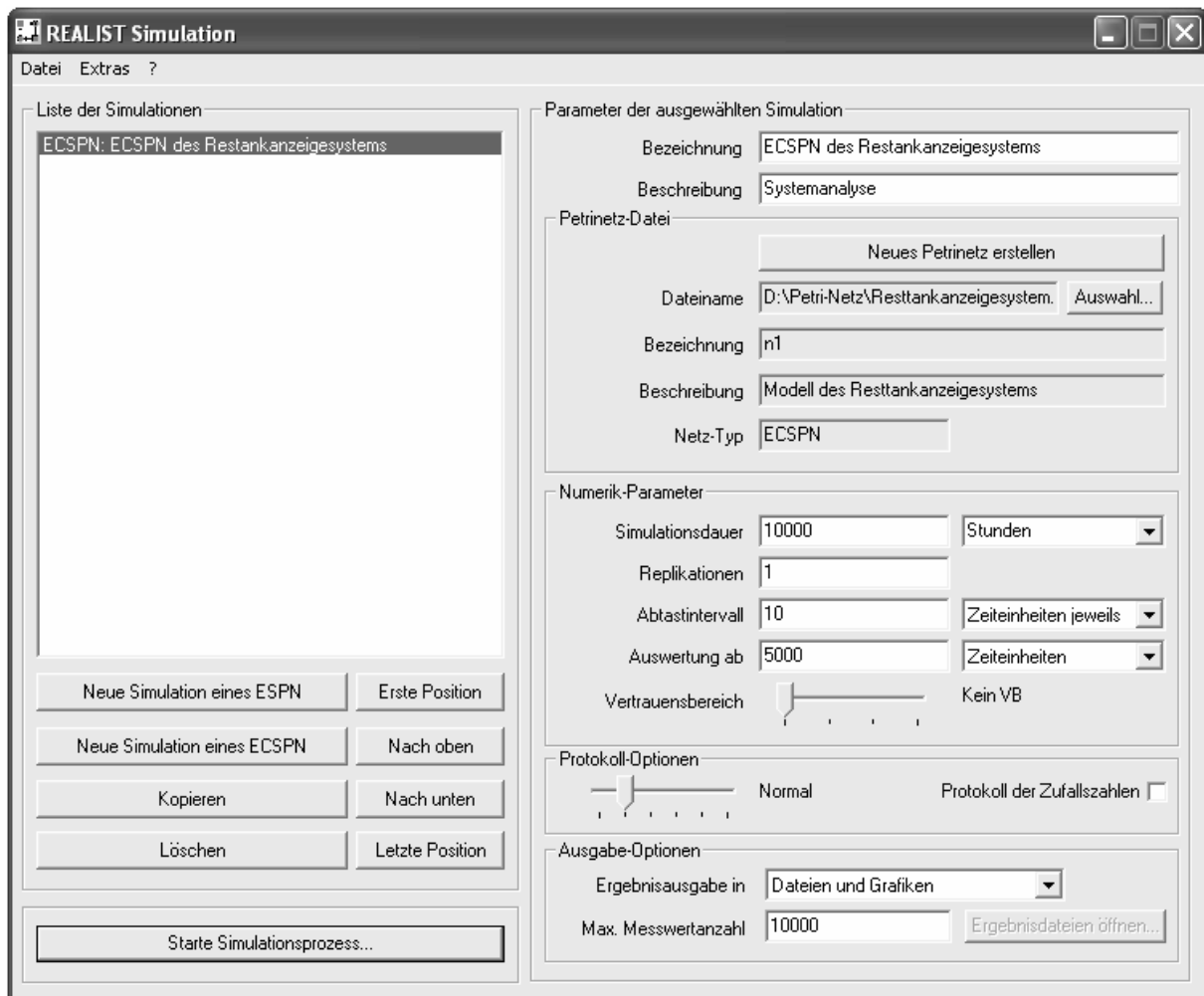


Bild 6.17: Die Benutzeroberfläche der REALIST-Simulation

Im Bereich Simulationsbeschreibung können Parameter der Simulation und Numerik sowie verschiedene Protokoll- und Ausgabeoptionen verändert werden. Diese Angaben umfassen

- **Simulationsbezeichnung:** Name der Simulation und kommentierende Beschreibung,
- **Auswahl des Systemmodells:** Auswahl der PNML-Datei des zu analysierenden ECSPN-Modells über ein Dateiauswahlmenü,
- **Simulationsparameter:** Festlegung der Simulationsdauer  $t_{\text{Sim End}}$ , der Anzahl an Replikationen  $N_{\text{Repl}}$ , der Größe des Abtastintervalls für die Auswertung, des Beginns des zweiten Auswertungsbereichs  $t_{\text{Ausw}}$  (durch die Festlegung dieses zweiten Auswertungsbereiches kann bei einer Auswertung der Einschwingbereich abgeschnitten werden, der Beginn des Auswertungszeitraums kann wahlweise als absoluter Zeitpunkt oder als Prozentsatz der gesamten Simulationsdauer eingegeben werden) und des gewünschten Vertrauensbereichs (68,3 %, 95,5 % bzw. 99,7 %) für die Angabe des numerischen Fehlers,

- **Protokolloptionen:** Auswahl des Detaillierungsgrad der Protokolldatei und
- **Ausgabeoptionen:** Bestimmung der Ausgabe der Ergebnisse entweder nur als Textdatei oder zusätzlich auch grafisch in Diagrammform

Die Ausgabe der Simulationsergebnisse kann je nach Bedarf in Form von Textdateien und Grafiken erfolgen für die Stellen und Transitionen, die in REALIST-Editor für eine Auswertung markiert wurden, sowie für die globalen und Kostenvariablen. In den Ergebnisdateien und -grafiken finden sich jeweils Auswertungen für die gesamte Simulationszeitdauer ( $0 < t_{\text{Sim}} < t_{\text{Sim Ende}}$ ) sowie den Auswertezeitraum ( $t_{\text{Auswertung}} < t_{\text{Sim}} < t_{\text{Sim Ende}}$ ). In den Grafen der Stellen wird die gemittelte zeitliche Belegung der Stellen sowie bei Bedarf der numerische Fehler (mit Angabe des Vertrauensbereichs) dargestellt. Zudem kann über weitere Registerkarten die Statistik der Markenbesetzung abgerufen werden. Darin sind der Mittelwert über die komplette Simulationszeit ( $0 < t_{\text{Sim}} < t_{\text{Sim Ende}}$ ), der Mittelwert der Auswertungszeit ( $t_{\text{Auswertung}} < t_{\text{Sim}} < t_{\text{Sim Ende}}$ ), der Verlauf der Markenbesetzung sowie die Angabe des numerischen Fehlers zu finden.

Bei der Auswertung der Transitionen werden die Anzahl der Schaltungen innerhalb des Simulationszeitraums und innerhalb des Auswertungszeitraums sowie der numerische Fehler mit angegeben. Die Auswertung der Variablen bietet ähnlich wie die der Stellen eine Übersicht über den zeitlichen Verlauf der Variablen. Alle zuvor genannten Angaben werden zudem als Textdatei ausgegeben.

Eine solche Auswertungsdatei für eine Stelle p1 „System intakt“ ist in Bild 6.18 dargestellt. In der Grafik ist der über alle Replikationen gemittelte zeitliche Verlauf  $\bar{\theta}(t)$  der Zufallsgröße  $\theta$  dargestellt. Der Auswertungsbereich ist auf 2000 h festgelegt, da der Beginn des Auswertungszeitraums so zu wählen ist, dass die Simulation zu diesem Zeitpunkt im eingeschwungenen Zustand ist, um den Einschwingbereich bei einer Auswertung nicht mit zu berücksichtigen. Ist dies gewährleistet, wie in Bild 6.18 dargestellt, liefert die statistische Auswertung die Ergebnisse des eingeschwungenen Zustands, z. B.  $\bar{\theta}_{\infty, \text{Ausw}}$ . Erfolgt die Auswertung einschließlich des Einschwingbereichs, liefert die Mittelwertbildung abweichende Werte, z. B.  $\bar{\theta}_{\infty, \text{Sim}}$ . In Bild 6.18 können die Angaben für den über alle Replikationen und die komplette Auswertungszeit gemittelten Wert der Zufallsgröße  $\theta$  ( $\bar{\theta}_{\infty, \text{Ausw}}$ ) sowie für die über die Zeit und alle Replikationen gemittelten Grenzwerte des numerischen Fehlers bei einem ausgewählten Vertrauensbereich von 95% ( $\bar{\theta}_{\text{oben}, 95\%, \infty, \text{Ausw}}$  und  $\bar{\theta}_{\text{unten}, 95\%, \infty, \text{Ausw}}$ ) direkt gefunden werden.



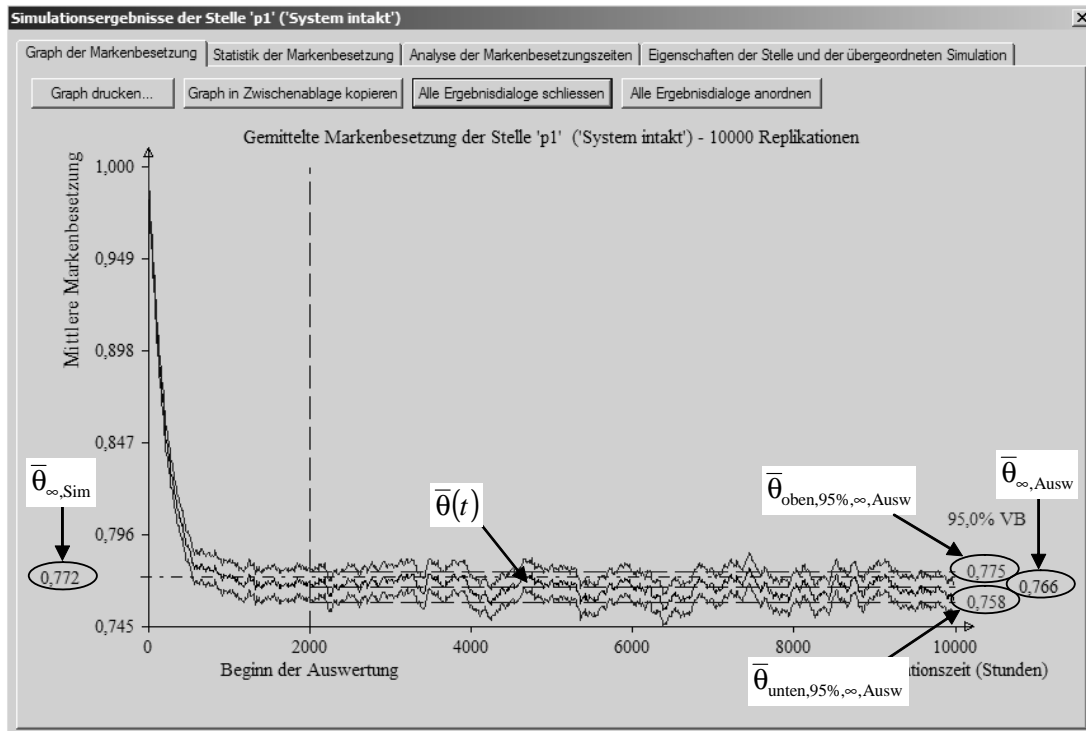


Bild 6.18: Graphikausgabe von REALIST-Simulation

Neben dieser Grafik- und Textausgabe wird zusätzlich eine Protokolldatei über den Verlauf der Simulation geschrieben. Je nach Detaillierungsgrad kann in dieser Datei der Ablauf der Simulation nachvollzogen werden, von keiner Angabe bis hin zur detaillierten Ausgabe der schrittweisen Abarbeitung der einzelnen Schaltereignisse mit der Angabe von genauen Variablenwerten. Mit Hilfe dieser Protokolldatei kann das ECSPN-Modell verifiziert werden, ob die Simulation die Ereignisse in der Reihenfolge abarbeitet, wie es der Modellierer eigentlich vorgesehen hatte.

Die Validierung des Werkzeuges erfolgte mit Hilfe eines Vergleichs mit Markovketten und der Software SPAR<sup>®</sup> [Poz2005].

## 7 Beispielhafte Anwendung

In diesem Kapitel wird anhand von zwei Produktionsanlagen die Anwendung des zuvor vorgestellten Analyseverfahrens auf zwei verschiedene Anlagentypen vorgestellt.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Anlagen dienen der Darstellung des Verfahrens, wozu Struktur und Daten in Anlehnung an reale Anlagen gewählt wurden. Aus diesen Beispielen kann jedoch keine Aussage über die Produktivität von speziellen real existierenden Anlagen getroffen werden.

### 7.1 Bandsägenfertigung (Job-Shop)

In dieser beispielhaften Anwendung wird eine auftragsbezogene Fertigung von Bandsägeblättern mit Einsatzgebiet in der Holzindustrie vorgestellt, s. Bild 7.1.



*Bild 7.1: Beispielfoto einer Bandsägenfertigung [Koc2007]*

Die Fertigungseinrichtung ist sieben Stunden pro Tag und fünf Tage die Woche im Einsatz. Insgesamt wird die Anlage von 14 Personen bedient. Die Produktvielfalt wird in drei Gruppen untergliedert:

- Bandsägeblätter mit geschränkten Zahnsitzen (Auftragstyp A),
- Bandsägeblätter mit gestauchten Zahnsitzen (Auftragstyp B),

- Bandsägeblätter mit stellitierten Zahnsitzen (Auftragstyp C) und
- Reparaturaufträge (Auftragstyp D).

Zusätzlich werden die Bandsägeblätter mit verschiedenen Breiten gefertigt. Sie sind kundenspezifisch, können aber aus Sicht des Fertigungsablaufs in drei Gruppen zusammengefasst werden:

- Breite bis 200mm (Breitentyp a),
- Breite von 200mm bis 250mm (Breitentyp b) und
- Breite über 250mm (Breitentyp c).

Somit wird ein Auftrag durch eine Kombination von dem Auftragstyp (A, B oder C) und dem Breitentyp (a, b oder c) bestimmt.

### 7.1.1 Fertigungsprozess

Der Fertigungsablauf der einzelnen Aufträge ist von dem Auftragstyp und von dem Breitentyp abhängig. Die einzelnen Fertigungsschritte werden in Bild 7.2 grob veranschaulicht.

**Stanzen:** Das Stanzen der Zähne der Bandsägeblätter ist der erste Fertigungsschritt in dem Fertigungsprozess. Es stehen zwei Stanzmaschinen zur Verfügung. An beiden Maschinen können Auftragstypen A, B und C bearbeitet werden. Entscheidendes Kriterium dafür, welche Aufträge an welcher Stanzmaschine bearbeitet werden dürfen, ist der Breitentyp der Aufträge. Die eine Stanzmaschine bearbeitet nur Aufträge mit Breitentyp a, die andere Stanze bearbeitet Aufträge mit Breitentyp b und c. Deswegen wird jeder Auftrag nach Eingang in das Produktionssystem über Wächterbedingungen nach dem Breitentyp sortiert.

Wie alle Fertigungsmaschinen und Bearbeitungsvorgänge dürfen beide Stanzen nur während der Betriebszeit arbeiten. Deswegen sind alle Transitionen, die einen Bearbeitungsvorgang abbilden, mit einer Lesekante über eine Referenzstelle mit der Stelle verbunden, die während der sieben Stunden Betriebszeit mit einer Marke belegt ist.

Da die Stanze Breitentyp b und Breitentyp c bearbeitet, ist eine Umrüstung bei dem Wechsel von b auf c und umgekehrt erforderlich. Um Zeitverluste bei dem Umrüstvorgang zu minimieren, wird die Bearbeitungsreihenfolge der Aufträge so beeinflusst, dass für ein vordefiniertes Zeitintervall nur Aufträge mit Breitentyp b bearbeitet werden dürfen. Nach Ablauf dieses Zeitintervalls erfolgt eine automatische Umrüstung der Stanze, wonach nur Aufträge mit Breitentyp c für ein vorbestimmtes Zeitintervall bearbeitet werden dürfen. Dieser Umrüstvorgang wiederholt sich während der Arbeitszeit der Stanze.

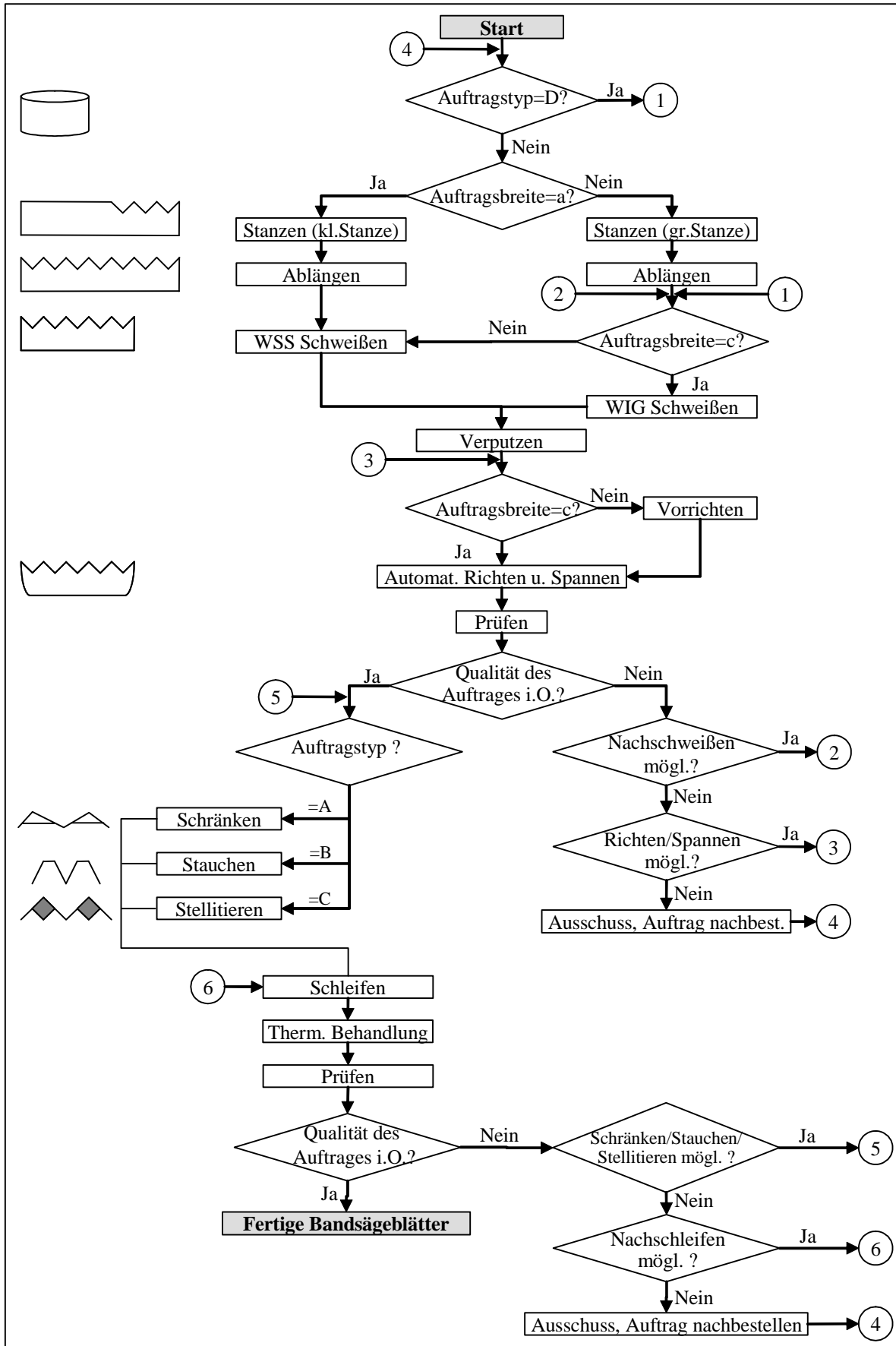


Bild 7.2: Fertigungsablauf

Diese Bearbeitungsreihenfolge ist natürlich nur dann sinnvoll, wenn die Aufträge mit Breitentyp b und c abwechselnd ankommen, da in diesem Fall ansonsten sehr oft umgerüstet werden müsste und somit die Umrüstzeitverluste steigen würden.

**Ablängen:** Nach dem Stanzvorgang werden die Bandsägeblätter abgelängt. Die Ablängstationen sind starr mit den Stanzen verbunden, so dass kein Puffer zwischen Stanze und Ablängmaschine erforderlich ist. Hinter den Ablängeinrichtungen befindet sich ein Puffer, der mit bis zu 10 Werkstücken belegt sein kann.

**Schweißen:** Nach dem Stanzen der Zähne und dem Ablängen der Bandsägeblätter werden diese zusammengeschweißt. Dafür stehen drei Schweißstationen zur Verfügung. Aufträge mit Breitentyp a und b werden an zwei Widerstandstumpfschweißmaschinen geschweißt. Aufträge mit Breitentyp c werden an einer Wolfram-Inertgas Schweißanlage geschweißt.

In den Puffern vor den Schweißstationen können sich auch Aufträge des Auftragsyps D (Reparatur) ansammeln. Zudem können vor der Schweißanlage Aufträge zugeführt werden, bei denen ein Nachschweißbedarf bei der Qualitätsprüfung festgestellt wurde. Um solche Aufträge den Kunden termintreu liefern zu können, werden sie vor den restlichen Aufträgen bevorzugt und als nächste bearbeitet. Dafür weisen sie eine höhere Priorität auf.

Die drei Schweißstationen sind ähnlich aufgebaut. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die Variablen, mit denen das Personal zum Transport, Vorbereiten und Schweißen der Bandsägeblätter identifiziert wird, unterschiedlich sind.

Nach dem Schweißen sammeln sich die Bandsägeblätter in einem Puffer, aus dem sie entnommen und manuell verputzt werden. Dies erfolgt an zwei Verputzstationen.

**Verputzen:** Fertig geschweißte Bandsägeblätter werden an zwei Stationen verputzt. Der Aufbau der Verputzstationen ist dem Aufbau der Schweißstationen ähnlich. Die fertig geschweißten Bandsägeblätter werden aus dem Puffer entnommen und verputzt. Dabei spielt es keine Rolle, an welcher der beiden Stationen verputzt wird. Die einzigen Bedingungen für den Verputzprozess sind die Verfügbarkeit von Personal und die Bereitschaft der Verputzstation selbst. Das bedeutet, dass ein Mitarbeiter anwesend sein muss und die Verputzstation nicht belegt oder defekt sein darf.

**Spannen und Richten:** Die fertig verputzten Bandsägeblätter werden nun gerichtet und gespannt. Das Richten und Spannen bewirkt, dass die Bandsägeblätter auf bombierten Rollen stabil laufen. Direkt vor der Station für Richten und Spannen befindet sich ein Puffer, in den auch Aufträge gelangen können, die ein Nachspannen und Richten benötigen. Diese weisen eine höhere Priorität als die restlichen Aufträge auf und werden somit bevorzugt bearbeitet.

Es stehen zwei Stationen für Spannen und Richten zur Verfügung. Die Bandsägeblätter von Breitentyp c müssen vor dem Richten und Spannen noch vorgerichtet werden. Dafür steht eine Vorrichtstation zur Verfügung. Solche Aufträge werden mit Hilfe einer Wächterbedingung aussortiert. Fertig vorgerichtet, befinden sich die Aufträge mit Breitentyp c vor den Stationen, an denen das automatische Richten und Spannen erfolgt.

**Prüfen:** Nach dem Spannen und Richten werden alle Bandsägeblätter in einer Prüfstation geprüft. Dabei können Qualitätsmängel festgestellt werden, die Nachschweißen, Nachrichten und Nachspannen erfordern. Diese Sägeblätter werden an der entsprechenden Stelle wieder dem Fertigungsprozess zugeführt und im Folgenden mit erhöhter Priorität berücksichtigt. Wenn die Qualitätsmängel bei einem Bandsägeblatt sehr hoch sind, wird es als Ausschuss identifiziert und als neuer Auftrag nachbestellt. An der Prüfstation kann ein Bandsägeblatt, falls es sehr hohe Qualitätsmängel aufweist, als Ausschuss identifiziert werden. In diesem Fall wird es nachbestellt. Der Auftrag erhält wie die Aufträge für Nacharbeit eine höhere Priorität, was bedeutet, dass sie vor allen restlichen Aufträgen bevorzugt werden.

**Schränken, Stauchen oder Stellitieren:** Nach bestandener Qualitätsprüfung erfolgt je nach Auftragsstyp das Schränken (Auftragstyp A), Stauchen (Auftragstyp B) oder Stellitieren (Auftragstyp C) der Zahnschneiden.

Aufträge vom Auftragsstyp A werden geschränkt. Beim Schränken werden die Zähne wechselseitig auseinander gebogen. Dadurch wird der Sägeschnitt breiter als das Sägeblatt, womit ein Klemmen verhindert wird. Alle Aufträge vom Auftragsstyp B werden an einer Stauchstation gestaucht. Aufträge vom Auftragsstyp C bekommen auf den Zahnschneiden einen Kopf aus extrem widerstandsfähigem Stellite angeschweißt. Dieser wird nur langsam abgenutzt und garantiert auch nach langer Einsatzdauer einen sauberen Schnitt.

**Schleifen:** Danach werden alle Bandsägeblätter geschliffen. Für das Schleifen der Bandsägeblätter stehen eine bzw. zwei Maschinen zur Verfügung. In einer Voruntersuchung wurde die Systemkonfiguration mit einer Schleifmaschine analysiert. Dabei zeigte sich, dass die erwarteten Stückzahlen nicht erreicht werden konnten, so dass die Konfiguration in der Form geändert wurde, dass zwei Schleifmaschinen für die Arbeit an der Station zur Verfügung stehen.

**Thermische Behandlung:** Nach dem Schleifen erfolgt eine thermische Behandlung, die ca. 18 Stunden dauert. Fertig geschliffen, sammeln sich die Bandsägeblätter während der Betriebszeit in einem Puffer. Nach Ablauf der Arbeitszeit erfolgt die thermische Behandlung aller Bandsägeblätter, die an dem Arbeitstag gefertigt wurden.

**Endkontrolle:** Nach der thermischen Behandlung findet die endgültige Qualitätskontrolle statt. Falls Nachschleifen, Nachschränken, Nachstauchen oder Nachstellieren der Zahnschneiden erforderlich ist, werden diese Vorgänge wiederholt. Falls ein Sägeblatt als Ausschuss identifiziert wird, wird ein entsprechendes Bandsägeblatt nachbestellt.

Parallel zu diesem Fertigungsprozess werden auch Reparaturaufträge (Auftragstyp D) bearbeitet. Sie erfordern je nach Auftrag das Schweißen, Verputzen, Spannen und Richten der Bandsägeblätter, Nachschleifen, Nachschränken, Nachstauchen oder Nachstellieren der Zahnschneiden oder auch nur einzelne der Arbeitsschritte. Anschließend werden sie ebenfalls auf die geforderte Qualität geprüft. Die Reparaturaufträge werden je nach Auftrag an den entsprechenden Stellen in das Produktionssystem eingebracht.

### 7.1.2 Verlustquellen

Während der Arbeitsdauer der Maschinen können folgende Ausfallereignisse auftreten: Ausfall der Maschine, Ausfall des Maschinenwerkzeuges, kurzzeitige, zufällige Störung der Maschine und Qualitätsverluste. Der Ausfall des Maschinenwerkzeuges wird nur bei den Stanzmaschinen und Schleifmaschinen berücksichtigt.

Bei einem **Ausfall der Maschine** werden Personal und Ersatzteile angefordert, um diesen Ausfall zu beheben. Während der stochastischen Reparaturdauer ist die Maschine außer Betrieb und es können keine Aufträge bearbeitet werden. Der momentan an der Maschine bearbeitete Auftrag wird nochmals nachbestellt. Das Personal, das mit der Bearbeitung des Auftrags an der Maschine und anschließend mit der Reparatur der Maschine beschäftigt war, kann wiederum mit der Arbeit des Auftrags an der Maschine fortfahren. Während der Reparatur werden die Teile, deren Ausfall zu einem Ausfall der gesamten Maschine führte, mit neuen Teilen ausgetauscht, wodurch im Modell die Ausfallwahrscheinlichkeit der Maschine um ein gewisses Maß gesenkt wird.

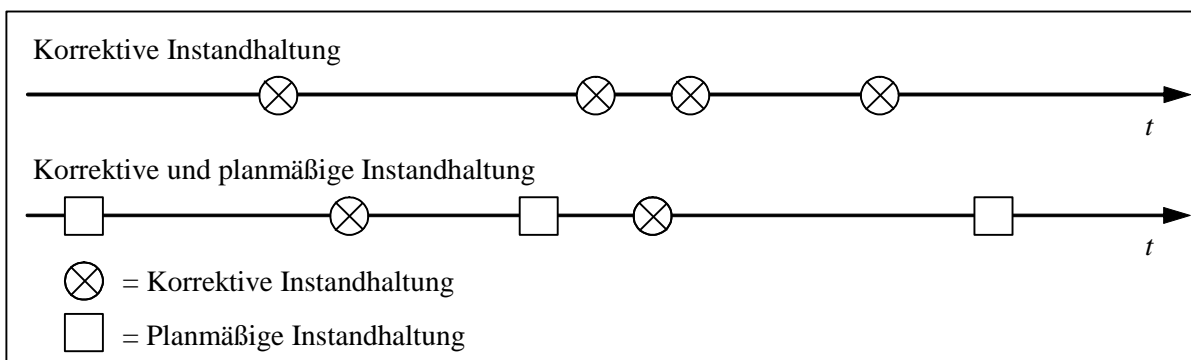
Beim **Werkzeugausfall** wird der Austausch des Werkzeugs nötig. Während dieses Vorganges steht die Maschine. Danach wird das „Werkzeugalter“ auf Null reduziert („as good as new“). Der Auftrag, der sich beim Werkzeugausfall in Bearbeitung befand, wird in den Puffer vor der Maschine gebracht und nochmals nachgearbeitet. Dabei weist er eine höhere Priorität als die anderen Aufträge auf und wird bevorzugt an der Maschine bearbeitet. Das „Maschinenalter“ wird beim Werkzeugaustausch nicht verändert.

Falls eine **kurzzeitige Störung** der Maschine auftritt, muss diese behoben werden. Solange ist die Maschine außer Betrieb. Nach einer zufälligen Zeitdauer für die Störungsbehebung wird die Schleifmaschine wieder in Betrieb gesetzt.

Neben Maschinen-, Werkzeugausfällen und kurzzeitigen Störungen können zudem **Qualitätsverluste** im Produktionssystem auftreten. Während des Fertigungsablaufs der Bandsägeblätter werden sie an zwei Prüfstationen von einem Mitarbeiter auf die geforderte Qualität überprüft. Die erste befindet sich direkt nach den Stationen für das automatische Richten und Spannen, die zweite befindet sich am Ende des Fertigungssystems (nach der Station für thermische Behandlung). An Prüfstation 1 kann Bedarf an Nachschweißen oder Nachspannen und Richten der Bandsägeblätter festgestellt werden. Falls Qualitätsmängel nach dem Schränken, Stauchen, Stelittieren und Schleifen der Zahnspitzen der Bandsägeblätter festgestellt werden, werden diese Vorgänge wiederholt. An beiden Prüfstationen kann ein Bandsägeblatt, falls es sehr hohe Qualitätsmängel aufweist, als Ausschuss identifiziert werden. In diesem Fall wird es nachbestellt. Der Auftrag erhält eine erhöhte Priorität, wodurch dieser Auftrag vor allen restlichen Aufträgen bevorzugt wird. Wird bei der Qualitätskontrolle Bedarf an Nacharbeit festgestellt, wird dieser Auftrag zu der entsprechenden Station gebracht.

### 7.1.3 Instandhaltung

Innerhalb dieses Fertigungssystems werden verschiedene Instandhaltungsstrategien untersucht, die zwei Instandhaltungsarten berücksichtigen: korrektive und planmäßige Instandhaltung. Die korrektive Instandhaltung (Reparatur) wird nach jedem Maschinenausfall durchgeführt. Diese Reparaturdauern können unter Umständen sehr lange sein, da der Fehler erst ermittelt, das entsprechende Ersatzteil bestellt und geliefert werden muss und erst im Anschluss daran die eigentliche Reparatur stattfinden kann.



*Bild 7.3: Betrachtete Instandhaltungsstrategien*

Neben korrektiven Instandhaltungsmaßnahmen werden teilweise zusätzlich planmäßige vorbeugende Maßnahmen berücksichtigt. Die planmäßige Instandhaltung hat den Vorteil, dass ihre Durchführung planbar ist und daher die Zeitdauern für die Durchführung



der Maßnahmen sehr viel kürzer sind als bei Reparaturen. Dadurch können Ausfälle und Instandsetzungen reduziert werden. Für dieses System wurden Strategien untersucht, die 9, 12, 18, 24 bzw. 36 Termine für planmäßige Instandhaltungsmaßnahmen pro Jahr vorsehen.

#### 7.1.4 Kostenbewertung

Die Bewertung der verschiedenen Strategien erfolgt zunächst über die Stückkosten der gefertigten Bandsägen. Innerhalb dieses Fertigungsprozesses werden verschiedene Kosten mit berücksichtigt, die allgemein für das gesamte System, an bestimmten Maschinen oder pro gefertigtes Bandsägeblatt entstehen. Zur Ermittlung der Stückkosten werden alle während der Fertigung anfallenden Kosten ermittelt und verursachungsgerecht den verschiedenen Aufträgen zugeordnet. Es lassen sich dabei Personal-, Material- und Fertigungskosten unterscheiden, s. Bild 7.4.

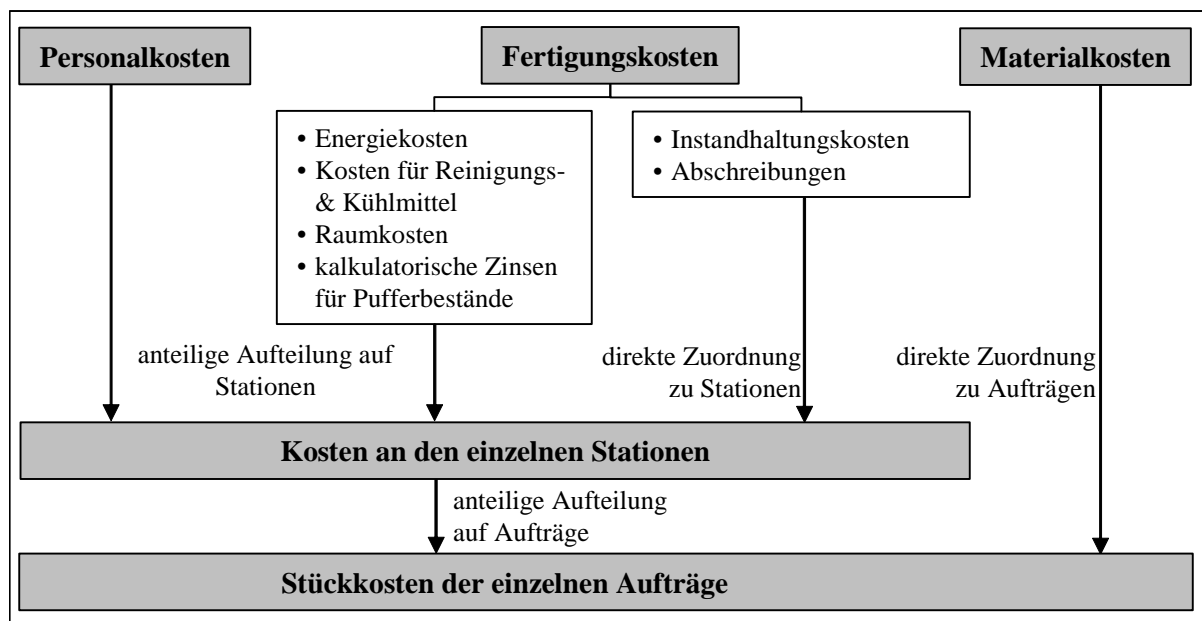


Bild 7.4: Kostenermittlung

#### Ermittlung der Personalkosten

In dem betrachteten Fertigungssystem werden 14 Mitarbeiter beschäftigt. Der Durchschnittslohn des Personals beträgt 25€/h. Sie arbeiten im Einschichtbetrieb fünf Tage die Woche bei einer 35-Stunden-Woche.

Die Personalkosten werden anteilig den Maschinen zugeordnet je nachdem, wie viel Anteil der Arbeitszeit ein Arbeiter an einer bestimmten Maschine verbringt. Dabei ist für einige Maschinen ein Arbeiter vorgesehen, der die Maschine durchgängig bedient. Andere Arbeiter erledigen Arbeiten an verschiedenen Stationen wie Verputzen und

Richten und Spannen, so dass deren Personalkosten anteilig den Stationen zugeordnet werden.

### **Ermittlung der Materialkosten**

Zu den Materialkosten zählen Kosten für Roh- und Hilfsstoffe, für deren Beschaffung und Lagerung. Der Rohstoff für die Fertigung der Bandsägeblätter ist im Wesentlichen Stahl, der als Coil angeliefert wird. Diesem Material werden neben den Rohstoffkosten zusätzlich anteilig die Kosten für Beschaffung und Lagerung sowie die Kosten für Hilfsstoffe zugerechnet, so dass sich im Mittel die Roh- und Hilfsstoffkosten für ein Bandsägeblatt auf 10 € belaufen.

Die Kosten für den Roh- und Hilfsstoffverbrauch können direkt verursachungsgerecht den einzelnen Aufträgen zugeordnet werden. Wie viel Stahl jeweils verbraucht wird, wird an beiden Stanzmaschinen für den jeweiligen Auftrag ermittelt. Jeder Auftragstyp außer Auftragstyp D wird an diesen Maschinen gestanzt und abgelängt. Somit kann der Rohstoffverbrauch ermittelt werden, indem die Schaltvorgänge der Transitionen ausgewertet werden, die den Arbeitsvorgang der beiden Stanzmaschinen abbilden. Die Anzahl der Schaltvorgänge werden mit einem Geldbetrag multipliziert, der dann dem Preis für das jeweils benötigte Material des Bandsägeblattes entspricht. Dieser Betrag ist abhängig von der Breite und Länge des Sägeblattes. Da die Rohstoffkosten nur auf die fertig produzierten Bandsägeblättern aufgeteilt werden, werden die Kosten, die für Ausschussteile entstehen, anteilig den verschiedenen Aufträgen zugeordnet. Diese Rohstoffkosten werden gemäß ihrer Häufigkeit auf den Auftragstypen wie folgt aufgeteilt: 56,7% der Rohstoffkosten werden Auftragstyp A, 19,6% werden Auftragstyp B zugerechnet und die restlichen 23,7% verbleiben bei Auftragstyp C. Auftragstyp D werden keine Rohstoffkosten zugeordnet, da für Reparaturaufträge kein neues Material benötigt wird.

Für das Stellitieren wird zusätzliches Material benötigt, das direkt an dieser Station benötigt wird. Diese Rohstoffkosten werden direkt den Aufträgen mit Auftragstyp C zugeordnet und belaufen sich pro stelittiertes Sägeblatt auf 10€

### **Ermittlung der Fertigungskosten**

Die Fertigungskosten beinhalten alle ab dem Bereitstellungsbereich bis hin zur Versandzone anfallenden Kosten [Ali2005].

In diesem Fertigungssystem sind dies einerseits Kosten, die direkt den Maschinen zugeordnet werden können, wie die Kosten, die bei der Reparatur, der Instandhaltung und der Behebung von Störungen anfallen, sowie die Abschreibungen der Maschinen.

Andererseits entstehen Kosten, die allgemein anfallen und verursachungsgerecht anteilig den Maschinen oder auch Aufträgen zugeordnet werden. Dazu gehören z. B. Kosten für Energie, Reinigungs- und Kühlmittel, Raumkosten und kalkulatorische Zinsen für das gebundene Kapital der teilweise bearbeiteten Werkstücke, die sich in den Puffern befinden.

Die **Instandhaltungskosten** setzen sich zusammen aus Kosten für Reparaturen und planmäßigen Instandhaltungen.

$$\text{Kosten IH} = \sum_i (\text{Anzahl Ausfälle} \cdot (\text{Kosten/Korr}) + \text{Anzahl PIH} \cdot (\text{Kosten/PIH})). \quad (7.1)$$

Die Kosten, die bei einer planmäßigen Instandhaltung anfallen, sind im Gegensatz zu den Kosten bei einer Maschinenreparatur geringer, da das vorhandene Personal die planmäßige Instandhaltung durchführen kann. Ein weiterer Vorteil der planmäßigen Instandhaltungsmaßnahmen ist, dass die Teile, die nach Bedarf ausgewechselt werden müssen, regelmäßig bestellt werden und somit immer zur Verfügung stehen. Dadurch entstehen geringere logistische Wartezeiten. Die Kosten für korrektive Instandhaltungsmaßnahmen wirken sich entsprechend auf zweierlei Art auf die Stückkosten aus: die Zeitdauern für die Reparaturen sind länger als die für planmäßige Maßnahmen (Verfügbarkeit) und die Kosten der Maßnahmen sind höher (teures Material und externes Personal).

Die Kosten, die durch die Anschaffung einer Maschine entstehen werden entsprechend über den geplanten Einsatzzeitraum der Maschine abgeschrieben (**Abschreibungskosten**):

$$\text{kalk. Abschreibung} = \text{Wiederbeschaffungswert} / \text{Abschreibungszeitraum}. \quad (7.2)$$

In diesem Modell wird eine lineare Abschreibung über acht bis neun Jahre je nach Art der Maschine angesetzt [BdF2002].

Diese beiden Kostenarten, Instandhaltungskosten und Abschreibungskosten, werden den Stationen direkt zugeordnet wie Bild 7.4 zeigt.

Die **Energiekosten** werden über den Energiebedarf des Fertigungssystems über die Arbeitsdauer der Maschinen bestimmt. Dafür werden die Anzahl der Schaltvorgänge aller Transitionen, die die Arbeitsdauer der Maschinen abbilden, mit der entsprechenden Schaltdauer multipliziert und aufsummiert. Somit ergibt sich die gesamte Arbeitsdauer aller Maschinen in Stunden. Es wird angenommen, dass jede Maschine im Durchschnitt 30KW pro Stunde verbraucht und der Strompreis pro KW 0,1€ beträgt. Die Energiekosten werden entsprechend ihrer Betriebszeiten den Maschinen zugeordnet.

Die **Kosten für Kühl- und Reinigungsmittel** werden auf 800€ pro Jahr eingeschätzt. Sie werden den Stationen im gleichen Verhältnis wie die Energiekosten zugeordnet.

Die **Raumkosten** sind fixe Kosten, also von der produzierten Menge unabhängig und betragen 30000€ im Jahr. Sie werden allen Stationen im gleichmäßig zugeordnet.

Der aktuelle Wert der Maschinen stellt ebenso wie die in den Puffern liegenden Aufträge gebundenes Kapital dar, das bei der Bank zu einem bestimmten Zinssatz angelegt werden könnte. Diese kalkulatorischen Kosten werden in Form von **kalkulatorischen Zinsen** ermittelt:

$$\text{Kalk. Zinsen} = (\text{aktueller Maschinenwert} + \text{Kapitalbindung noch nicht fertig gestellter Teile}) \cdot \text{kalk. Zinssatz.} \quad (7.3)$$

Für die Berechnung der kalkulatorischen Zinsen aus der Kapitalbindung noch nicht fertig gestellter Teile werden alle bis dahin erbrachten Kosten aufsummiert, um den bis zum jeweiligen Puffer erreichten Preis des Werkstückes zu ermitteln. Diese Kosten werden mit der anteiligen Liegezeit (Belegung der Stellen) und dem kalkulatorischen Zinssatz von 3% multipliziert. Dadurch können die Kosten für das gebundene Kapital in einem Puffer allen nachfolgenden Stationen zu gleichen Teilen zugeordnet werden.

### **Ermittlung der Stückkosten an den einzelnen Maschinen**

Für eine Bewertung werden die Stückkosten an den einzelnen Maschinen ermittelt. Dafür werden die Kosten für Instandhaltung und die Abschreibungen der Maschine ebenso wie die anteiligen Kosten der Maschine an Energie-, Kühl- und Schmierstoff-, Raum-, Personalkosten sowie kalkulatorischen Zinsen aufsummiert. Zusätzlich werden die Materialkosten den Stationen zugerechnet, an denen dieses Material verbraucht wird: den Stanzen für das Rohmaterial und der Stellitierstation für die Stellitschneidflächen.

Diese Herstellkosten an den einzelnen Maschinen werden anteilig den komplett gefertigten Aufträgen zugeordnet, die die jeweilige Maschine nutzten. Falls alle Aufträge an einer Maschine bearbeitet werden, sind die Kosten, die diese Maschine verursacht, wie folgt aufzuteilen: 55%, 19%, 23% und 3% entsprechend auf Auftragsstyp A, B, C und D. An der Bearbeitung der Reparaturaufträge sind nicht alle Maschinen beteiligt. Somit können diese Kosten nur auf Auftragsstyp A, B und C umgelegt werden. Die Kosten der Maschinen, an denen Auftragsstyp D nicht bearbeitet wird, werden folgendermaßen auf Auftragsstyp A, B und C aufgeteilt: 56,7% der Kosten werden Auftragsstyp A zugerechnet, 19,6% Auftragsstyp B und die restlichen 23,7% verbleiben für Auftragsstyp D.

Die Kosten, die durch die Schränkmaschine verursacht werden, sind nur den Auftrags-typ A zuzurechnen, da nur dieser Auftrags-typ geschränkt wird. Die gleiche Überlegung gilt für die Stauchmaschine und für die Maschine, an der Stelit angeschweißt wird.

Auf diese Art und Weise werden die Herstellkosten je zu Ende gefertigtem Auftrag an jeder Maschine für verschiedene Instandhaltungsstrategien ermittelt.

### **7.1.5 Bewertung der Ergebnisse**

Für die nachfolgenden Ergebnisse der Simulationsexperimente wurde die Anzahl der Replikationen so gewählt, dass bei einem Vertrauensbereich von 95% ein maximaler relativer Fehler von 2% auftrat. Das Modell wurde über einen Zeitraum von 8 Jahren betrachtet. Die Simulationen wurden mit einem Pentium 4 Prozessor mit 3,2 GHz Takt und 1 GB RAM durchgeführt und benötigten für eine Parametervariation 140 Stunden.

Bei der Ermittlung der Stückkosten jedes Auftrags-typs an den einzelnen Stationen zeigt sich, dass die Stückkosten jedes Auftrags-typs zunächst mit steigender Anzahl der planmäßigen Instandhaltung sinken. Dies ist darin begründet, dass die Maschinen häufiger ausfallen, wenn sie gar nicht oder selten instand gehalten werden. Mit steigender Anzahl der Ausfälle steigen auch die kumulierten Reparaturzeiten. Während der Reparaturdauer sind die Maschinen außer Betrieb und somit kann weniger produziert werden, die Verfügbarkeit und somit die Produktionsmenge sinkt. Dieser Effekt wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass sich die Puffer vor den ausgefallenen Stationen füllen und ihr maximales Füllvermögen erreichen. Somit wird die Produktion der sich vor dem Puffer befindenden Station verhindert. Viele Kostenarten wie Personalkosten, Raumkosten, Kosten für Kühl- und Reinigungsmittel und Abschreibungen sind von der Produktionsmenge nahezu unabhängig und konstant. Eine sinkende Produktionsmenge und konstant bleibende Kosten führen entsprechend zu steigenden Stückkosten.

Falls die Anzahl der planmäßigen Instandhaltungen zu sehr erhöht wird, fallen die Maschinen zwar weniger aus, aber die gesamte Instandhaltungsdauer beeinträchtigt den Produktionsprozess, so dass die Produktionsmenge geringfügig wieder sinkt und die Kosten für Instandhaltung noch weiter steigen. In diesem Fall steigen die Stückkosten. Dieser Rückgang in produzierten Teilen ist nicht so stark ausgeprägt wie bei rein korrekiver Instandhaltung, da nach einer planmäßigen Instandhaltung, die im Durchschnitt nur eine Stunde dauert, die Produktion schneller wieder anläuft. Die Puffer wachsen nicht bis zu ihrem Maximum und behindern die Produktion nicht wie in dem Fall der langen Reparaturdauern.

An der Station „Schleifen“ ergibt sich, dass durch eine Investition von 16 Cent an Kosten für planmäßige Instandhaltungen pro produziertem Stück die restlichen Kosten

um 41 Cent pro Stück sinken (16 Cent pro Stück entsprechen den Instandhaltungskosten, die entstehen, wenn die Instandhaltung an der Schleifmaschine neun Mal im Jahr durchgeführt wird), s. Bild 7.5 links. Diese Instandhaltungsstrategie reduziert somit insgesamt die Stückkosten. Die gesamten Kosten pro produziertem Stück A sinken von 8,54 € auf 8,29 €. Über die Stückkosten können die Instandhaltungsstrategien für die einzelnen Stationen bewertet werden. Dadurch ist es möglich, die Häufigkeit der planmäßigen Instandhaltungsmaßnahmen zu finden, die die geringsten Stückkosten an der jeweiligen Maschine verursacht. An der betrachteten Schleifmaschine ergibt sich für Auftragstyp A, dass die Stückkosten ihr Minimum erreichen, wenn die planmäßige Instandhaltung der Schleifmaschine ein Mal im Monat durchgeführt wird s. Bild 7.5 links. Das gleiche Ergebnis ist auch für die anderen Auftragstypen zu finden.

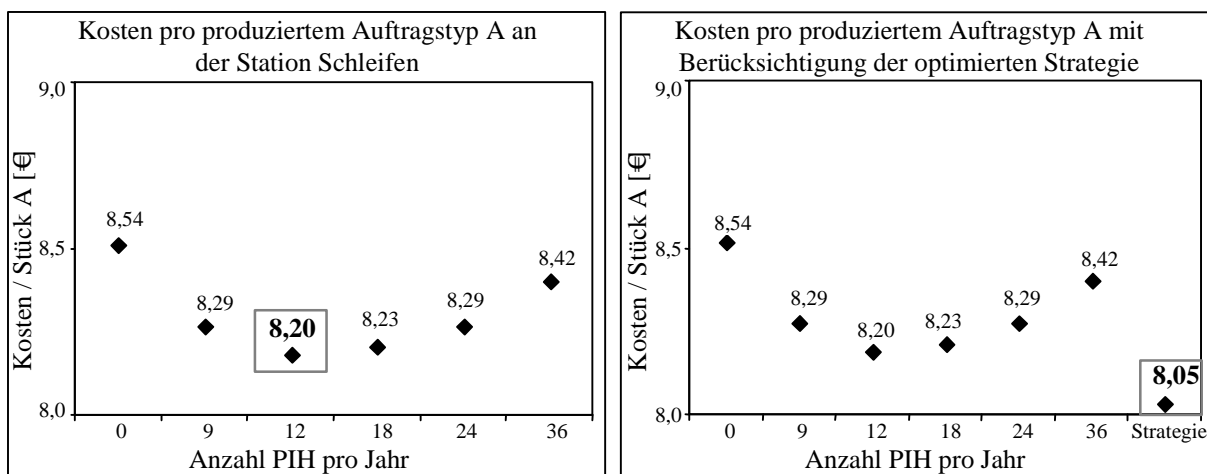


Bild 7.5: Auswertung der Station Schleifen für Auftragstyp A

Für jede Maschine im Produktionssystem werden die Stückkosten für die von ihr produzierten Aufträge ermittelt. Danach werden alle Instandhaltungsstrategien bzgl. der Produktionskosten jedes Auftragstyps an den einzelnen Maschinen verglichen und die optimale Instandhaltungsstrategie für jede einzelne Maschine festgelegt. Dies bedeutet, dass die Instandhaltungszyklen nicht für alle Maschinen gleich sind, sondern so an die Maschinen angepasst werden, dass bei anderen Stationen mehr oder weniger Termine für planmäßige Instandhaltungen vorgesehen sind. Diese individuell an die einzelnen Maschinen angepasste Strategie liefert die insgesamt niedrigsten Stückkosten sowohl an den einzelnen Maschinen wie beispielsweise der Schleifmaschine, s. Bild 7.5 rechts, als auch die insgesamt über alle Aufträge gemittelten niedrigsten Stückkosten, s. Bild 7.6 links. Durch Anwendung dieser verbesserten Strategie kann eine Kostenersparnis erreicht werden, so dass, verglichen mit der Strategie ohne planmäßige Instandhaltungsmaßnahmen, eine mittlere Kostenersparnis pro produziertem Auftrag von 3,51 € für dieses System gewonnen werden kann, s. Bild 7.6 rechts.

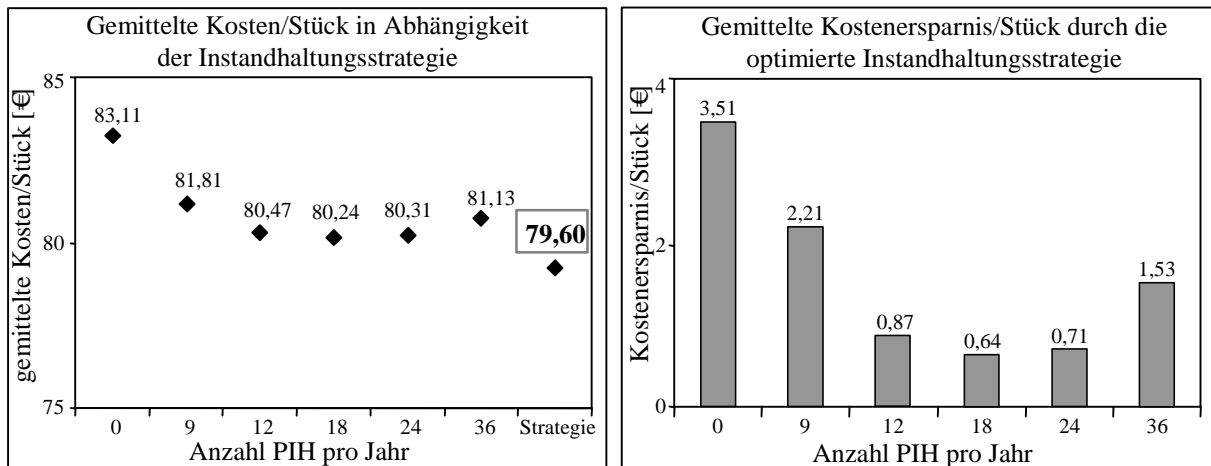


Bild 7.6: Auswertung der gemittelten Stückkosten

Ebenso ergibt im Vergleich mit der Strategie 18 Termine pro Jahr, die bis dahin am günstigsten bezogen auf die Stückkosten war, dass pro produziertem Auftrag 0,64 € eingespart werden können.

Eine zweite Fragestellung setzt voraus, dass pro Jahr eine Anzahl von 7000 Aufträgen erwartet und produziert werden können. Um zu bewerten, wie hoch das Risiko ist, diese Produktionsleistung nicht zu erzielen wird das System mit Hilfe des Expected Shortfalls für eine Produktionsleistung von 7000 Bandsägen pro Jahr ermittelt. Bild 7.7 links zeigt, dass bei einer Strategie mit rein korrekativer Instandhaltung dazu führt, dass in 59 von 100 Fällen die erwartete Produktionsleistung erfüllt wird entsprechend beträgt der Expected Shortfall 41%. Wird der Betrachtung zu Grunde gelegt, dass ein Risiko von 20% ertragbar ist (in 80 von 100 Fällen liegt die Produktionsleistung höher) so ergeben sich in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie verschiedene VaR. So können bei diesem Risiko je nach Strategie zwischen 6752 und 7444 Teile pro Jahr produziert werden, s. Bild 7.7 rechts.

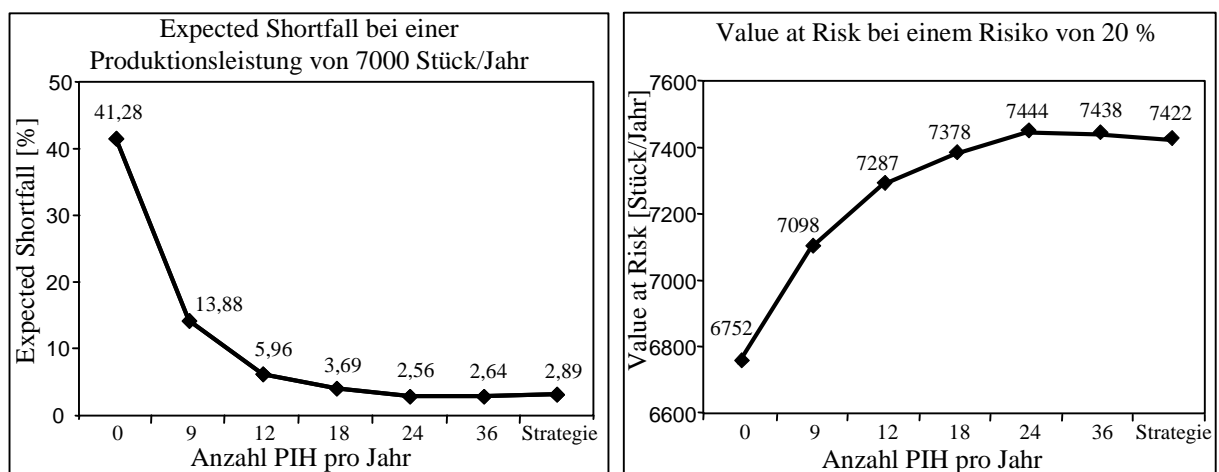


Bild 7.7: Expected Shortfall und Value at Risk

Somit wäre, wenn der Expected Shortfall oder der VaR der Entscheidung zu Grunde gelegt, wäre die Strategie mit monatlichem Turnus zu bevorzugen. Da bei dieser Strategie die größte Anzahl an Teilen produziert werden konnte. Allerdings sind bei der gemischten Strategie die Stückkosten geringer und die Abweichung des Expected Shortfall bzw. VaR so gering, dass die Entscheidung dennoch auf die Instandhaltungsstrategie mit für jede Station angepassten Instandhaltungsintervallen fallen könnte.

## 7.2 Zahnradfertigung (Flow-Shop)

Für das zweite Anwendungsbeispiel wird eine Zahnradfertigung analysiert, bei der ein Stirnrad hergestellt wird, s. Bild 7.8.

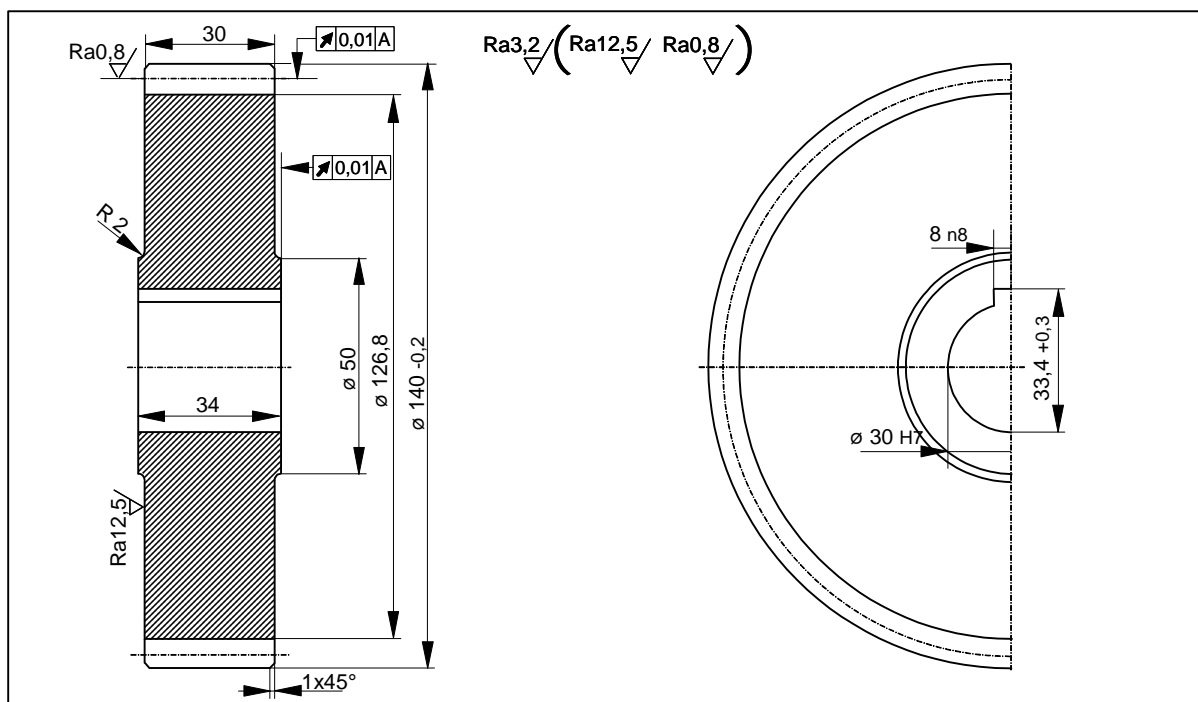


Bild 7.8: Zeichnung des Zahnrades

Im Folgenden werden Produktionsablauf und -ausfälle beschrieben und die Instandsetzungs- und Instandhaltungsmaßnahmen erläutert.

### 7.2.1 Fertigungsprozess

Die Herstellung eines Zahnrades kann mit verschiedenen Fertigungsverfahren ausgeführt werden. Eine Vielzahl von Verfahren gibt es speziell in der Verzahnungsherstellung. Im Folgenden werden jedoch nur die in der durchgeführten Simulation gewählten Fertigungsverfahren beschrieben.

**Sägen:** Zu Beginn wird Rohmaterial in Stangenform angeliefert und mit Hilfe eines Bandsägeautomaten auf die entsprechende Breite des Zahnrades getrennt.



**Drehen:** Die Mantel- und Innenfläche und die beiden Stirnflächen werden in einem Bearbeitungszentrum durch ein Drehverfahren auf die geforderten Abmaße gespannt.

**Wälzfräsen:** Beim Wälzfräsen führen Werkstück und Werkzeug eine synchronisierte Drehbewegung aus. Die Schnittbewegung wird von dem rotierenden Fräser ausgeführt. Zu der rotatorischen Bewegung überlagert sich eine translatorische Bewegung des Wälzfräasers in Richtung der Werkstückachse, wodurch die Evolventenform des Zahnrades entsteht.

**Wärmebehandlung:** Nach der Herstellung der groben Zahnradkontur wird durch Einsatzhärten die geforderte Oberflächenhärte erreicht. Hierbei muss die Oberflächenschicht einen Kohlenstoffgehalt von ca. 1 % erreichen, während der Kohlenstoffgehalt des Kerns maximal 0,15 % betragen darf. Die Oberfläche wird dabei durch gezielte Diffusion mit Kohlenstoff angereichert. Dieser Vorgang geschieht im austenitischen Zustand von Stahl, in der Regel bei Temperaturen zwischen 880 und 980 °C. Anschließend wird das Werkstück abgeschreckt. Die dabei entstehenden Spannungen im Werkstück werden anschließend durch Anlassen auf 100 bis 350 °C reduziert.

**Plan- und Innenschleifen:** Die Stirn- und Innenmantelflächen des Stirnrads unterliegen gewissen Anforderungen an die Form- und Maßtoleranzen, um ordnungsgemäße Montage und Betrieb zu gewährleisten. Diese Toleranzen werden durch je einen Plan- und einen Innenschleifvorgang erreicht.

**Zahnschleifen:** Im letzten Bearbeitungsschritt werden die Zähne durch Profilschleifen nachgearbeitet. Das kontinuierliche Profilschleifen zeichnet sich durch eine genau profilierte Schleifscheibe, auch Schleifschnecke genannt, aus. Es erfolgt dabei keine Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug, sondern nur eine Rotation beider Teile. Für jede unterschiedliche Zahnflankenform ist eine eigene Schleifschnecke nötig.

**Messen:** Nachdem alle Fertigungsschritte durchlaufen wurden, erfolgt eine letzte Zahnraduntersuchung mit Hilfe eines Koordinatenmessgerätes, um für nicht maßhaltige Zahnräder Nacharbeit einzuleiten oder falls dies nicht mehr möglich ist, als Ausschuss zu deklarieren.

### 7.2.2 Verlustquellen

Neben den im vorherigen Beispiel beschriebenen Verlustquellen, wie Qualitätsverluste und Werkzeugausfälle, wurden das Ausfallverhalten der Maschinen sowie der kurzzeitigen Störungen detaillierter untersucht.

Um diese Ausfälle und kurzzeitigen Störungen genauer zu spezifizieren, lassen sich diese in unterschiedliche Ausfallarten unterteilen. Mit Hilfe einer ABC-Analyse kön-

nen die auftretenden Ausfallarten klassifiziert werden, so dass die Konzentration auf die bedeutendsten Verlustquellen (A- und B-Ausfälle) gelegt werden kann. Die dadurch betrachteten Verlustquellen sind in Bild 7.9 dargestellt. Dabei werden die Anlagenausfälle aufgeteilt in Ausfallarten, die ein zeitabhängiges oder zufälliges Ausfallverhalten zeigen.

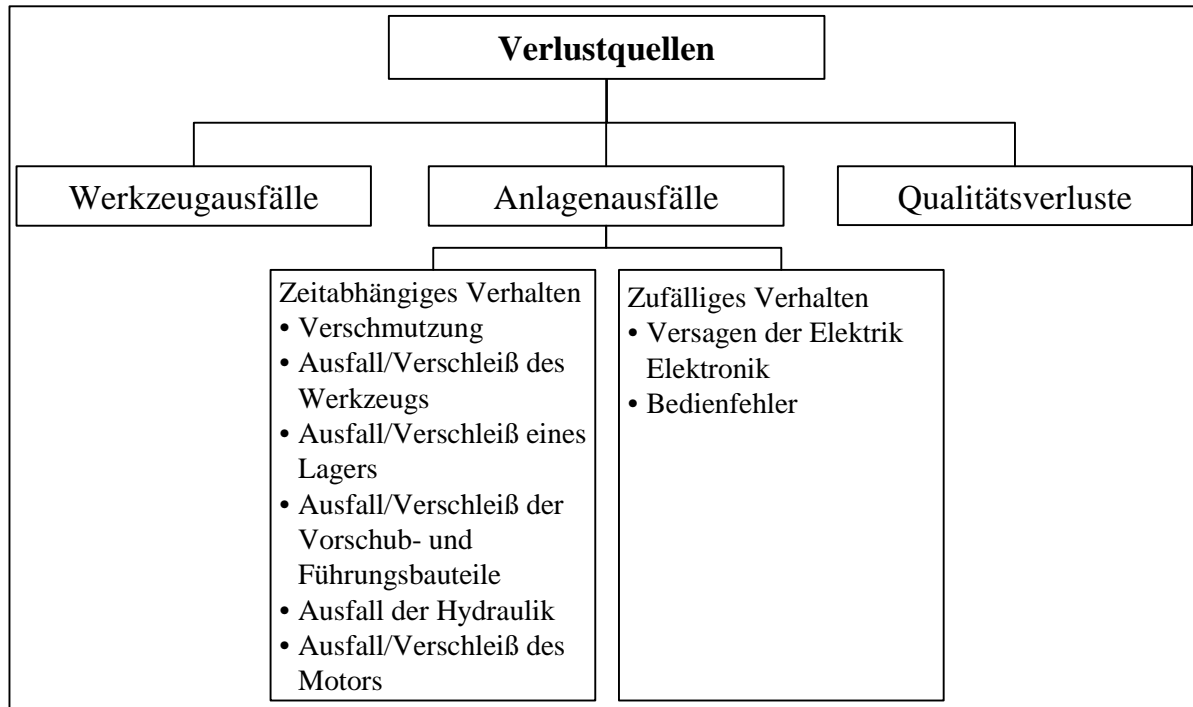


Bild 7.9: Übersicht der Verlustquellen

### 7.2.3 Instandhaltung

Die Instandhaltung umfasst Maßnahmen, um die ausgefallenen Werkzeugmaschinen bzw. Werkzeuge wieder in funktionsfähigen Zustand zu bringen oder die Funktionsfähigkeit zu wahren. Bei der betrachteten Anlage wird zwischen korrektiven, planmäßigen und zustandsorientierten Instandhaltungsmaßnahmen unterschieden.

**Korrektive Instandhaltung:** Erfolgt ein Ausfall einer der Komponenten, wird eine korrektive Instandhaltungsmaßnahme eingeleitet. Diese Maßnahme hängt von der ausgefallenen Komponente ab. Es wird dabei unterschieden zwischen Ausfällen, die vom Arbeiter selbständig behoben werden können, Ausfälle bei denen ein Meister oder Elektriker erforderlich ist und Ausfälle, die von einem Instandhaltungsteam behoben werden müssen.

**Planmäßige Instandhaltung:** Nach einer vorgegebenen Zeitdauer wird eine planmäßige Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt. Diese wird von einem Instandhaltungsteam durchgeführt.

Hierbei werden bei der betrachteten Anlage folgende Arbeiten durchgeführt:

- Reinigung der Maschine
- Tausch des Werkzeugs
- Schmierung der Vorschubeinheit samt Führungen und Austausch von Verschleißteilen
- Schmierung der Lager
- Überprüfung der Hydraulik und Austausch verschleißanfälliger Hydraulikteile
- Austausch verschleißanfälliger Motorteile

**Zustandsorientierte Instandhaltung:** Die zustandsorientierte Instandhaltung überprüft in festgelegten Intervallen den Zustand der Lager und tauscht diese bei Unterschreitung einer bestimmten Schwelle aus.

Die untersuchten Instandhaltungsstrategien unterscheiden sich in Art und Häufigkeit der Maßnahmen wie Bild 7.10 zeigt:

- nur korrektive Instandhaltung
- korrektive und planmäßige Instandhaltung mit verschiedenen Instandhaltungszyklen (9, 12, 18, 24 Mal pro Jahr)
- korrektive, planmäßige und zustandsorientierte Instandhaltung mit verschiedenen Instandhaltungszyklen (9 Mal planmäßige und 18 Mal zustandsorientierte, 12 Mal planmäßige und 24 Mal zustandsorientierte Instandhaltung)

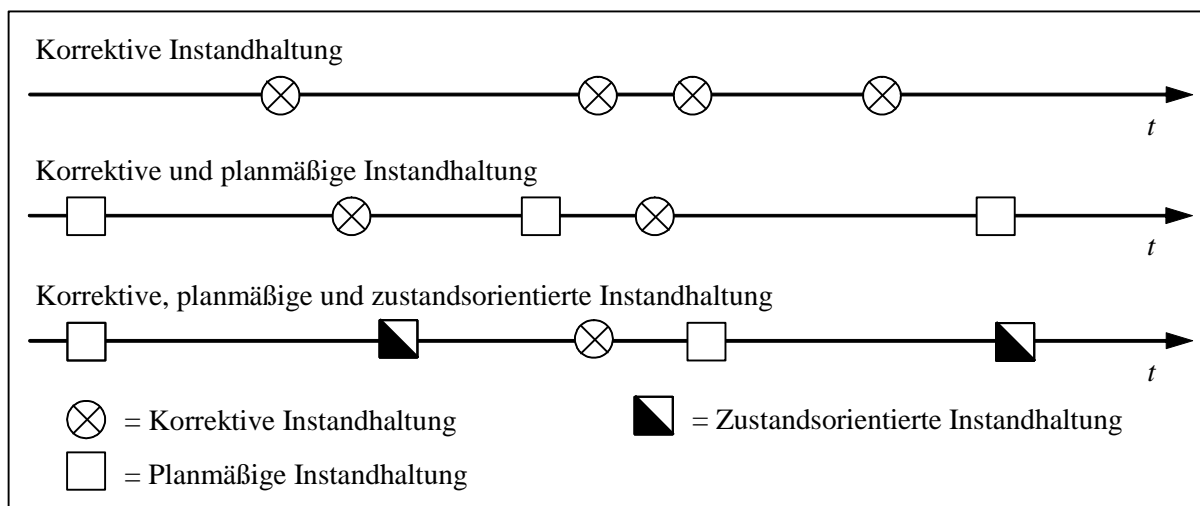


Bild 7.10: Betrachtete Instandhaltungsstrategien

#### 7.2.4 Kostenbewertung

Die Kosten pro Zahnrad ergeben sich aus der Summe von Personalkosten, Materialkosten sowie Fertigungskosten bezogen auf die produzierte Stückzahl.

### Ermittlung der Personalkosten

Die Personalkosten setzen sich zusammen aus den Kosten für je einen Arbeiter pro Station und den Kosten für einen Meister

$$\begin{aligned} \text{Kosten Personal} = & \text{Anzahl Arbeitsstunden pro Jahr} \cdot (\text{Anzahl Arbeiter} \\ & \cdot \text{Stundenlohn Arbeiter} + \text{Anzahl Meister} \\ & \cdot \text{Stundenlohn Meister}). \end{aligned} \quad (7.4)$$

Die Anzahl der Arbeitsstunden pro Jahr ergibt sich aus dem simulierten 2-Schicht-Modell zu 5475 h. Es wird angenommen, dass die Produktion an 365 Tagen im Jahr läuft. Der Stundenlohn der acht Arbeiter wird auf 25 € der Stundenlohn des Meisters auf 40 € festgelegt.

### Ermittlung der Materialkosten

Die Kosten für Roh- und Hilfsstoffe ergeben sich aus den Kosten je produziertem Teil und der Anzahl an produzierten Teilen. Die Rohstoffkosten pro Teil wurden auf 15 € die Hilfsstoffkosten pro Teil auf 2 € festgelegt.

### Ermittlung der Fertigungskosten

Die Fertigungskosten setzen sich zusammen aus den Kosten für Energie, Raum, kalkulatorische Zinsen, kalkulatorische Abschreibungen und Instandhaltungsmaßnahmen.

In den **Instandhaltungskosten** sind die Kosten für korrektive, planmäßige und zustandsorientierte Instandhaltung enthalten:

$$\begin{aligned} \text{Kosten IH} = & \sum_i (\text{Anzahl Ausfälle} \cdot (\text{Kosten/Korr}) + \text{Anzahl PIH} \cdot (\text{Kosten/PIH}) \\ & + \text{Anzahl ZIH} \cdot (\text{Kosten/ZIH})). \end{aligned} \quad (7.5)$$

Eine Verkürzung der Instandhaltungsintervalle bewirkt eine Verringerung der nötigen Instandsetzungsmaßnahmen und damit eine Kostenreduzierung. Die Kosten für planmäßige Instandhaltungen steigen jedoch linear mit der Erhöhung der Instandhaltungsmaßnahmen pro Jahr. Aus diesem Zusammenhang lässt sich ein Kostenminimum für die Instandhaltungskosten errechnen.

Die **kalkulatorische Abschreibung** gibt den Wertverlust von Investitionen an. Es existieren viele unterschiedliche Abschreibungsmodelle, wobei in dem hier gewählten Beispiel ein einfaches, lineares Modell gewählt wurde. Die jährliche Abschreibungssumme ergibt sich folglich aus dem Wiederbeschaffungswert und der Abschreibungsdauer, s. Gl. 7.2. Die Anschaffungskosten können Tabelle 7.1 entnommen werden. Darin enthalten sind außerdem anfallende Transport-, Installations- und Schulungskos-

ten. Der Abschreibungszeitraum variiert zwischen sechs und acht Jahren je nach Station [BdF2002].

Tabelle 7.1: Energieverbrauch und Anschaffungskosten der einzelnen Stationen

Station	Energie [kW]	Anschaffungskosten [€]	Station	Energie [kW]	Anschaffungskosten [€]
Bandsäge	10	20.000	Schleifmaschine 1	10	10.000
Drehmaschine	20	50.000	Schleifmaschine 2	10	10.000
Fräsmaschine	20	50.000	Schleifmaschine 3	10	20.000
Härteofen	30	10.000	Messeinrichtung	1	30.000

Die **Energiekosten** lassen sich aus der Betriebszeit der jeweiligen Maschine, der Leistung der Maschine und dem Strompreis errechnen. Der Strompreis ist mit 0,1 €/kWh festgelegt und ist somit direkt von der Anzahl an Betriebsstunden und damit von der Verfügbarkeit der jeweiligen Station abhängig. Der jeweilige Verbrauch der einzelnen Stationen ist in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Die **Raumkosten** wurden für jede Strategie als identisch angenommen und belaufen sich auf 4.000,00 € für jede Station, nur die letzte Station Messen wurde aufgrund des geringeren Raumbedarfs mit 2.000,00 € festgelegt.

Bei den **kalkulatorischen Zinsen** handelt es sich um Zinsen, die erzielt worden wären, wenn Kapital für Maschinen und noch nicht fertig gestellte Teile statt es im Unternehmen zu investieren auf dem Kapitalmarkt angelegt worden wäre, s. Gl. 7.3. Die Kapitalbindung noch nicht fertig gestellter Teile lässt sich aus dem jeweiligen Pufferbestand und dem Wert der darin gelagerten Teile ermitteln. Der Wert der Teile ergibt sich aus den anteiligen Lohnkosten, den anteiligen kalk. Abschreibungen und den Kosten für Roh- und Hilfsstoffe

$$\text{Kapitalbindung in Puffer } n = (n/8 \cdot \text{Lohnkosten gesamt} + \sum_{i=1}^n \text{kalk. Abschreibung} + \text{Kosten Roh- und Hilfsstoffe}) / \text{Anzahl prod. Teile.} \quad (7.6)$$

Diese gesamten kalkulatorischen Zinsen ergeben sich dann gemäß Gl. 7.3.

### 7.2.5 Bewertung der Ergebnisse

Für die nachfolgenden Ergebnisse der Simulationsexperimente wurde die Anzahl der Replikationen ebenfalls so gewählt, dass bei einem Vertrauensbereich von 95% ein maximaler relativer Fehler von 2% auftrat. Das Modell wurde über einen Zeitraum von 8 Jahren betrachtet. Die Simulationen wurden mit einem Pentium 4 Prozessor mit

3,2 GHz Takt und 1 GB RAM durchgeführt und benötigten für eine Parametervariation 100 Stunden.

Für diese Fertigungsanlage stellen die Stückkosten den zu minimierenden Zielwert dar. Je nach Strategie ergeben sich verschiedene Kosten und verschiedene Stückzahlen.

Bei diesem Beispiel zeigt sich, dass mit einem kürzer werdenden planmäßigen Instandhaltungsintervall die Stückkosten sinken. Zwar steigen die Instandhaltungskosten bei kürzeren Intervallen der Instandhaltungen, allerdings steigen dadurch die Verfügbarkeit der Anlage und damit die möglichen Stückzahlen. Ein Kostenminimum wird bei einem Instandhaltungsintervall von zwei monatlichen (24 pro Jahr) planmäßigen Instandhaltungen erreicht, s. Bild 7.11.

Wird zusätzlich für die Überwachung der Lager der Maschinen eine zustandsorientierte Instandhaltung vorgesehen, so zeigt sich bei einer Strategie von 18-mal planmäßigen Instandhaltungen ergänzt um die Zustandsüberwachung der Lager, dass die Stückkosten verkleinert werden können. Diese Verringerung der Stückkosten ergibt sich daraus, dass durch den Einsatz der Zustandüberwachung Ausfälle der Lager verhindert werden können. Der mögliche Produktionszuwachs, der sich daraus ergibt, überwiegt die Kosten, die für die Anschaffung der Gerätschaften für die Zustandsüberwachung entstanden sind. Bei der Instandhaltungsstrategie mit 24 planmäßigen Instandhaltungen pro Jahr zeigt sich zwischen der Strategie mit und ohne Einsatz der Zustandsüberwachung kein signifikanter Unterschied, s. Bild 7.11. Denn bei diesen häufigen Instandhaltungsintervallen konnte bereits ein Großteil der Lagerausfälle auch ohne die zusätzliche Überwachung vermieden werden.

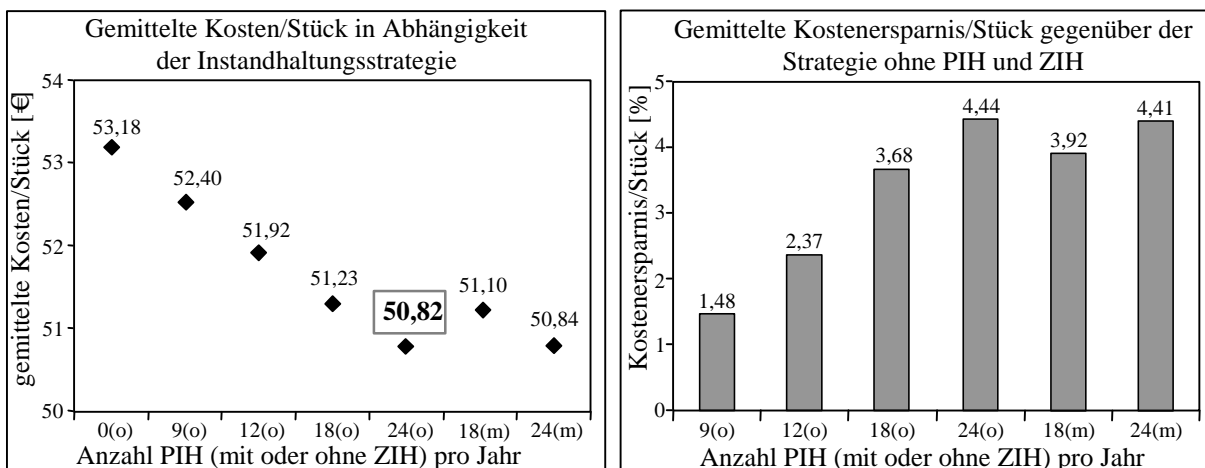
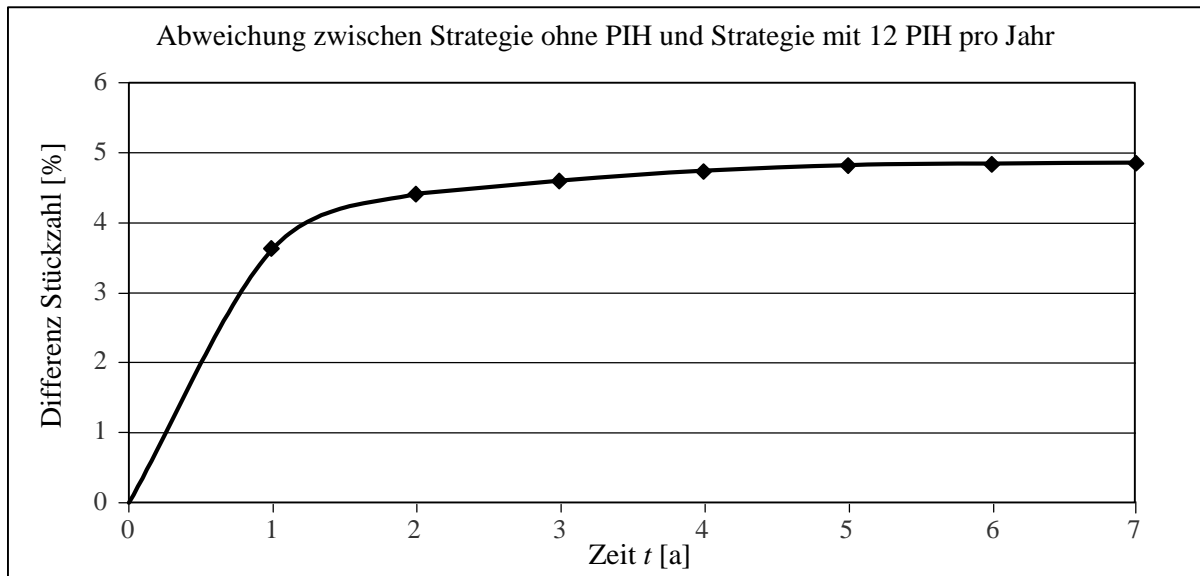


Bild 7.11: Auswertung der gemittelten Stückkosten

Der Nutzen von planmäßigen oder zustandsorientierten Instandhaltungsmaßnahmen zeigt sich erst nach einer gewissen Zeit. In Bild 7.12 ist der prozentuale Unterschied

der Stückzahlen dargestellt, der zwischen einer Strategie ohne planmäßige Instandhaltungen und einer Strategie, bei der monatlich planmäßige Instandhaltungsmaßnahmen vorgesehen sind, entsteht.



*Bild 7.12: Prozentuale Differenz der Stückzahlen*

Der Unterschied bei der möglichen produzierbaren Stückzahl steigt mit zunehmender Zeit. Beläuft sich die Differenz nach einem Jahr auf 3,6%, so zeigt sich nach fünf Jahren eine größere Abweichung von 4,8% zwischen der produzierten Stückzahl bei den beiden Anlagen. Daraus lässt sich für diese Anwendung entnehmen, dass die Wirkung von planmäßigen Instandhaltungsmaßnahmen mit zunehmendem Alter der Anlage größere Wirkung zeigt auf die altersabhängigen Ausfälle.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Das heutige Wirtschaftsumfeld produzierender Unternehmen ist gekennzeichnet durch einen hohen Wettbewerb, der unter anderem einen hohen Kostendruck bedingt. Über die Optimierung der Instandhaltungsprozesse von Produktionsanlagen steht den Unternehmen ein hohes Kostensenkungspotential zur Verfügung. Die Komplexität dieser Problemstellung erfordert es, diese Optimierungen anhand von realitätsnahen Modellen zu untersuchen und die Ergebnisse auf das reale System zu übertragen.

Kernpunkt dieser Arbeit bildete daher die Entwicklung eines Verfahrens, das es ermöglicht, Produktionsanlagen gesamtheitlich unter Berücksichtigung von Produktionsprozess, verschiedenen Verlustquellen sowie möglicher Instandhaltungsstrategien zu modellieren und zu analysieren.

Dafür wurden zunächst bekannte Modellierungs- und Analyseverfahren bezüglich ihrer Anwendbarkeit auf die Problemstellung untersucht sowie deren Vor- und Nachteile bestimmt. Viele der Verfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass sie das stochastische Verhalten der Produktionssysteme und die zu Grunde liegende Datenbasis nur unzureichend abbilden können.

Im Folgenden wurde die Vorgehensweise für die Analyse von Produktionsanlagen mit Hilfe von Modellierung und folgender Analyse der Modelle vorgestellt sowie die einzelnen Arbeitspakete für eine solche Untersuchung festgelegt.

Als erstes erfolgte die Abgrenzung des Systems Produktion. Danach wurde auf Basis der Systemtheorie das abgegrenzte System über seine vier Bestandteile Hierarchie, Elemente, Relationen und Struktur sowie Attribute näher beschrieben. Bevor eine Systemmodellierung und -analyse erfolgte, musste festgelegt werden, welche Bewertungsgrößen die Fragestellung beantworten. Dafür wurden die gängigen Kennwerten wie z. B. Durchlaufzeiten, Overall Equipment Effectiveness, usw. um, aus der finanzwirtschaftlichen Risikotheorie abgeleitete, Bewertungsgrößen, wie z.B. die Reparaturwürdigkeit, erweitert.

Im nächsten Schritt wurden die mögliche Herkunft und die damit Eigenschaften der Eingangsinformationen untersucht. Viele dieser Informationen sind mit Unschärfen behaftet. Je nach Herkunft und Art der Informationen handelt es sich dabei um aleatorische sowie epistemische Unschärfen. Da in vielen Fällen nicht nur eine Informationsbasis zur Verfügung steht, sondern die Informationen beispielsweise aus Daten-



banken und Expertenwissen vorliegen können, wurden verschiedene Verfahren untersucht, um diese Informationen zu kombinieren. Nach der Kombination der Informationen liegen weiterhin mit Unschärfe behaftete Daten vor, die im Folgenden als Eingangsgrößen für das Modell zielführend genutzt werden müssen. Dafür wurde neben den reinen Randbetrachtungen noch ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, die Unschärfe direkt über eine zweistufige Monte-Carlo-Simulation mit zu betrachten.

Aus der Problemstellung, der Systemabgrenzung und -beschreibung sowie den Eingangsinformationen wurden die Anforderungen an ein Modellierungs- und Analyseverfahren definiert. Dabei zeigte sich, dass die erweiterten farbigen stochastischen Petrinetze (ECSPN) diese am besten, jedoch nicht vollständig erfüllen. Daher wurden diese um verschiedene Eigenschaften erweitert, wie weitere Verteilungsfunktionen, stochastische Kostenvariablen, Zufallsvariablen auf Kanten sowie die Verwendbarkeit von unscharfen Eingangsparametern. Als Analyseverfahren für diese zusätzlich erweiterten ECSPN wurde eine zweistufige Monte-Carlo-Simulation entwickelt. Die Modellierung und Analyse dieser ECSPN kann mit Hilfe des Programmpaketes REALIST erfolgen.

Um die Anwendbarkeit dieses Verfahrens in der Produktions- und Instandhaltungsplanung zu untersuchen, wurden für zwei verschiedenen Arten an Produktionssystemen exemplarisch Modelle aufgebaut und analysiert. Dabei wurde zum einen eine Bandsägenfertigung auf Basis einer Job-Shop-Struktur und zum anderen eine Zahnradfertigung auf Basis einer Flow-Shop-Struktur betrachtet. Hierzu wurden jeweils die Produktionsstrukturen aufgebaut und verschieden Verlustquellen wie Anlagen- und Werkzeugausfälle, kurzzeitige Störungen sowie Qualitätsverluste berücksichtigt. Um die optimale Produktionsstruktur und Instandhaltungsstrategie zu ermitteln, wurden Simulationsläufe für verschiedene Kombinationen der beiden durchgeführt und somit das Optimum ermittelt. Dabei zeigt sich, dass das vorgestellte Verfahren prinzipiell zur Optimierung der Produktions- und Instandhaltungsplanung herangezogen werden kann.

Als zukünftige Erweiterungen des Verfahrens können zum einen eine Beschleunigung der Simulation und zum anderen eine Automatisierung der Optimierung erfolgen. Eine Verringerung der Dauer der Simulationsläufe kann durch eine verteilte Simulation oder durch gewichtete Simulation zur besseren Berücksichtigung seltener Ereignisse bzw. durch varianzreduzierende Maßnahmen erreicht werden. Die automatisierte Optimierung von Modellparametern kann mittels evolutionärer Algorithmen erfolgen. Sie sind in der Lage, mehrdimensionale Optimierungsaufgaben zu lösen, so dass damit mehrere Parameter wie beispielsweise Instandhaltungsintervalle, Lagerbestände und Bestellzeitpunkt bezogen auf die Stückkosten optimiert werden könnten.

# Literatur

- [Aal1998] van der Aalst, W.M.P.; De Michelis, G.; Ellis, C.A. (Eds.): Proc. Workflow Management: Net-based Concepts, Models, Techniques, and Tools. WFM'98, Lisbon, Portugal. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, Computing Science Report 98/7, June 1998.
- [Ace2002] Acerbi, C.; Tasche, D.: On the Coherence of Expected Shortfall. *Journal of Banking and Finance* 26, pp.1487-1503, 2002.
- [Ajm1984] Ajmone Marsan, M.; Balbo, G.; Conte, G.: A Class of Generalized Stochastic Petri Nets for the Performance Evaluation of Multiprocessor Systems. In: *ACM Trans. on Computer Systems*, Vol. 2, No. 2, pp. 93-122, 1984.
- [Ajm1986] Ajmone Marsan, M.; Chiola, G.: On Petri Nets with Deterministic and Exponential Transition Firing Times. In: *Proc. of the 7<sup>th</sup> European Workshop on Application and Theory of Petri Nets*, Oxford, pp. 151-165, 1986.
- [Alb2001] Albrecht, P.: Mathematische Modellierung von Kredit- und Marktrisiken. Schierenbeck/Rolfes/Schüller (Hrsg.): *Handbuch Bankcontrolling*, 2. Aufl., Wiesbaden: Gabler Verlag, 2001.
- [Alb2004] Albrecht, P.: Zur Messung von Finanzrisiken. *Mannheimer Manuskripte zu Risikotheorie, Portfolio Management und Versicherungswirtschaft* Nr.143, In: *Encyclopedia of Actuarial Science*. New York: Wiley, 2004.
- [Ali2005] Alisch, K.; Winter, E.; Arentzen, U.: *Gabler Wirtschaftslexikon*. 16. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2005.
- [Alr1997] Al-Radhi, M.: *Moderne Instandhaltung - TPM : höhere Anlageneffektivität mit total productive maintenance*. München Wien: Hanser, 1997.
- [Art1999] Artzner, P.; Delbaen, F.; Eber, J.-M.; Heath, D.: Coherent Measures of Risk. *Mathematical Finance* 9, pp. 203-228, 1999.
- [Ayy2000] Ayyub, M.B.: *Methods for Expert-Opinion Elicitation of Probabilities and Consequences for Corps Facilities*. US Army Corps of Engineers,

- Institut of Water Resource, 2000.
- [Ban1997] Bandemer, H.: Ratschläge zum mathematischen Umgang mit Ungewissheit. Stuttgart Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft, 1997.
- [Ban2000] Banks, J.; Carson, J.S.; Nelson, B.: Discrete-Event System Simulation. New Jersey: Prentice-Hall, 2000.
- [Bas2006] Basler Ausschuss für Bankenaufsicht: Basel II: International Convergence of Capital Measurement and Capital Standards: A Revised Framework - Comprehensive Version. Basel: 2006.
- [Bau1991] Bause, F.: Funktionale Analyse zeitbehalteter Petri-Netze. Dissertation, Universität Mannheim, 1991.
- [Bau1993] Bause, F.: Queueing Petri Nets: A Formalism for the Combined Qualitative and Quantitative Analysis of Systems. In: *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Workshop on Petri Nets and Performance Models*, IEEE, 1993.
- [Bau1996] Baumgarten, B.: Petri-Netze: Grundlagen und Anwendungen. Heidelberg Berlin Oxford: Spektrum, Akad. Verl., 1996.
- [Bau2002] Bause, F.; Kritzinger, P.: Stochastic Petri nets – an introduction to the theory. Braunschweig Wiesbaden: Vieweg, 2002.
- [Bec1994] Beckmann, G.; Marx, D.: Instandhaltung von Anlagen – Konzepte, Strategien, Planung. Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1994.
- [BdF2002] Bundesministerium der Finanzen: Abschreibungstabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter. Berlin: 2002.
- [Bei1995] Beichelt, F.: Stochastik für Ingenieure. Stuttgart: Teubner, 1995.
- [Bei1997] Beichelt, F.: Stochastische Prozesse für Ingenieure. Stuttgart: Teubner, 1997.
- [Bel2000] Belyaev, Y.K.; Kahle, W.: Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik bei der Analyse von Zuverlässigkeitsdaten. Stuttgart Leipzig Wiesbaden: Teubner, 2000.
- [Ber1995] von Bertalanffy, L.: General System Theory. 12. Auflage, New York: George Braziller, 1995.
- [Ber1996] Bernoulli, D.: Specimen theoriae novae de mensura sortis. Comentarum Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae 5, dt. Übersetzung von Kruschwitz, L.; Kruschwitz, P.: Entwurf einer neuen Theorie zur Be-

wertung von Lotterien. Die Betriebswirtschaft 56, S. 733-742, 1996.

- [Ber2004] Bertsche, B.; Lechner, G.: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau*. Berlin Heidelberg: Springer, 2004.
- [Bir2004] Birolini, A.: *Reliability Engineering: theory and practice*. 4th ed., Berlin Heidelberg: Springer, 2004.
- [Bol1997] Bolch, G.; Abu El-Qomsan, M.: *Analyse von Warteschlangennetzen mit asymmetrischen Knoten und mehreren Auftragsklassen*. Technischer Bericht des Instituts für Mathematische Maschinen und Datenverarbeitung, Universität Erlangen-Nürnberg, 1997.
- [Bol2006] Bolch, G.: *Queueing networks and Markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications*. 2. ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2006.
- [Boo1988] Booker, J.; Meyer, M.: *Sources and Effects of Interexpert Correlation: An Empirical Study*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 8:1, pp. 135-142, January/February 1988.
- [Boo2000] Booker, J.; Bement, T.; Meyer, M.; Kerscher, W.: *PREDICT: A New Approach to Product Development and Lifetime Assessment Using Information Integration Technology*. In: *Sixth Army Conference on Applied Statistics*, 2000.
- [Bra2000] Carlin, B.P.; Louis, T.A.: *Bayes and Empirical Bayes Methods for Data Analysis*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2000.
- [Bro2001] Bronstein, I.N.; Semendjajew, K.A.; Musiol, G.; Mühlig, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. 5., überarb. u. erw. Aufl., unveränd. Nachdr. Thun, Frankfurt am Main: Deutsch, 2001.
- [Coo1991] Cooke, R.M.: *Experts in Uncertainty – Opinion and Subjective Probability in Science*. New York Oxford: Oxford University Press, 1991.
- [Coo2006] Coolen, F.P.A.; Coolen-Schrijner, P.: *On zero-failure testing for Bayesian high-reliability demonstration*. Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: *Journal of Risk and Reliability*. IMechE Vol. 220, Num. 1/2006.
- [Cor1986] Corbeel, D.; Gentina, J.C.; Vercauter, C.: *Application of an extension of Petri nets to modelization of control and production processes*. In: *Rozenberg, G. (Ed.): Advances in Petri Nets: Lecture Notes in Computer*

- Science, Vol. 222, pp. 163-180, 1986.
- [Des1995] Desrochers, A.A.; Al-Jaar, R.Y: Applications Of Petri Nets In Manufacturing Systems. Modeling, Control, And Performance Analysis. IEEE Press, 1995.
- [DiC1993] DiCesare, F.; Harhalakis, G.; Proth, J. M.; Silva; M.; Vernandat, F.B.: Practice of Petri Nets in Manufacturing. London: Chapman & Hall, 1993.
- [DIN1979] Deutsches Institut für Normung: DIN 31000-2: Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten technischer Erzeugnisse, Begriffe der Sicherheitstechnik – Grundbegriffe. Berlin: 1979.
- [DIN1983] Deutsches Institut für Normung: DIN 66001: Informationsverarbeitung; Sinnbilder und ihre Anwendung. Berlin: 1983.
- [DIN2001] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 13306: Begriffe der Instandhaltung. Berlin: 2001.
- [DIN2003] Deutsches Institut für Normung: DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: 2003.
- [DIN2005] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 9000: 2005-12: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Genf: 2005.
- [Dub2000] Dubi, A.: Monte Carlo Applications in Systems Engineering. Chichester: Wiley, 2000.
- [Dug1984] Dugan, J.B.: *Extended Stochastic Petri Nets: Applications and Analysis*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering, Duke University, 1984.
- [Dum2001] Dumas, M.; Ter Hofstede, A.H.M.; Gogolla, M.; Kobryn, C.: UML Activity Diagrams as a Workflow Specification Language. Proc. UML 2001, Oktober 2001, Toronto, Kanada. Berlin: Springer, 2001.
- [Erl2002] Erler, T.; Ricken, M.: UML. Landsberg: verlag moderne industrie Buch AG & Co. KG , 2002.
- [EPR1997] N.N.: EPRD-97 - Electronic Parts Reliability Data. New York: SRC (RAC), 1997.
- [Fan2005] Fandel, G.: Produktion I: Produktions- und Kostentheorie. Berlin Heidelberg: Springer, 2005.

- [Far1996] Farny, D.: Risikomanagement in der Produktion, In: Kern, W. (Hrsg.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, 2. Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, 1996.
- [Fis1996] Fishman, G.S.: Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications. NewYork Berlin Heidelberg: Springer, 1996.
- [FMD1997] N.N.: FMD-97 - Failure Mode Distribution Data. NewYork: SRC (RAC), 1998.
- [Fra1988] Franke, G; Hax, H.: Finanzwirtschaft der Unternehmung und Kapitalmarkt. Berlin: Springer, 1988.
- [Fra1999] Frahm, G.: Ermittlung des Value-at-Risk von Finanzportefeuilles mit Methoden der Extremwerttheorie. Diplomarbeit Universität Köln, 1999.
- [Fra2004] Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung -IPA-, Stuttgart: Instandhaltung 2004 - Zeitgemäße Instandhaltung: Wertschöpfend und produktivitätssteigernd. Fachkongreß, Bad Homburg, Oktober 2004.
- [Fri1984] Friedrich, R.: Systemtheorie und ökonomische Modelle. Freiburg: Haufe, 1984.
- [Fri2001] Fritz, A.: Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2001.
- [Gag2001] Gagsch, B; Herbst, C.: Ausrichtung der Montage auf den Markt mit Hilfe der Simulation. In: Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Horváth, P.; Zahn, E. (Hrsg.): Montageplanung – effizient und marktgerecht. Berlin Heidelberg: Springer, 2001.
- [Gan2006] Gandy, A.; Jäger, P.; Jensen, U.; Bertsche, B.: Berücksichtigung von Ungenauigkeiten bei Zuverlässigkeitsanalysen in frühen Entwicklungsphasen. Beitrag in der Zeitschrift „Konstruktion“, Springer VDI, Vol. 6-2006, S. 78-82, 2006.
- [Ger2000] German, R: Performance Analysis of Communication Systems: Modeling wit Non-Markovian Stochastic Petri Nets. New York: Wiley, 2000.
- [Gir2003] Girault, C.; Valk, R. (Eds.): Petri Nets for Systems Engineering. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2003.
- [Gro1984] Großeschallau, W.: Materialflussrechnung. Berlin: Springer, 1984.

- [Gün2005] Günther, H.-O.: Supply-Chain-Management und Logistik : Optimierung, Simulation, Decision Support. Heidelberg: Physica, 2005.
- [Gut1983] Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band 1, Die Produktion, 24. Aufl.. Berlin Heidelberg NewYork: Springer, 1983.
- [Haa2002] Haas, P.: Stochastic Petri nets: modelling, stability, simulation. New York: Springer 2002.
- [Har1990] Hartberger, H.: Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme. Berlin Heidelberg: Springer, 1991 (zugl. Diss. Univ. München, 1990).
- [Hat1991] Hatono, I., Yamagata, K.; Tamura, H.: Modeling and On-Line Scheduling of Flexible Manufacturing Systems Using Stochastic Petri Nets. In: IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 17, No. 2, February 1991.
- [Hil1997] Hillier, F.S.: Operations Research. 5. Aufl. München: Oldenbourg, 1997.
- [Hit2007] Hitziger, T.: Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2007.
- [Hor1995] Hornbostel, D.: Methode zur Modellierung der Informationsverarbeitung in Industrieunternehmen. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, 1995.
- [Hüb2000] Hübinette, L.; Ekros, J.-P.: A Bayesian model for updating fault type knowledge. In: Proc. 25th Annual IEEE/NASA Software Engineering Workshop, November 2000.
- [Hul2006] Hull, J.C.: Options, Futures, and Other Derivatives. 6<sup>th</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 2006.
- [IEC2004] International Electrotechnical Commission: IEC/TR 62380: Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of Electronics components, PCBs and equipment. Genf: 2004.
- [ISO2005] International Organization for Standardization: ISO/IEC 19501: Unified Modeling Language (UML), Version 1.4.2. Genf: 2005.
- [Jäg2004] Jäger, P.; Bertsche, B.: A New Approach to Gathering Failure Behavior Information About Mechanical Components Based on Expert Knowledge. Proc. RAMS 2004, Los Angeles, USA: January 2004.

- [Jäg2006] Jäger, P.; Trost, M.; Bertsche, B.: A New Approach to Evaluate The Worthiness of Repair. Proc. RAMS 2006, Newport Beach, USA: January 2006.
- [Jäg2007] Jäger, P.: Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2007.
- [Jeh1997] Jehle, E.: Produktionswirtschaft, 5. Auflage, Verlag Recht und Wirtschaft: Heidelberg, 1985.
- [Jen1997a] Jensen, K.: Coloured Petri nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use, Volume 1, Basic Concepts. Berlin Heidelberg NewYork: Springer, 1997.
- [Jen1997b] Jensen, K.: Coloured Petri nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use, Volume 3, Practical Use. Berlin Heidelberg NewYork: Springer, 1997.
- [Jün2000] Jüngel, M.; Kindler, E.; Weber, M.: The Petri Net Markup Language; Petri Net Newsletter, Vol. 59, pp. 24-29, 2000.
- [Kel1994] Keller, G.; Meinhardt, S.: Business process reengineering auf Basis des SAP R/3-Referenzmodells. In: Scheer, A.-W. (Hrsg.): Prozessorientierte Unternehmensmodellierung. SzU, Band 43, Gabler: Wiesbaden, 1994.
- [Kl31993] Klein, B.; Mannewitz, F.: Statistische Tolerierung. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1993.
- [Kle2004] Klein, B.: Versuchsplanung - DoE : Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik. München Wien: Oldenbourg, 2004.
- [Koc2007] Kock Unternehmensgruppe: Imagebroschüre. Moorrege, 2007.
- [Kos1995] Košturiak, J.; Gregor, M.: Simulation von Produktionssystemen. Wien : Springer, 1995.
- [Kre1968] Krelle, W.: Präferenz- und Entscheidungstheorie. Tübingen: Mohr (Siebeck), 1968.
- [Kro2004] Krolo, A.: Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2004.
- [Kuh1993] Kuhn, A.; Reinhardt, A.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Handbuch Simulationsanwendungen in Produktion und Logistik. Braunschweig: Vieweg,



- 1993.
- [Kuh1998] Kuhn, A.; Rabe, M. (Hrsg.): Simulation in Produktion und Logistik – Fallbeispielsammlung. Berlin Heidelberg: Springer, 1998
- [Kül1999] Küll, R.; Stähly, P.: Zur Planung und effizienten Abwicklung von Simulationsexperimenten. In: Biethahn, J.; Hummeltenberg, W.; Schmidt, B.; Stähly, P.; Witte, T. (Hrsg.): Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe: State of the art und neuere Entwicklungen. Heidelberg: Physica-Verlag, 1999.
- [Lan1997] Langner, P.; Schneider, C.; Wehler, J.: Prozeßmodellierung mit Ereignisgesteuerten Prozeßketten (EPKs) und Petri-Netzen. In: Wirtschaftsinformatik 39 (1997) 5, S. 479-489, 1997.
- [Lin2000] Lindemann, T.: Konzept zum Aufbau prozessorientierter Qualitätsmanagement-systeme in der Textilindustrie. Aachen: Shaker, 2000 (zugl. Diss. Techn. Hochsch. Aachen, 1999).
- [Lei1988] Leibowitz, M.; Krasker, W.W.: Persistence of Risk: Shortfall Probabilities over the Long Term. In: Financial Analysts Journal, Nov-Dec 1988, pp. 40-47.
- [Lyo2001] Lyonnet, P.; Toscano, R.: Optimisation of Preventive Renewals on Maintenance by Using Expertons. In: Proc. 20th EsReDa Seminar on Operation Feedback Data and Knowledge Management for New Design, pp. 133-140, Rom: Juni 2001.
- [Mai2004] Maisch, M.; Bertsche, B.: Consideration of a Field Stress Distribution for the Reliability Test for Transmission Components. Proc. PSAM 7 / ESREL '04-Conference, pp. 1882-1887, Berlin: June 2004.
- [Man2003] Mannuß, O.: Konstruktions- und Verfügbarkeits-FMEA (KV-FMEA): Ein Ansatz zur verfügbarkeitsorientierten und instandhaltungsgerechten Entwicklung von Anlagen. In: Schraft, Rolf Dieter (Hrsg.) u.a.; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Die neuen Paradigmen in der Instandhaltung. Fraunhofer IPA Seminar F80, Stuttgart: Februar 2003.
- [Mar1959] Markowitz, H.M.: Portfolio-Selektion: Efficient Diversification of Investment. New Haven: Yale University Press, 1959.
- [Mar1982] Martz, H.F.; Waller, R.A.: Bayesian Reliability Analysis. New York: Wiley, 1982.

- [Mar2002] Marseguerra, M.; Zio, E.: Basics of the Monte Carlo Method with Applications to System Reliability. Hagen: LiLoLe-Verlag, 2002.
- [Mat1998] Matsumoto, M.; Nishimura, T.: Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudorandom Number Generator. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, Vol. 8, No. 1, pp. 3-30, 1998.
- [Mcn2000] McNulty, M.; Wilson, A.; Keller-McNulty, S.: Information Integration Technology. In: Sixth Army Conference on Applied Statistics, 2000.
- [Mee1998] Meeker, W.Q.; Escobar, L.A.: Statistical Methods for Reliability Data. New York: Wiley, 1998.
- [Mer1994] Mertins, K.; Süssenguth, R.; Jochem, R.: Modellierungsmethoden für rechnerintegrierte Produktionsprozesse: Unternehmensmodellierung, Softwareentwurf, Schnittstellendefinition, Simulation. München: Hanser, 1994.
- [Met1949] Metropolis, N.; Ulam, S.: The Monte-Carlo Method. *Journal of Amer. Stat. Assoc.*, Vol. 44, No. 247, pp. 335-341, 1949.
- [Mey1991] Meyer, M.A.; Booker, J.M.: Eliciting and Analyzing Expert Judgment: A Practical Guide. London, UK: Academic Press, 1991.
- [Mer1994] Mertins, K.; Süssenguth, R.; Jochem, R.: Modellierungsmethoden für rechnerintegrierte Produktionsprozesse: Unternehmensmodellierung, Softwareentwurf, Schnittstellendefinition, Simulation. München: Hanser, 1994.
- [Mol1981] Molloy, M.K.: On the Integration of Delay and Throughput Measures in Distributed Processing Models. PhD thesis, University of California, 1981.
- [Neb2006] Nebel, S.: Entwicklung eines Monte-Carlo Simulationsprogramms zur Analyse von verbundenen Systemmodellen. Diplomarbeit, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2006.
- [Nef2004] Neftci, S.N.: Principles of Financial Engineering. Amsterdam: Academic Press, 2004.
- [NPR1995] N.N.: NPRD-95 - Nonelectronic Parts Reliability Data: New York: SRC (RAC), 1995.
- [Oes2003] Oestereich, B.; Weiss, C.; Schröder, C.; Weilkens, T.; Lenhard, W.:

- Objektorientierte Geschäftsprozessmodellierung mit der UML. Heidelberg: dpunkt, 2003.
- [Olf2000] Olfert, K.: Materialwirtschaft. Ludwigshafen: Kiehl, 2000.
- [OMG2005] OMG: Unified Modeling Language: Superstructure version 2.0. Technical Report, Object Management Group, 2005.
- [Ort1991] Ortiz, N.R.; Wheeler, T.A.; Breeding, R.J.; Hora, S.; Meyer, M.A.; Keeney, R.L.: Use of Expert Judgment in NUREG-1150, Nuclear Engineering and Design, 126, 313-331, 1991.
- [Pat1993] Patzina, P.: Einsatz rechnergestützter Simulationswerkzeuge zur Planung von Produktionssystemen : Dargestellt an der Modellierung verschiedener Auftragseinplanungsverfahren. Würzburg: compuTEAM, 1993.
- [Pet1962] Petri, C.A.: Kommunikation mit Automaten. Dissertation, Institut für Instrumentelle Mathematik, Universität Bonn, 1962. Second Edition: New York: Griffiss Air Force Base, Technical Report RADC-TR-65--377, Vol.1, 1966.
- [Pli2002] Plinke, W.; Rese, M.: Industrielle Kosten Rechnung. Berlin: Springer, 2002.
- [Poz2002] Pozsgai, P.; Neher, W.; Bertsche, B.: Models to Consider Dependence in Reliability Calculation for Systems Consisting of Mechanical Components. In: Proc. of 3<sup>rd</sup> International Conference on Mathematical Methods in Reliability: Methodology and Practice, pp. 539-542, Trondheim, Norway, June 2002.
- [Poz2004a] Pozsgai, P.; Bertsche, B.: Integrating the Age Development and Operational Costs into a Comprehensive System Analysis Modelling Procedure. In: Proc. 26th ESReDA Seminar, 2004.
- [Poz2004b] Pozsgai, P.; Bertsche, B.: Conjoint Modelling with Extended Coloured Stochastic Petri Net and Reliability Block Diagram for System Analysis. In: Proc. PSAM 7 / ESREL 2004, pp. 1382-1387, 2004.
- [Poz2005] Pozsgai, P.: Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme. Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2005.
- [Pre1992] Press, W.H.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P.: Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. 2nd ed., Cam-

bridge: University Press, 1992.

- [Pro1996] Proth, J.-M.; Xie, X.: Petri nets: A tool for design and management of manufacturing. Sussex: Wiley, 1996.
- [Rei1998] Reisig, W.: Elements of distributed algorithms: modeling and analysis with Petri nets. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.
- [Rog1999] Rogler, S.: Risikomanagement im Industriebetrieb. Deutscher Universitäts Verlag, Wiesbaden, 2002. Zugl. Habilitationsschrift Universität Göttingen, 1999.
- [Rom2002] Rommelfanger, H.J.; Eickenmeier, S.H.: Entscheidungstheorie – Klassische Konzepte und Fuzzy Erweiterungen. Berlin Heidelberg: Springer, 2002.
- [Rop1975] Ropohl, G.: Systemtechnik – Grundlagen und Anwendungen. München: Hanser, 1975.
- [Ros1983] Rosenstengel, B; Winand, U.: Petri-Netze – eine anwendungsorientierte Einführung. Braunschweig: Vieweg, 1983.
- [REF1987] REFA Bundesverband e.V.: REFA Methodenlehre der Betriebsorganisation Teil 1, Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. München: Hanser, 1987.
- [Rud1979] Rudolph, B.: Kapitalkosten bei unsicheren Erwartungen. Berlin Heidelberg: Springer, 1979.
- [Sah1996] Sahner, R.; Trivedi, K.; Puliafito, A.: Performance and Reliability Analysis of Computer Systems. Norwell, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [San1999] Sandner, R.; Mauderer, M.: Integrierte Beschreibung automatisierter Produktionsanlagen - eine Evaluierung praxisnaher Beschreibungstechniken. Technischer Bericht, Technische Universität München, 1999.
- [Sch1992] Schmidt, D.: Strategisches Management komplexer Systeme. Frankfurt: Lang, 1992.
- [Sch1999a] Schneeweiss, W.G.: Petri nets for reliability modeling: in the fields of engineering safety and dependability. Hagen: LiLoLe, 1999.
- [Sch1999b] Schnieder, E.: Methoden der Automatisierung: Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme. Braun-

- schweig, Wiesbaden: Vieweg-Verlag, 1999.
- [Sch1998] Schmidt, A.: Kostenrechnung. Stuttgart: W. Kohlhammer, 1998.
- [Sch2002] Schneeweiß, C.: Einführung in die Produktionswirtschaft. 8., verb. und erw. Aufl.. Berlin Heidelberg: Springer, 2002.
- [Sch2006] Schuh, G.; Kampker, A.; Franzkoch, B.; Wemhöner, N.: Studie „Intelligent Maintenance – Potenziale zustandsorientierter Instandhaltung“. 2005. Studie des WZL Aachen und der Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT im Auftrag von ifm electronic GmbH. (<http://www.ifm-electronic.com>, Stand 08.06.2006).
- [Sie1995] Siegle, M.: Beschreibung und Analyse von Markovmodellen mit großem Zustandsraum. Dissertation, Technische Fakultät, Universität Erlangen, 1995.
- [Sie2003] Siersdorfer, D.: Bausteine für die IT-gestützte Produktion. Industrie Management 2/2003.
- [Sil1998] Silva, M.; Teruel, E.; Valette, R.; Hervé, P.: Petri Nets and Production Systems. In: Rozenberg, G. (ed.): Lectures on Petri nets II: Applications. Lecture notes in Computer Science 1492, pp 85-124, 1998.
- [Siu1994] Siu, N.: Risk Assessment for dynamic systems: An Overview. RESS 43, pp. 43-73, 1994.
- [Smi2002] Smith, R.: Global Supply Chain Performance and Risk Optimization: the Value of Real Options Flexibility Demonstrated in the Global Automotive Industry. Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2002.
- [Sri2002] Srivastava, S.: Value at Risk Analysis of a Leveraged Swap. In: Dempster, M.A.H. (ed.): Risk management: value at risk and beyond. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002.
- [Sta1977] Stange, K.: Bayes-Verfahren: Schätz- und Testverfahren bei Berücksichtigung von Vorkenntnissen. Berlin: Springer, 1977.
- [Ste2000] von Steinaecker, J.: Ein Informationsmodell zur Modellierung und Planung von netzwerkartigen Produktionsstrukturen. Heimsheim: Jost-Jetter, 2000.
- [Ste2001] Steger: Kosten- und Leistungsrechnung. München: Oldenbourg, 2001.
- [Tro2005] Trost, M.; Bertsche B.: Petri Net Modeling of Production Systems in Consideration of System Properties, Maintenance and Production Proc-

esses. Proc. ESREL 2005-Conference, Gdansk, Polen, 2005.

- [Tro2006] Trost, M.; Nebel, S.; Bertsche, B.: An Approach to Integrate Uncertainties in Petri Nets to Evaluate the Worthiness of Repair. ESREL 2006-Conference, Estoril, Portugal, 2006.
- [Tön1998] Tönshoff, H.K.; Günther, G.; Schmidt, J.; Seufzer, A.: Vorbeugen oder heilen? Schweizer Maschinen Markt, Vol. 21/1998, S. 80-84, 1998.
- [VDA1999] Verband der Automobilindustrie: Qualitätsmanagemant in der Automobilindustrie, QM - Systemaudit, Produktionsmittel, Band 6, Teil 4. Frankfurt: VDA, 1999.
- [VDI1974a] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 2689: Leitfaden für Materialflussuntersuchungen. Düsseldorf: VDI, 1974.
- [VDI1974b] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 3631: Materialpuffer zwischen Arbeitsbereichen. Düsseldorf: VDI, 1974.
- [VDI1986] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 4004 Blatt 4: Verfügbarkeitskenngrößen. Düsseldorf: VDI, 1986.
- [VDI1999a] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 2888: Zustandsorientierte Instandhaltung. Düsseldorf: VDI, 1999.
- [VDI1999b] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 4008, Blatt 6: Monte-Carlo-Simulation. Düsseldorf: VDI, 1999.
- [VDI2000a] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 3633, Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Düsseldorf : VDI, 2000.
- [VDI2000b] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 3633, Blatt 5: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Integration der Simulation in die betrieblichen Abläufe. Düsseldorf: VDI, 2000.
- [VDI2001] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 3633, Blatt 7: Simulation von Logistik- Materialfluss- und Produktionssysteme Kostensimulation. Düsseldorf: VDI, 2001.
- [VDI2002] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen - Begriffe, Definitionen, Zeiterfassung und Berechnung. Düsseldorf: VDI, 2002.
- [VDI2006] Verein deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 4008, Blatt 4: Methoden

der Zuverlässigkeit – Petri-Netze. Düsseldorf: VDI, 2006.

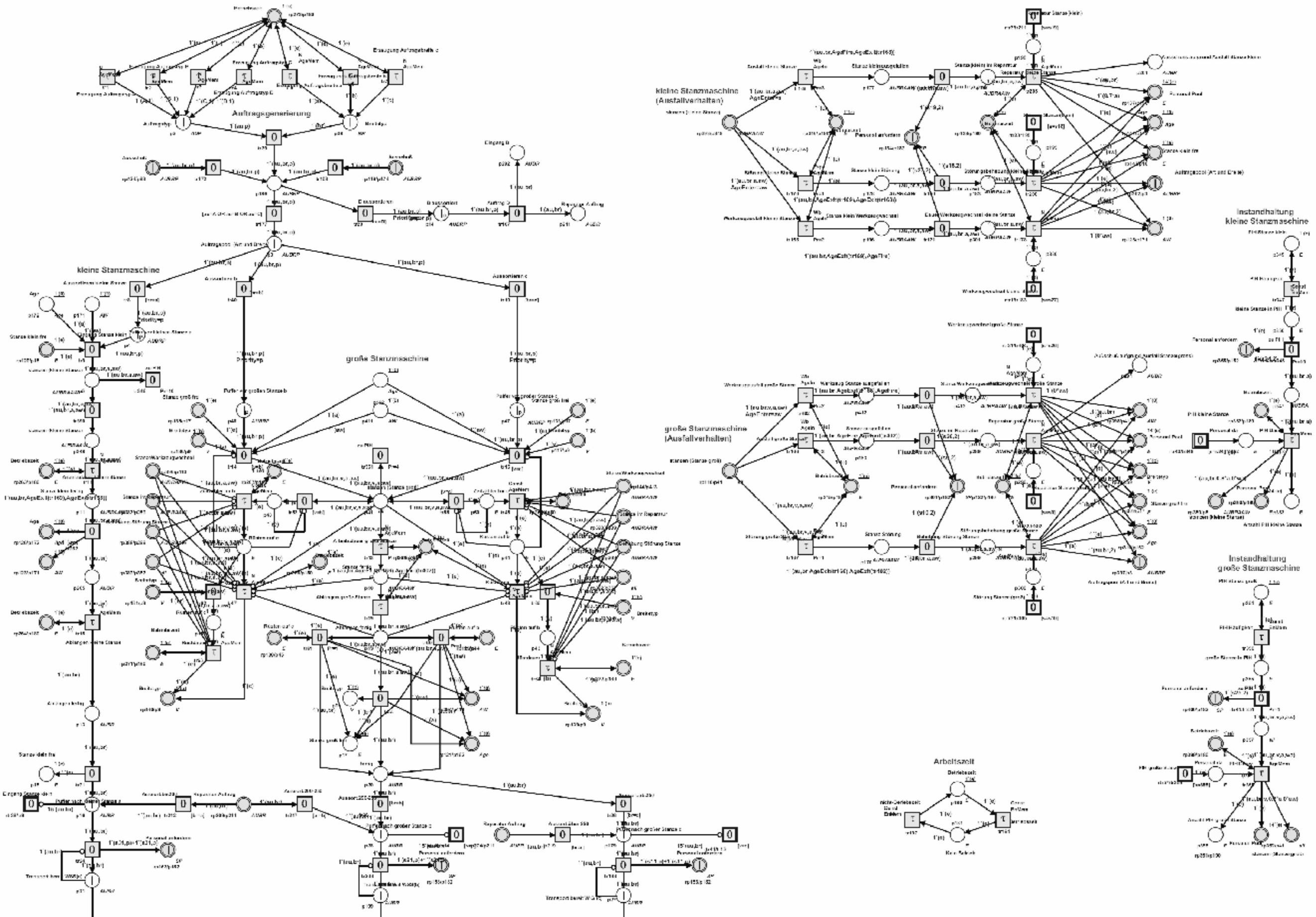
- [Vil1989] Villaroel, J.L.; Martinez, J.; Silva, M.: GRAMAN: A Graphic System for Manufacturing System Design. In: Tzafestas, S. (Ed.): IMACS Symposium on System Modelling and Simulation. Elsevier Science Publ., pp. 311-316, 1989.
- [Vol2004] Volovoi, V.V.: Modeling of System Reliability Using Petri Nets with Aging Tokens. Reliability Engineering and System Safety, 84, no. 2, pp. 149-161, 2004.
- [Voß2003] Voß, W. (Hrsg.): Taschenbuch der Statistik. 2.Aufl. München : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2003.
- [War1995] Warnecke, H.-J.: Der Produktionsbetrieb 1 – Organisation, Produkt, Planung. 3. Aufl. Berlin: Springer, 1995.
- [War1998] Warschat, J.: Methoden zur Planung zeit- und kostenoptimaler Produktion und Lagerhaltung: Anwendung der Theorie optimaler Prozesse. Berlin Heidelberg: Springer, 1998.
- [Wie1991] Wiendahl, H.P.: Analyse und Neuordnung der Fabrik. Berlin Heidelberg: Springer, 1991.
- [Web1991] Weber, W.: Einführung in die BWL. Wiesbaden: Gabler 1991, S.7
- [Wes2004] Westkämper, E.; Warnecke, Hans-Jürgen: Einführung in die Fertigungstechnik. 6., neubearb. und erg. Aufl.. Stuttgart: Teubner, 2004.
- [Wes2006] Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [Zim1997] Zimmermann, A.: Modellierung und Bewertung von Fertigungssystemen mit Petri-Netzen. Dissertation, Berlin, Techn. Universität, Fachbereich 13-Informatik, 1997.
- [Zim2006] Zimmermann, A.; Trowitzsch, J.: Eine Quantitative Untersuchung des European Train Control System mit UML State Machines. Proc. EKA 2006, Braunschweig: 2006.

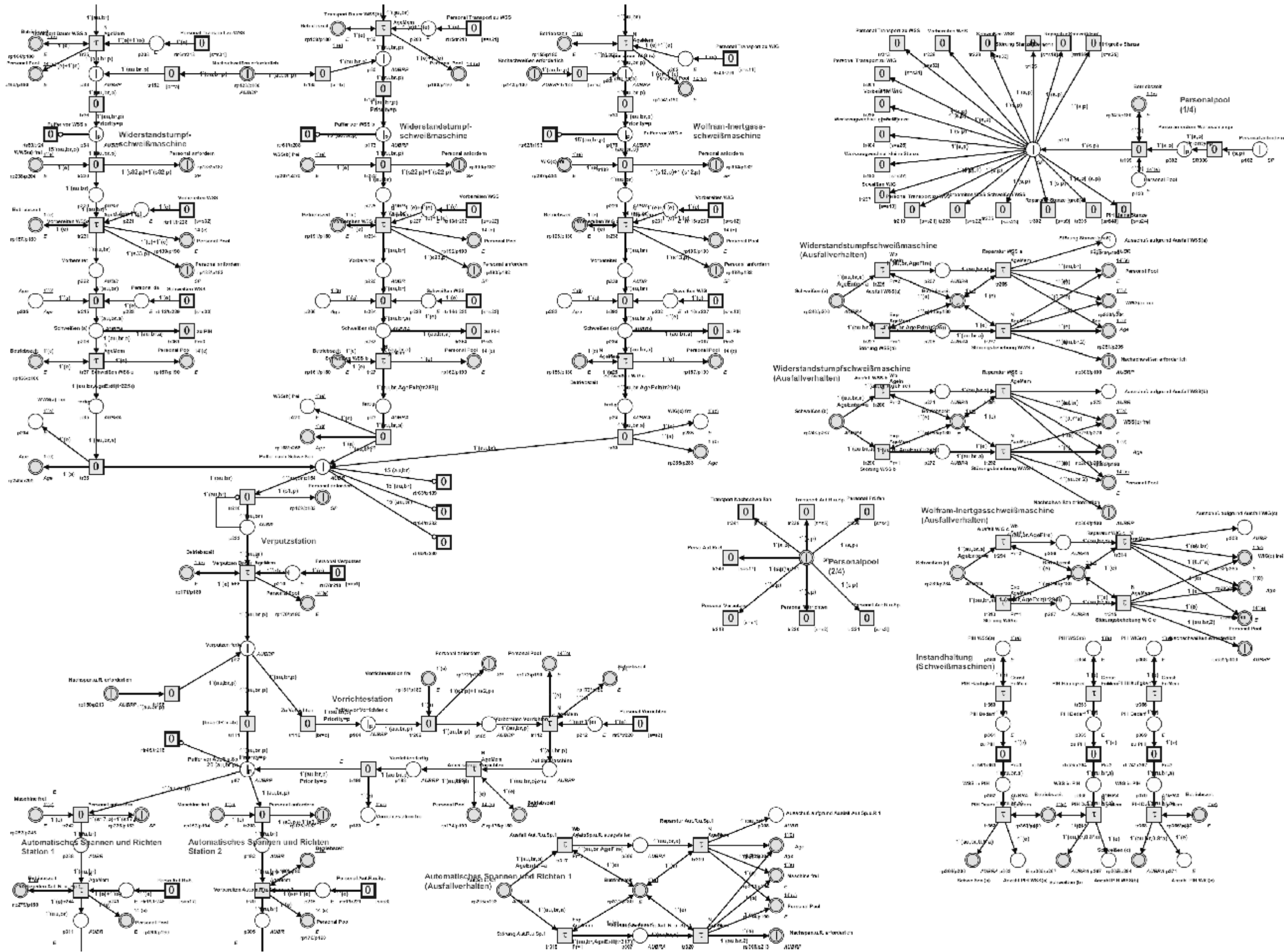
# Anhang

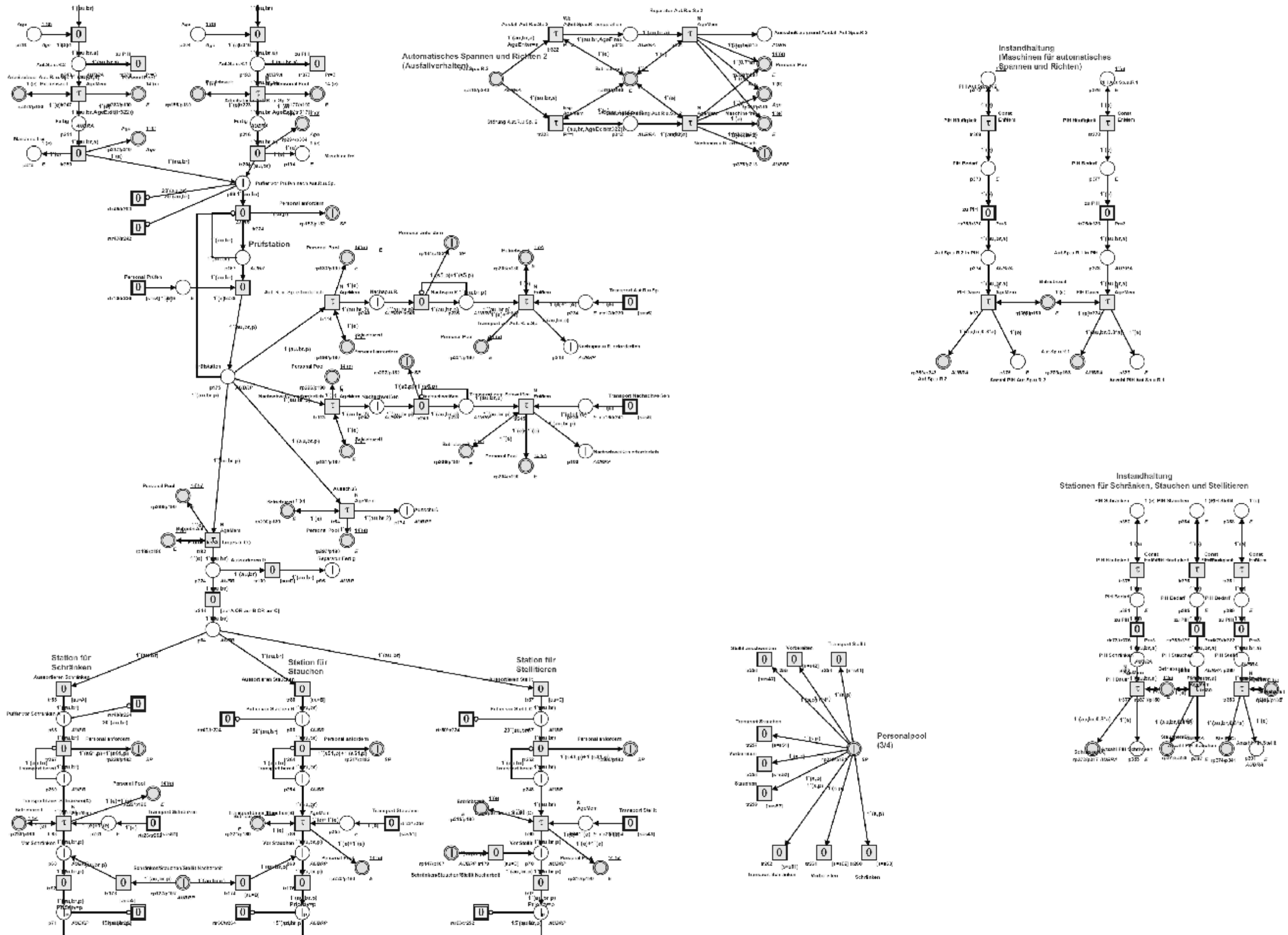
Anhang 1: Petrinetz der Bandsägenfertigung

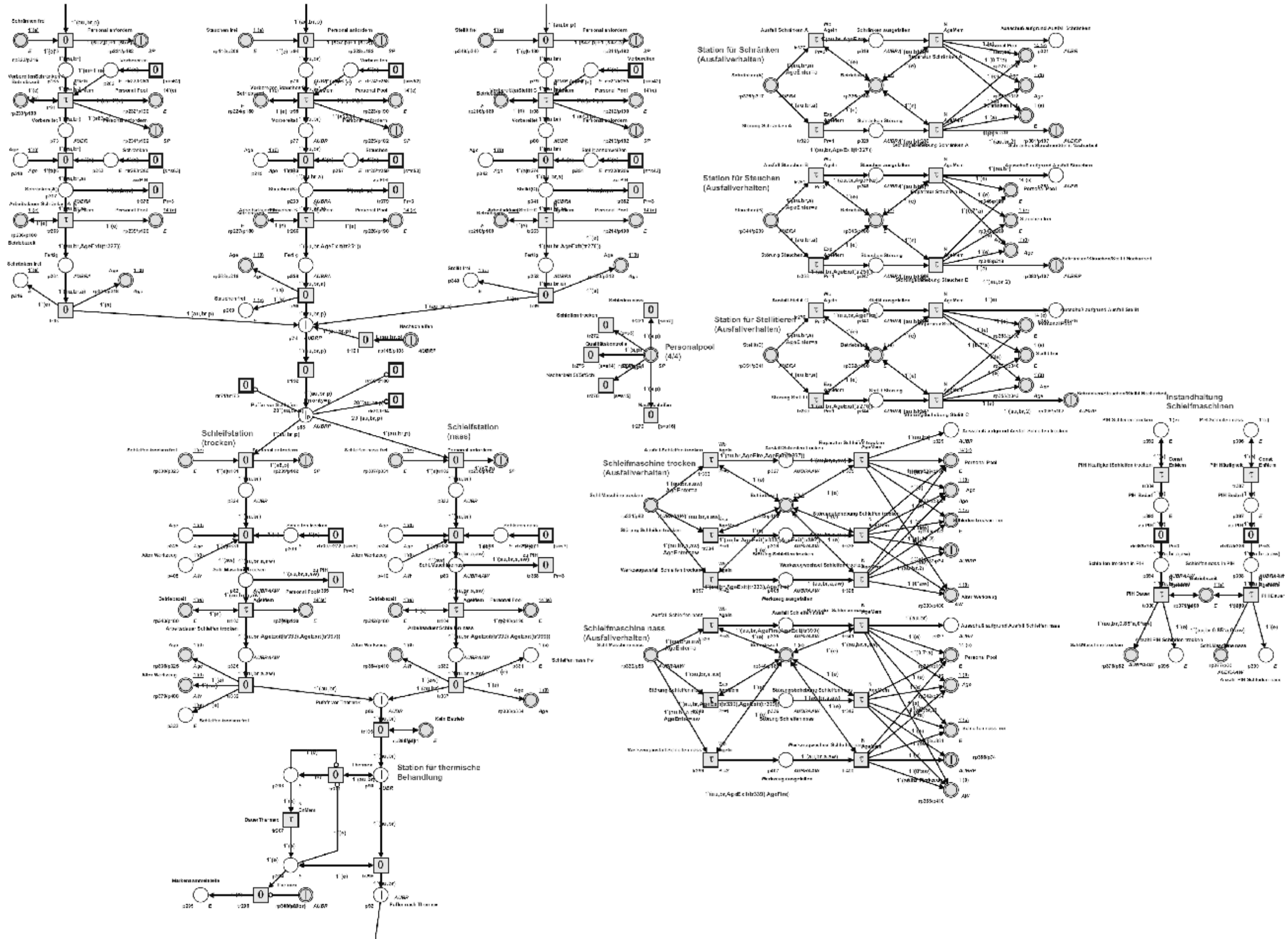
Anhang 2: Petrinetz der Zahnradfertigung

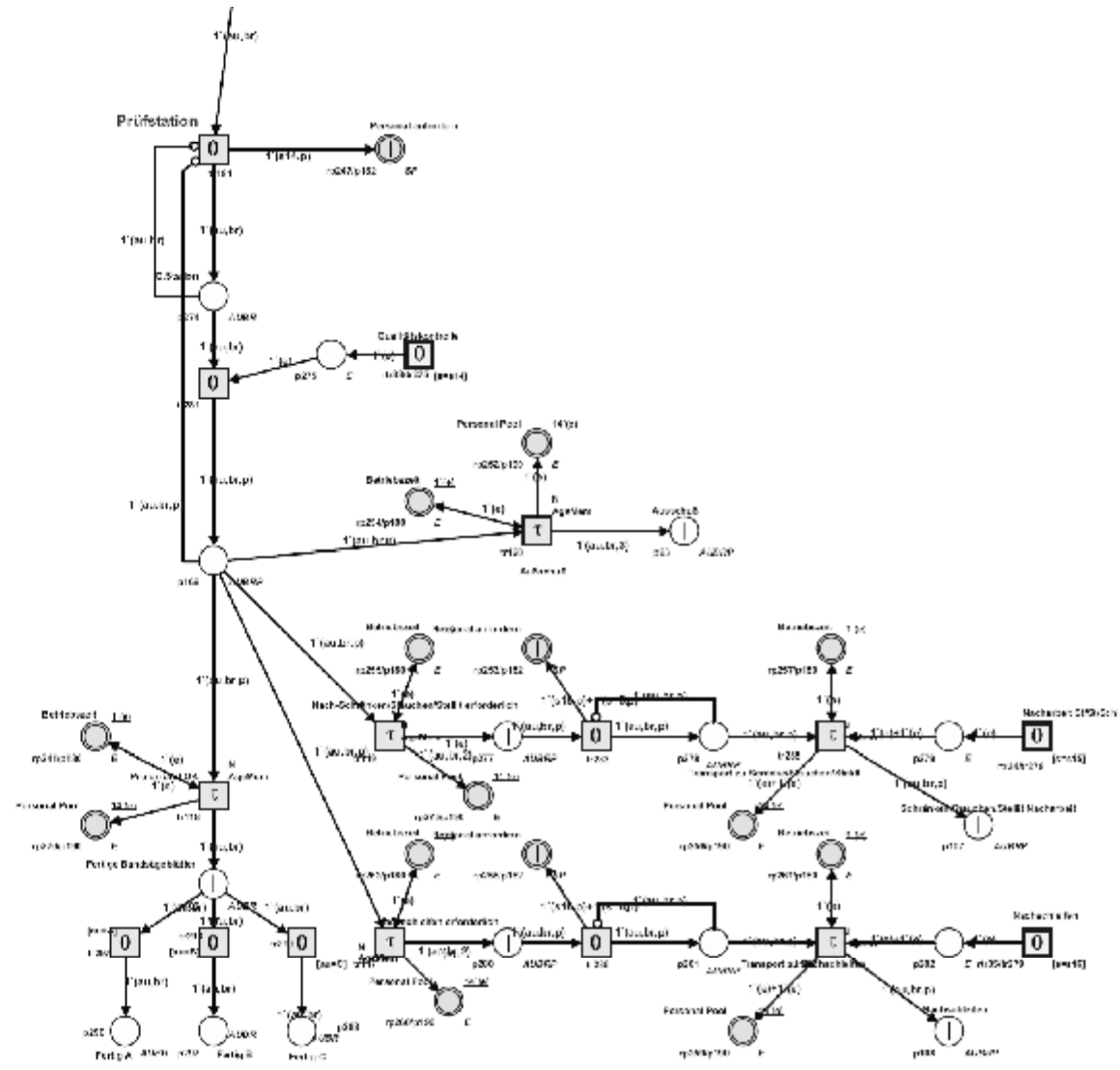


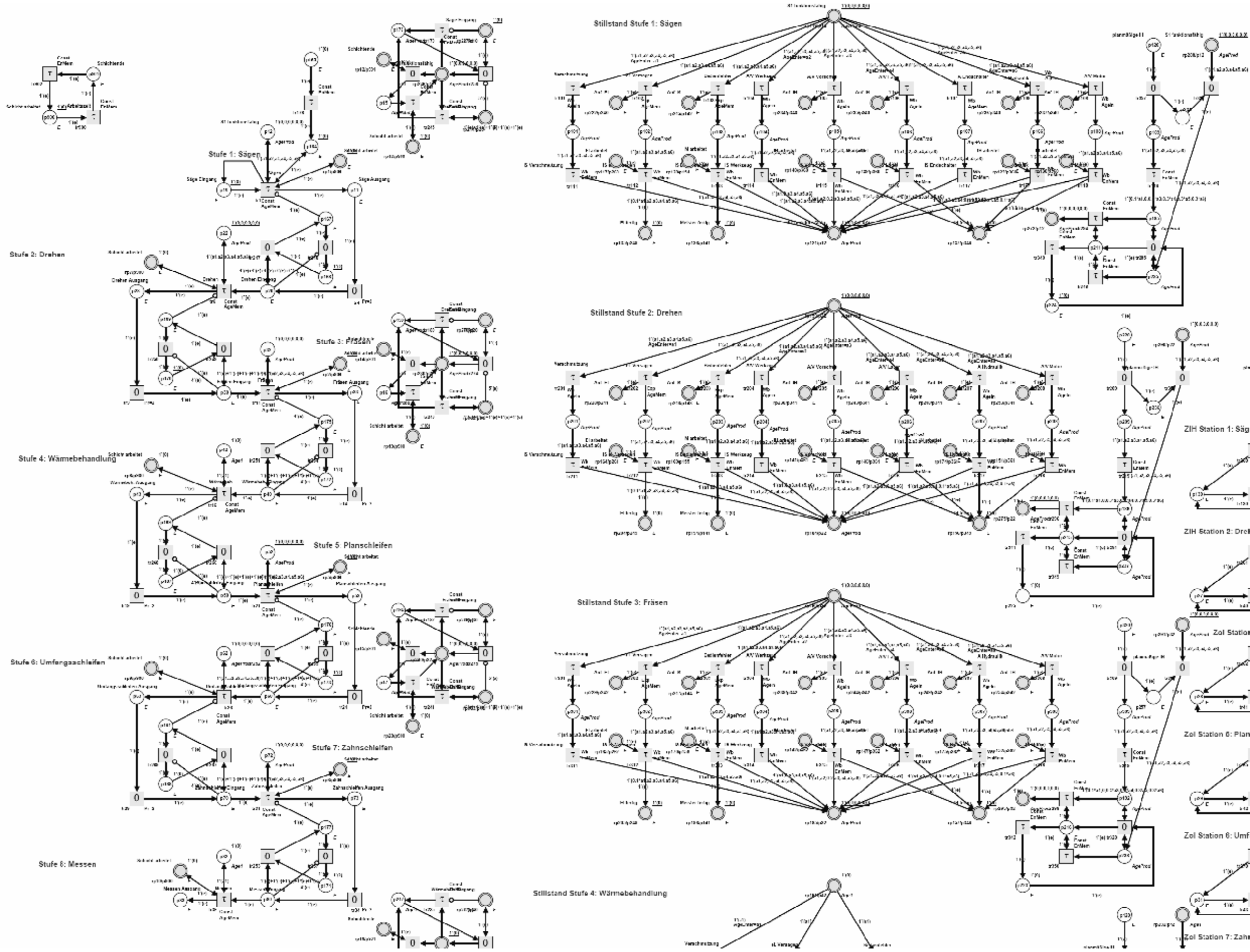


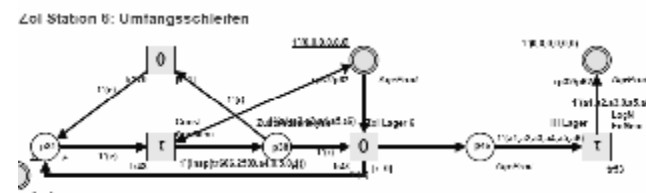
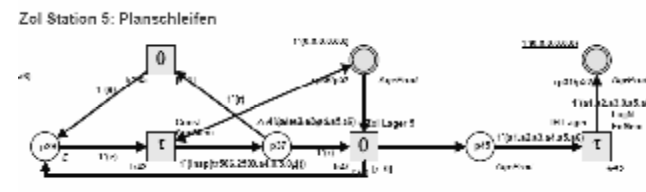
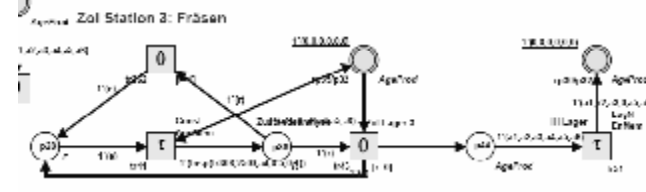
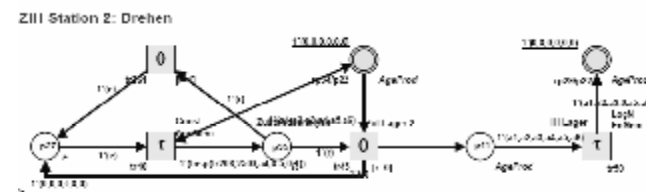
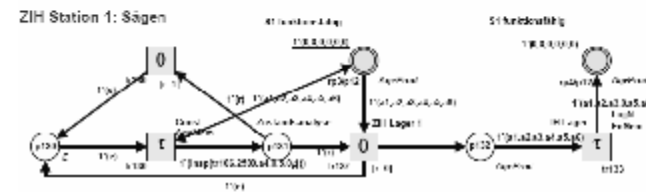
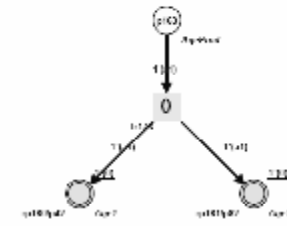
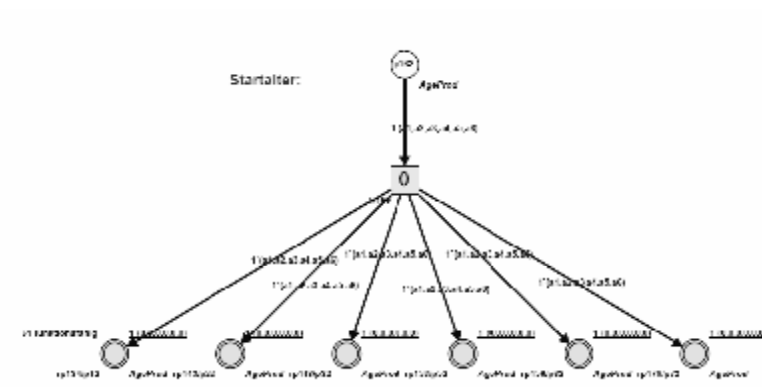
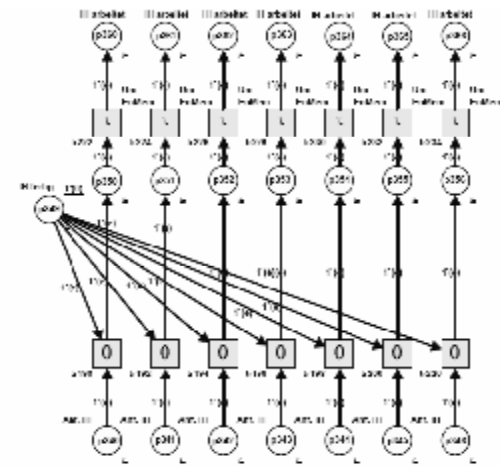
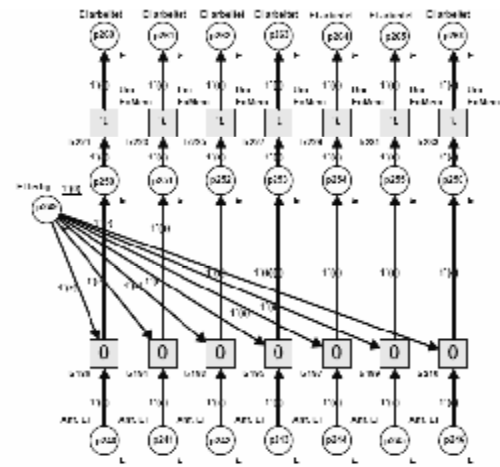
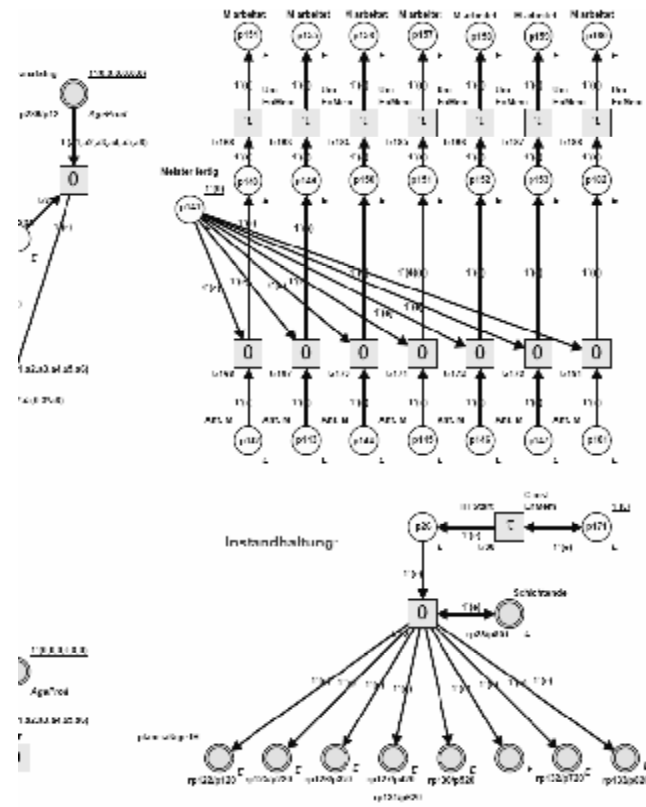










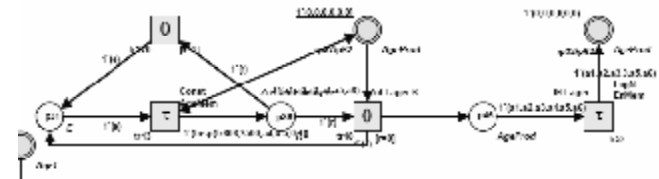




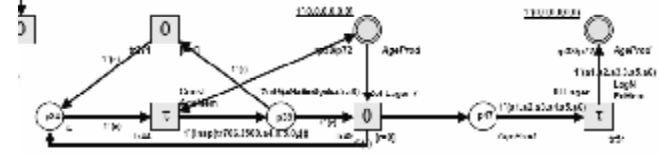




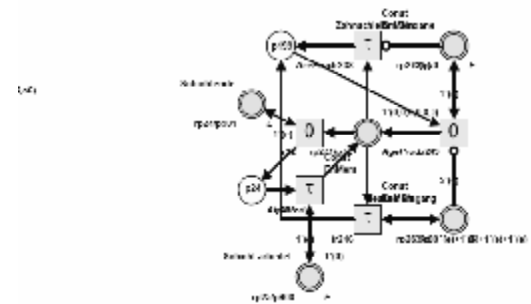
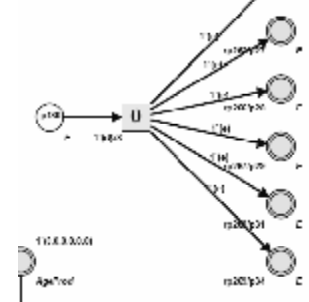
Ziel Station 6: Umfangsschleifen



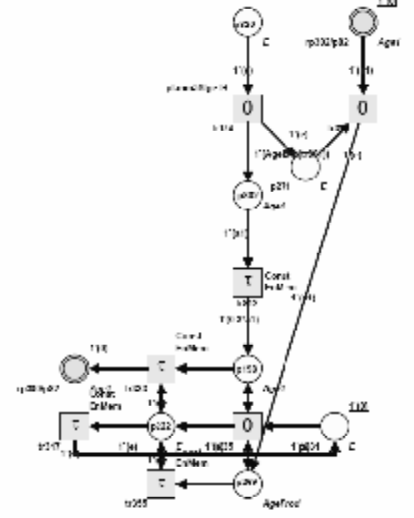
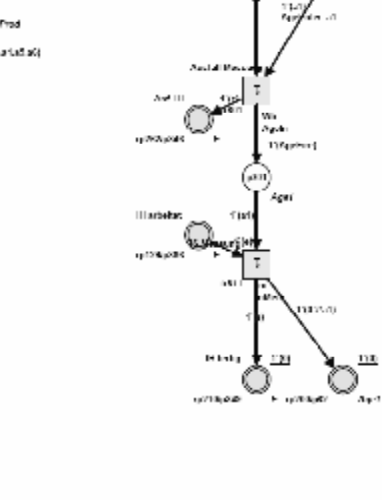
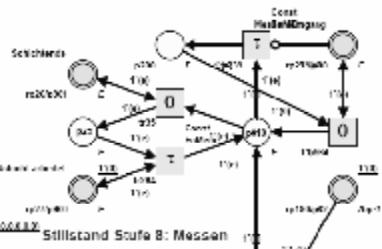
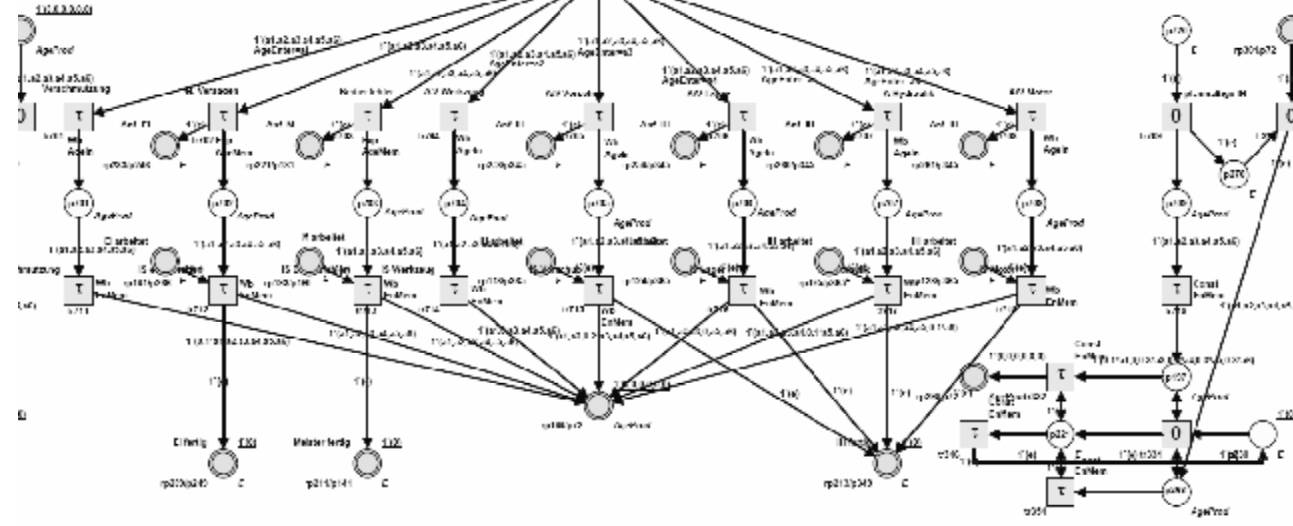
Ziel Station 7: Zahnschleifen



Ziel aktivieren:



Stillstand Stufe 7: Zahnschleifen



# Lebenslauf

Monika Trost,  
geboren am 15.01.1979 in Stuttgart

## Schulbildung

1984 – 1989      Grundschule: Blankensteinschule in Steinheim an der Murr  
1989 – 1998      Gymnasium: Friedrich-Schiller-Gymnasium in Marbach am Neckar

## Studium

10/98 – 04/03    Maschinenwesen an der Universität Stuttgart  
Hauptfächer:  
- Biomedizinische Technik  
- Mikrosystemtechnik  
Abschluss: Dipl.-Ing.

## Beruf

06/03 – 12/06    Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Maschinenelemente (IMA)  
der Universität Stuttgart  
Seit 01/07        Entwicklungsingenieurin im Bereich Fahrdynamik bei der BMW Group,  
München



Liste der bisher erschienenen Berichte aus dem IMA:

Nr.	Verfasser	Titel
1	H.K. Müller	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion von Hochdruckdichtungen an schnellaufenden Wellen
2	W. Passera	Konzentrisch laufende Gewinde-Wellen-Dichtung im laminaren Bereich
3	K. Karow	Konzentrische Doppelgewindewellendichtung im laminaren Bereich
3	F.E. Breit	Die Kreiszyinderschalendichtung: Eine Axialspaltdichtung mit druckabhängiger Spaltweite
	W. Sommer	Dichtungen an Mehrphasensystemen: Berührungsfreie Wellendichtungen mit hochviskosen Sperrflüssigkeiten
4	K. Heitel	Beitrag zur Berechnung und Konstruktion konzentrisch und exzentrisch betriebener Gewindewellendichtungen im laminaren Bereich
5	K.-H. Hirschmann	Beitrag zur Berechnung der Geometrie von Evolventenverzahnungen
6	H. Däuble	Durchfluß und Druckverlauf im radial durchströmten Dichtspalt bei pulsierendem Druck
7	J. Rybak	Einheitliche Berechnung von Schneidrädern für Außen- und Innenverzahnungen. Beitrag zu Eingriffsstörungen beim Hohlrad-Verzahn mittels Schneidräder
8	D. Franz	Rechnergestütztes Entwerfen von Varianten auf der Grundlage gesammelter Erfahrungswerte
9	E. Lauster	Untersuchungen und Berechnungen zum Wärmehaushalt mechanischer Schaltgetriebe
10		Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. K. Talke
11	G. Ott	Untersuchungen zum dynamischen Leckage- und Reibverhalten von Radialwellendichtungen
12	E. Fuchs	Untersuchung des elastohydrodynamischen Verhaltens von berührungsfreien Hochdruckdichtungen
13	G. Sedlak	Rechnerunterstütztes Aufnehmen und Auswerten spannungsoptischer Bilder
14	W. Wolf	Programmsystem zur Analyse und Optimierung von Fahrzeuggetrieben
15	H. v. Eiff	Einfluß der Verzahnungsgeometrie auf die Zahnfußbeanspruchung innen- und außenverzählter Geradstirnräder
16	N. Messner	Untersuchung von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
17	V. Schade	Entwicklung eines Verfahrens zur Einflanken-Wälzprüfung und einer rechnergestützten Auswertemethode für Stirnräder
18	A. Gührer	Beitrag zur Optimierung von Antriebssträngen bei Fahrzeugen
19	R. Nill	Das Schwingungsverhalten loser Bauteile in Fahrzeuggetrieben
20	M. Kammüller	Zum Abdichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
21	H. Truong	Strukturorientiertes Modellieren, Optimieren und Identifizieren von Mehrkörpersystemen
22	H. Liu	Rechnergestützte Bilderfassung, -verarbeitung und -auswertung in der Spannungsoptik
23	W. Haas	Berührungsfreie Wellendichtungen für flüssigkeitsbespritzte Dichtstellen
24	M. Plank	Das Betriebsverhalten von Wälzlagern im Drehzahlbereich bis 100.000/min bei Kleinstmengenschmierung
25	A. Wolf	Untersuchungen zum Abdichtverhalten von druckbelastbaren Elastomer- und PTFE-Wellendichtungen
26	P. Waidner	Vorgänge im Dichtspalt wasserabdichtender Gleitringdichtungen
27	Hirschmann u.a.	Veröffentlichungen aus Anlaß des 75. Geburtstags von Prof. Dr.-Ing. Kurt Talke
28	B. Bertsche	Zur Berechnung der Systemzuverlässigkeit von Maschinenbau-Produkten
29	G. Lechner;	Forschungsarbeiten zur Zuverlässigkeit im Maschinenbau
	K.-H.Hirschmann;	
	B. Bertsche	
30	H.-J. Prokop	Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulikstangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen
31	K. Kleinbach	Qualitätsbeurteilung von Kegelradsätzen durch integrierte Prüfung von Tragbild, Einflankenwälzabweichung und Spielverlauf
32	E. Zürn	Beitrag zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und -geschwindigkeit eines Mehrkoordinatentastlers
33	F. Jauch	Optimierung des Antriebsstranges von Kraftfahrzeugen durch Fahrsimulation
34	J. Grabscheid	Entwicklung einer Kegelrad-Laufprüfmaschine mit thermografischer Tragbilderfassung
35	A. Hölderlin	Verknüpfung von rechnerunterstützter Konstruktion und Koordinatenmeßtechnik
36	J. Kurfess	Abdichten von Flüssigkeiten mit Magnetflüssigkeitsdichtungen
37	G. Borenius	Zur rechnerischen Schädigungsakkumulation in der Erprobung von Kraftfahrzeugteilen bei stochastischer Belastung mit variabler Mittellast
38	E. Fritz	Abdichtung von Maschinenspindeln
39	E. Fritz; W. Haas;	Berührungsfreie Spindelabdichtungen im Werkzeugmaschinenbau. Konstruktionskatalog
	H.K. Müller	

Nr.	Verfasser	Titel
40	B. Jenisch	Abdichten mit Radial-Wellendichtringen aus Elastomer und Polytetrafluorethylen
41	G. Weidner	Klappern und Rasseln von Fahrzeuggetrieben
42	A. Herzog	Erweiterung des Datenmodells eines 2D CAD-Systems zur Programmierung von Mehrkoordinatenmeßgeräten
43	T. Roser	Wissensbasiertes Konstruieren am Beispiel von Getrieben
44	P. Wäschle	Entlastete Wellendichtringe
45	Z. Wu	Vergleich und Entwicklung von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse von Systemen
46	W. Richter	Nichtwiederholbarer Schlag von Wälzlagerereinheiten für Festplattenlaufwerke
47	R. Durst	Rechnerunterstützte Nutprofilentwicklung und clusteranalytische Methoden zur Optimierung von Gewindewerkzeugen
48	G.S. Müller	Das Abdichtverhalten von Gleitringdichtungen aus Siliziumkarbid
49	W.-E. Krieg	Untersuchungen an Gehäuseabdichtungen von hochbelasteten Getrieben
50	J. Grill	Zur Krümmungstheorie von Hüllflächen und ihrer Anwendung bei Werkzeugen und Verzahnungen
51	M. Jäckle	Entlüftung von Getrieben
52	M. Köchling	Beitrag zur Auslegung von geradzahnten Stirnrädern mit beliebiger Flankenform
53	M. Hildebrandt	Schadensfrüherkennung an Wälzkontakten mit Körperschall-Referenzsignalen
54	H. Kaiser	Konstruieren im Verbund von Expertensystem, CAD-System, Datenbank und Wiederholteil-suchsystem
55	N. Stanger	Berührungsfrei abdichten bei kleinem Bauraum
56	R. Lenk	Zuverlässigkeitsanalyse von komplexen Systemen am Beispiel PKW-Automatikgetriebe
57	H. Naunheimer	Beitrag zur Entwicklung von Stufenlosgetrieben mittels Fahrsimulation
58	G. Neumann	Thermografische Tragbilderfassung an rotierenden Zahnrädern
59	G. Wüstenhagen	Beitrag zur Optimierung des Entlasteten Wellendichtrings
60	P. Brodbeck	Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Bauteilzuverlässigkeit und zur Systemberechnung nach dem Booleschen Modell
61	Ch. Hoffmann	Untersuchungen an PTFE-Wellendichtungen
62	V. Hettich	Identifikation und Modellierung des Materialverhaltens dynamisch beanspruchter Flächen-dichtungen
63	K. Riedl	Pulsationsoptimierte Außenzahnpumpen mit ungleichförmig übersetzenden Radpaaren
64	D. Schwuchow	Sonderverzahnungen für Zahnpumpen mit minimaler Volumenstrompulsation
65	T. Spörl	Modulares Fahrsimulationsprogramm für beliebig aufgebaute Fahrzeugtriebstränge und Anwendung auf Hybridantriebe
66	K. Zhao	Entwicklung eines räumlichen Toleranzmodells zur Optimierung der Produktqualität
67	K. Heusel	Qualitätssteigerung von Planetengetrieben durch Selektive Montage
68	T. Wagner	Entwicklung eines Qualitätssysteminformationssystems für die Konstruktion
69	H. Zelßmann	Optimierung des Betriebsverhaltens von Getriebeentlüftungen
70	E. Bock	Schwimmende Wellendichtringe
71	S. Ring	Anwendung der Verzahnungstheorie auf die Modellierung und Simulation des Werkzeug-schleifens
72	M. Klöpfer	Dynamisch beanspruchte Dichtverbindungen von Getriebegehäusen
73	C.-H. Lang	Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
74	W. Haas	Berührungsfreies Abdichten im Maschinenbau unter besonderer Berücksichtigung der Fang-labyrinth
75	P. Schiberna	Geschwindigkeitsvorgabe für Fahrsimulationen mittels Verkehrssimulation
76	W. Elser	Beitrag zur Optimierung von Wälzgetrieben
77	P. Marx	Durchgängige, bauteilübergreifende Auslegung von Maschinenelementen mit unscharfen Vorgaben
78	J. Kopsch	Unterstützung der Konstruktionstätigkeiten mit einem Aktiven Semantischen Netz
79	J. Rach	Beitrag zur Minimierung von Klapper- und Rasselgeräuschen von Fahrzeuggetrieben
80	U. Häussler	Generalisierte Berechnung räumlicher Verzahnungen und ihre Anwendung auf Wälzfräserherstellung und Wälzfräsen
81	M. Hüsges	Steigerung der Tolerierungsfähigkeit unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten
82	X. Nastos	Ein räumliches Toleranzbewertungssystem für die Konstruktion
83	A. Seifried	Eine neue Methode zur Berechnung von Rollenlagern über lagerinterne Kontakt-Beanspruchungen
84	Ch. Dörr	Ermittlung von Getriebebelastkollektiven mittels Winkelbeschleunigungen
85	A. Veil	Integration der Berechnung von Systemzuverlässigkeiten in den CAD-Konstruktionsprozeß
86	U. Frenzel	Rückenstrukturierte Hydraulikstangendichtungen aus Polyurethan
87	U. Braun	Optimierung von Außenzahnpumpen mit pulsationsarmer Sonderverzahnung
88	M. Lambert	Abdichtung von Werkzeugmaschinen-Flachführungen
89	R. Kubalczyk	Gehäusegestaltung von Fahrzeuggetrieben im Abdichtbereich

Nr.	Verfasser	Titel
90	M. Oberle	Spielbeeinflussende Toleranzparameter bei Planetengetrieben
91	S. N. Dogan	Zur Minimierung der Losteilgeräusche von Fahrzeuggetrieben
92	M. Bast	Beitrag zur werkstückorientierten Konstruktion von Zerspanwerkzeugen
93	M. Ebenhoch	Eignung von additiv generierten Prototypen zur frühzeitigen Spannungsanalyse im Produktentwicklungsprozeß
94	A. Fritz	Berechnung und Monte-Carlo Simulation der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme
95	O. Schrems	Die Fertigung als Versuchsfeld für die qualitätsgerechte Produktoptimierung
96	M. Jäckle	Untersuchungen zur elastischen Verformung von Fahrzeuggetrieben
97	H. Haiser	PTFE-Compounds im dynamischen Dichtkontakt bei druckbelastbaren Radial-Wellendichtungen
98	M. Rettenmaier	Entwicklung eines Modellierungs-Hilfssystems für Rapid Prototyping gerechte Bauteile
99	M. Przybilla	Methodisches Konstruieren von Leichtbauelementen für hochdynamische Werkzeugmaschinen
100	M. Olbrich	Werkstoffmodelle zur Finiten-Elemente-Analyse von PTFE-Wellendichtungen
101	M. Kunz	Ermittlung des Einflusses fahrzeug-, fahrer- und verkehrsspezifischer Parameter auf die Getriebelastkollektive mittels Fahrsimulation
102	H. Ruppert	CAD-integrierte Zuverlässigkeitsanalyse und -optimierung
103	S. Kilian	Entwicklung hochdynamisch beanspruchter Flächendichtverbindungen
104	A. Flaig	Untersuchung von umweltschonenden Antriebskonzepten für Kraftfahrzeuge mittels Simulation
105	B. Luo	Überprüfung und Weiterentwicklung der Zuverlässigkeitsmodelle im Maschinenbau mittels Mono-Bauteil-Systemen
106	L. Schüppenhauer	Erhöhung der Verfügbarkeit von Daten für die Gestaltung und Berechnung der Zuverlässigkeit von Systemen
107	J. Ryborz	Klapper - und Rasselgeräuschverhalten von Pkw- und Nkw- Getrieben
108	M. Würthner	Rotierende Wellen gegen Kühlschmierstoff und Partikel berührungsfrei abdichten
109	C. Gitt	Analyse und Synthese leistungsverzweigter Stufenlosgetriebe
110	A. Krolo	Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen
111	G. Schöllhammer	Entwicklung und Untersuchung inverser Wellendichtsysteme
112	K. Fronius	Gehäusegestaltung im Abdichtbereich unter pulsierendem Innendruck
113	A. Weidler	Ermittlung von Raffungsfaktoren für die Getriebeerprobung
114	B. Stiegler	Berührungsfreie Dichtsysteme für Anwendungen im Fahrzeug- und Maschinenbau
115	T. Kunstfeld	Einfluss der Wellenoberfläche auf das Dichtverhalten von Radial-Wellendichtungen
116	M. Janssen	Abstreifer für Werkzeugmaschinenführungen
117	S. Buhl	Wechselbeziehungen im Dichtsystem von Radial-Wellendichtring, Gegenlaufläche und Fluid
118	P. Pozsgai	Realitätsnahe Modellierung und Analyse der operativen Zuverlässigkeitskennwerte technischer Systeme
119	H. Li	Untersuchungen zum realen Bewegungsverhalten von Losteilen in Fahrzeuggetrieben
120	B. Otte	Strukturierung und Bewertung von Eingangsdaten für Zuverlässigkeitsanalysen
121	P. Jäger	Zuverlässigkeitsbewertung mechatronischer Systeme in frühen Entwicklungsphasen
122	T. Hitziger	Übertragbarkeit von Vorkenntnissen bei der Zuverlässigkeitstestplanung
123	M. Delonga	Zuverlässigkeitsmanagementsystem auf Basis von Felddaten
124	M. Maisch	Zuverlässigkeitsorientiertes Erprobungskonzept für Nutzfahrzeuggetriebe unter Berücksichtigung von Betriebsdaten
125	J. Orso	Berührungsfreies Abdichten schnelllaufender Spindeln gegen feine Stäube
126	F. Bauer	PTFE-Manschettendichtungen mit Spiralrille - Analyse, Funktionsweise und Erweiterung der Einsatzgrenzen
127	M. Stockmeier	Entwicklung von Klapper- und rasselgeräuschfreien Fahrzeuggetrieben