

Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Holger Willms
aus Aachen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Fritz Klocke
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Dr.h.c.mult. Walter Eversheim

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Juli 2008

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Inhalt

0 FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	V
1 EINLEITUNG	1
2 STAND DER ERKENNTNISSE	7
2.1 BEGRIFFSDEFINITIONEN	7
2.2 EXISTIERENDE METHODEN UND HILFSMITTEL ZUR GESTALTUNG VON STABILEN PROZESSKETTEN	10
2.2.1 Wissenschaftliche Ansätze.....	10
2.2.2 Industriell eingesetzte Methoden	15
2.2.3 Mathematische Modelle und Methoden.....	18
2.2.4 Kommerzielle Software.....	20
2.3 ZWISCHENFAZIT	25
3 ZIELSETZUNG UND THESE	26
4 STRUKTUR DER METHODE	29
5 METHODENBASIERTES SYSTEM ZUR AUSLEGUNG VON KOSTENOPTIMALEN UND PROZESSSTABILEN FERTIGUNGSVERKETTUNGEN	33
5.1 MODUL 1 - CHARAKTERISIERUNG DES PRODUKTES UND DER FERTIGUNGSPROZESSE	33
5.2 MODUL 2 - GENERIERUNG DER FERTIGUNGSVERKETTUNG	42
5.3 MODUL 3 - GENERIERUNG DER PROZESSALTERNATIVEN	44
5.3.1 Generierung der fertigungstechnologischen Prozessalternativen	45
5.3.2 Variation der Stellgrößen	47
5.4 MODUL 4 - REDUKTION DER PROZESSALTERNATIVEN	51
5.5 MODUL 5 - ERMITTELN DER FERTIGUNGSHISTORIE.....	55
5.6 MODUL 6 - IDENTIFIKATION VON RISIKOPROZESSEN	61
5.7 MODUL 7 - ERMITTLUNG DER HERSTELLKOSTEN.....	67
5.7.1 Materialeinzelkosten	69
5.7.2 Materialgemeinkosten	70
5.7.3 Fertigungseinzelkosten.....	70
5.7.4 Fertigungsgemeinkosten.....	72
5.7.5 Sondereinzelkosten.....	72
5.7.6 Zeitliche Faktoren	72
5.7.7 Berechnung der Herstellkosten einer Fertigungshistorie	74
5.8 MODUL 8 - BENCHMARKING DER PROZESSALTERNATIVEN	74
5.8.1 Herstellkosten.....	75
5.8.2 Herstellzeiten.....	75
5.8.3 Ausschuss	76
5.8.4 Benchmarking	79

5.9	ZWISCHENFAZIT	81
6	ENTWICKLUNG EINES SOFTWARE-DEMONSTRATORS.....	82
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	89
8	LITERATURVERZEICHNIS	93
9	ANHANG	104
9.1	INTERPOLATION VON VERSUCHSWERTEN	104
9.2	VARIABLE STELLGRÖßEN DER VERFAHREN DER UNTERGRUPPEN 3.1, 3.2 UND 3.3 NACH DIN 8580.....	105
9.3	DOE-VERSUCHSPLAN UND -ERGEBNISSE HARTGLATTWALZEN.....	108
9.4	KOEFFIZIENTEN DER REGRESSIONSANALYSE FÜR DAS HARTGLATTWALZEN	109
9.5	MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN ZUR STICHPROBENVERTEILUNG	110

Index

0	SYMBOLS AND ABBREVIATIONS	V
1	INTRODUCTION	4
2	STATE OF THE ART.....	7
2.1	DEFINITIONS	7
2.2	EXISTING METHODOLOGIES AND TOOLS FOR THE GENERATION OF STEADY PROCESS CHAINS	10
2.2.1	Scientific Approaches	10
2.2.2	Industrially deployed Methods.....	15
2.2.3	Mathematical Models and Methods	18
2.2.4	Commercially available Software	20
2.3	INTERMEDIATE RESULTS.....	25
3	OBJECTIVES AND THESIS.....	26
4	STRUCTURE OF THE METHOD	29
5	METHODOLOGY BASED SYSTEM FOR THE DESIGN OF COST- OPTIMAL AND STABLE PROCESS CHAINS.....	33
5.1	MODULE 1 - PRODUCT-CHARACTERISATION AND MANUFACTURING PROCESSES.....	33
5.2	MODULE 2 - GENERATION OF MANUFACTURING PROCESS CHAIN	42
5.3	MODULE 3 - GENERATION OF PROCESS ALTERNATIVES.....	44
5.3.1	Generation of Manufacturing Process Alternatives	45
5.3.2	Variation of Actuating Parameters	47
5.4	MODULE 4 - REDUCTION OF PROCESS ALTERNATIVES.....	51
5.5	MODULE 5 - DETERMINATION OF WORK PIECE INTERMEDIATE STATES ACROSS THE MANUFACTURING PROCESS CHAIN.....	55
5.6	MODULE 6 - IDENTIFICATION OF RISKY PROCESSES	61
5.7	MODULE 7 - DETERMINATION OF MANUFACTURING COST	67
5.7.1	Specific Material Cost.....	69
5.7.2	General Material Cost	70
5.7.3	Manufacturing Cost.....	70
5.7.4	General Manufacturing Cost	72
5.7.5	Special Costs	72
5.7.6	Time-dependent Factors	72
5.7.7	Calculation of Manufacturing Cost for a Process Chain.....	74
5.8	MODULE 8 - BENCHMARKING OF PROCESS ALTERNATIVES	74
5.8.1	Manufacturing Costs	75
5.8.2	Manufacturing Times	75
5.8.3	Deficient Work Pieces.....	76
5.8.4	Benchmarking	79

5.9	INTERMEDIATE RESULTS.....	81
6	DEVELOPMENT OF A SOFTWARE-DEMONSTRATOR	82
7	SUMMERY AND PROSPECTS.....	91
8	REFERENCES	93
9	ANNEX.....	104
9.1	INTERPOLATION OF TEST RESULTS	104
9.2	VARIABLE ACTUATING PARAMETERS OF THE MANUFACTURING PROCESSES ACCORDING TO THE SUBGROUPS 3.1, 3.2 AND 3.3 OF DIN 8580	105
9.3	DOE TEST SHEET AND RESULTS FOR ROLLER BURNISHING.....	108
9.4	COEFFICIENTS OF REGRESSIONS ANALYSIS FOR ROLLER BURNISHING	109
9.5	MATHEMATICAL BASICS FOR SPOT TEST DISTRIBUTION	110

0 Formelzeichen und Abkürzungen

0 Symbols and Abbreviations

\bar{x}		empirischer Mittelwert
\hat{Y}		berechnete Ausgangsgröße
Δ		Intervallgröße
Δ		Abweichung
Δ_{norm}		normierte Intervallgröße
μ		Mittelwert der Normalverteilung
3D		dreidimensional
a	[mm]	Abstand
a, b, c, i, j, k, l,		Zählervariablen
m, n, o, p, q		
a_e	[mm]	Eingriffsgröße
	[μm]	
$A_{\text{Grundfläche}}$	[m ²]	Grundfläche
a_i		Regressionskoeffizienten
a_p	[mm]	Schnitttiefe
	[μm]	
B		Bauteil
b	[mm]	Spannungsbreite
b		Anzahl notwendiger Versuche
BE_i		Bauteileigenschaft
BF_i		Bauteilfunktionalität
B_i		Bedingungen
CAD		Computer Aided Design
CAE		Computer Aided Engineering
CAM		Computer Aided Manufacturing
$c_{\text{Anschlusswert}}$	[kWh]	Anschlusswert
CAPP		Computer Aided Process Planning
CAT		Computer Aided Testing
c_{Aufnahme}		prozentuale mittlere Leistungsaufnahme
$c_{\text{Einschaltdauer}}$		prozentuale Einschaltdauer
c_{Erholung}		Korrekturfaktor für Erholungszeit
c_{Gemein}		Korrekturfaktor für Gemeinkostenaufschlag
c_{Gewinn}		kalkulierter Gewinn
CIM		Computer Integrated Manufacturing
$c_{\text{Instandhaltung}}$		Korrekturfaktor für Instandhaltungskosten
C_m		Maschinenfähigkeitsindex
C_{mk}		Maschinenfähigkeitsindex
C_p		Langzeit-Prozessfähigkeitsindex
C_{pk}		Langzeit-Prozessfähigkeitsindex
CPO		Cost Process Optimisation
c_{Raum}	[€/m ²]	flächige Raumkosten

C_{Rest}		Korrekturfaktor der Fertigungsgemeinkosten
$C_{\text{Verfahren}}$		Korrekturfaktor für Trennverfahren
$C_{\text{Verschnitt}}$		Korrekturfaktor für Verschnitt
C_{Verteil}		Korrekturfaktor für Verteilzeit
DFMA		Design for Manufacture and Assembly
DIN		Deutsche Industrienorm
d_n		Abweichung der Verteilungsfunktion von der realen Verteilung
DoE		Design of Experiments
E	[MPa]	E-Modul
e		e-Funktion
e		Fehler
e.g.		exempli gratia, for example
EDV		Elektronische Datenverarbeitung
E_i		Werkstückeigenschaften
EIN_i		Eingangsgrößen
EN		Europäische Norm
F		Verteilung
F	[N]	Anpresskraft
F		Funktion
f	[mm]	Vorschub
F_B	[N]	Brechkraft
F_c	[N]	Schnittkraft
F_f	[N]	Vorschubkraft
F_G	[N]	Gegenkraft
F_i		Features
F_i	[N]	Zerspankräfte
FMEA		Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FM_i		Featuremerkmale
F_p	[N]	Passivkraft
F_R	[N]	Ringzackenkraft
F_S	[N]	Stempelkraft
F_S	[N]	Schnittkraft
FTA		Fehlerbaumanalyse
F_{Toleranz}		Toleranzfeldbreite
F_Z	[N]	Zugkraft
f_Z	[mm]	Vorschub je Zahn
g		Funktion
g_E		Gewichtungen der Werkstückeigenschaften
G_i	[mm/N]	Dehnungstensor
g_i		Gewichtungen
g_{PF}		Gewichtungen der Produktfunktionalitäten
h	[mm]	Spanungsdicke
i		Anzahl der Prozessalternativen
i		Zinssatz

$I_{f,p,c}$	$[\text{cm}^4]$	Flächenträgheitsmomente
ISO		Internationale Organisation für Normung
j		Personalanzahl
k		Anzahl der Eingangsgrößen
k		Anzahl der Wertepaare
k		Anzahl der Fertigungsprozesse je Fertigungsverkettung
$K_{\text{Abschreibung}}$	[€]	Abschreibungskosten
$K_{\text{Anschaffung}}$	[€]	Anschaffungskosten
$K_{\text{Beschaffung}}$	[€]	Werkzeugbeschaffungskosten
$K_{\text{Betriebsstoffe}}$	[€]	Betriebsstoffkosten
K_{Energie}	[€]	Energiekosten
$K_{\text{Fertigungskosten}}$	[€]	Fertigungskosten
$K_{\text{Gesamtausschuss}}$	[€]	Ausschusskosten
$K_{\text{Herstellkosten}}$	[€]	Herstellkosten
$K_{\text{Hilfsstoffe}}$	[€]	Hilfsstoffkosten
K_i	$[\text{N}/\text{mm}]$	Gesamtsteifigkeit
$k_{i,1.1}$	$[\text{N}/\text{mm}^2]$	spezifische Zerspankraft
$K_{\text{Instandhaltung}}$	[€]	Instandhaltungskosten
$K_{\text{Kilopreis}}$	$[\text{€}/\text{Kg}]$	Materialkosten pro Kilogramm
K_{kWh}	$[\text{€}/\text{kWh}]$	Kosten pro Kilowattstunde
$K_{\text{Lohnnebenkosten}}$		Lohnnebenkostenanteil
$K_{\text{Maschinenstundensatz}}$	$[\text{€}/\text{h}]$	Maschinenstundensatz
K_{Material}	[€]	Materialkosten
$K_{\text{Nachschliff}}$	[€]	Nachschliffkosten
$K_{\text{Prozessalternative}}$	[€]	Prozessalternativenkosten
K_{Raum}	[€]	Raumkosten
$K_{\text{Reparatur}}$	[€]	Reparaturkosten
K_{Restwert}	[€]	Werkzeugrestwert
$K_{\text{Rüstkosten}}$	[€]	Rüstkosten
$K_{\text{Schnittpreis}}$	[€]	Schnittpreis
$K_{\text{Stundenlohn}}$	$[\text{€}/\text{h}]$	Stundlohnsatz
$K_{\text{Transport}}$	[€]	Transportkosten
K_{Verkauf}	[€]	Verkaufserlös
$K_{\text{Voreinstellung}}$	[€]	Voreinstellkosten
K_{Wartung}	[€]	Wartungskosten
K_{Werkzeug}	[€]	Werkzeugkosten je Standzeit
$K_{\text{Werkzeugkosten}}$	[€]	Werkzeugkosten
$K_{\text{Wertschöpfung}}$	[€]	Wertschöpfungskosten
K_{WST}	$[\text{N}/\text{mm}]$	Werkstücksteifigkeit
K_{WZM}	$[\text{N}/\text{mm}]$	Maschinensteifigkeit
K_{Zinsen}	[€]	Zinskosten
l	$[\text{mm}]$	Vorschubweg
L		Lösung
l_f	$[\text{m}]$	Länge

L_G		Mögliche Lösungen
l_i	[m]	Länge
L_T		Existente Lösungen
M		Material
M_i		Merkmale
m_n		Anzahl der Stichproben
M_O		Merkmalsobergrenze
M_U		Merkmalsuntergrenze
n		Anzahl der Werkstücke
n		Anzahl der Elemente einer Menge
n	[1/min]	Drehzahl
NC		Numerical Control
n_{Los}		Losgröße
n_s		Anzahl der Nachschliffe
$n_{Schnitte}$		Anzahl der Schnitte
$n_{Werkzeug}$		Anzahl der Werkzeugwechsel
n_z		Anzahl der Zuschnitte
o_p		Obergrenze
P	[bar]	Strahldruck
p		Qualitätsforderung
p, q		Gewichtungen
$P_{Ausschuss}$		prozentualer Ausschussanteil
PDM		Product Data Management
PF_i		Produktfunktionalitäten
PLM		Product Lifecycle Management
P_p		Vorläufige Prozessfähigkeit
P_{pk}		Vorläufige Prozessfähigkeit
PZ_i		Produktzwecke
Q		mittlerer Quadratischer Modellfehler
q		quadratischer Fehler
QFD		Quality Function Deployment
R	[m]	Radius
r_ϵ	[mm]	Eckenradius
$REFA$		Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung e.V.
RM		Rapid Manufacture
RP		Rapid Prototyping
RPZ		Risikoprioritätszahl
R_t	[μm]	Rauhtiefe
R_z	[μm]	gemittelte Rauhtiefe
S		Splinefunktion
s		empirische Streuung
$s_{normiert}$		normierte Streuung
SPC		Statistical Process Control
$STELL_i$		Stellgrößen

STÖR _i		Störgrößen
T		Technologie
T	[min]	Standzeit
t _a	[min]	Anlaufzeit
t _{Abschreibung}	[y]	Abschreibungsdauer
t _c	[min]	Schnittzeit
t _{e,i}	[h]	Personaleinsatzdauer
t _{e,M}	[h]	Belegungszeit
t _{Erholung}	[min]	Erholungszeit
t _{Gesamtausschuss}	[min]	Herstellzeit bedingt durch Ausschuss
t _{Grund}	[min]	Grundzeit
t _h	[min]	Hauptzeit
t _n	[min]	Nebenzeit
t _{Nutzung}	[h]	Nutzungsdauer
t _p	[min]	Positionierzeit
t _{Prozessalternative}	[min]	Maschinenbelegungszeit je Prozessalternative
t _r	[min]	Rüstzeit
t _s	[min]	Anschnittzeit
t _ü	[min]	Überlaufzeit
t _{Verteil}	[min]	Verteilzeit
t _{Werkstück}	[min]	Werkstückwechselzeit
t _z	[min]	Zustellzeit
t _{α,n-1}		Irrtumswahrscheinlichkeitskoeffizient
u. a.		unter anderem
u _p		Untergrenze
v _a	[m/s]	Axialgeschwindigkeit
v _c	[m/min]	Schnittgeschwindigkeit
	[m/s]	
v _f	[m/min]	Vorschubgeschwindigkeit
VP		Virtual Prototyping
VR		Virtual Reality
v _R	[m/min]	Rückhubgeschwindigkeit
V _{Rohteil}	[cm ³]	Rohteilvolumen
v _t	[m/s]	Tangentialgeschwindigkeit
v _w	[m/min]	Werkstückgeschwindigkeit
v _Z	[m/min]	Zuggeschwindigkeit
W		Werkstück
W _n		empirische Verteilungsfunktion
X	[mm]	Schneidspalt
x	[mm]	Zustellweite
x ₁		kleinster Wert eines Wertebereichs
x _i		Messgrößen
x _i		Eingangsgrößen
x _i		Stützstellen

x_n		größter Wert eines Wertebereichs
Y_i		Ausgangsgrößen
z.B.		zum Beispiel
α	[°]	Strahlwinkel
α		Irrtumswahrscheinlichkeit
κ_r	[°]	Einstellwinkel
ρ	[Kg/cm ³]	spezifische Dichte
σ	[°]	Spitzenwinkel
σ		Streuung
Φ		Normalverteilungsfunktion
χ	[°]	Einstellwinkel
ω	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit

1 Einleitung

Der Vergleich von Produzenten in Hoch- und Niedriglohnländern zeigt, dass sich deren Wettbewerb in zwei Spannungsfeldern abspielt: der Produktionswirtschaftlichkeit und der Planungswirtschaftlichkeit. Auf produktionswirtschaftlicher Ebene konzentrieren sich die Niedriglohnländer auf Skaleneffekte, während Hochlohnländer ihre Positionierung zwischen Skalen- und Verbundeffekten festlegen. Als Skaleneffekt definiert man in der Produktionstheorie, der Betriebswirtschaftslehre und in der Mikroökonomie die Abhängigkeit der Produktionsmenge von der Menge der eingesetzten Produktionsfaktoren. Positive Skaleneffekte, z.B. sinkende Kosten, sind die ökonomische Erklärung für die Massenproduktion (*Bild 1.1*). Unter dem Verbundeffekt wird die qualitative Auswirkung einzelner Transaktionsaktivitäten auf die Nutzenfunktionen anderer Marktteilnehmer verstanden. Dies bedeutet beispielsweise, dass trotz zunehmender Produktvielfalt durch einen Verbundeffekt Kostenvorteile realisiert werden können.

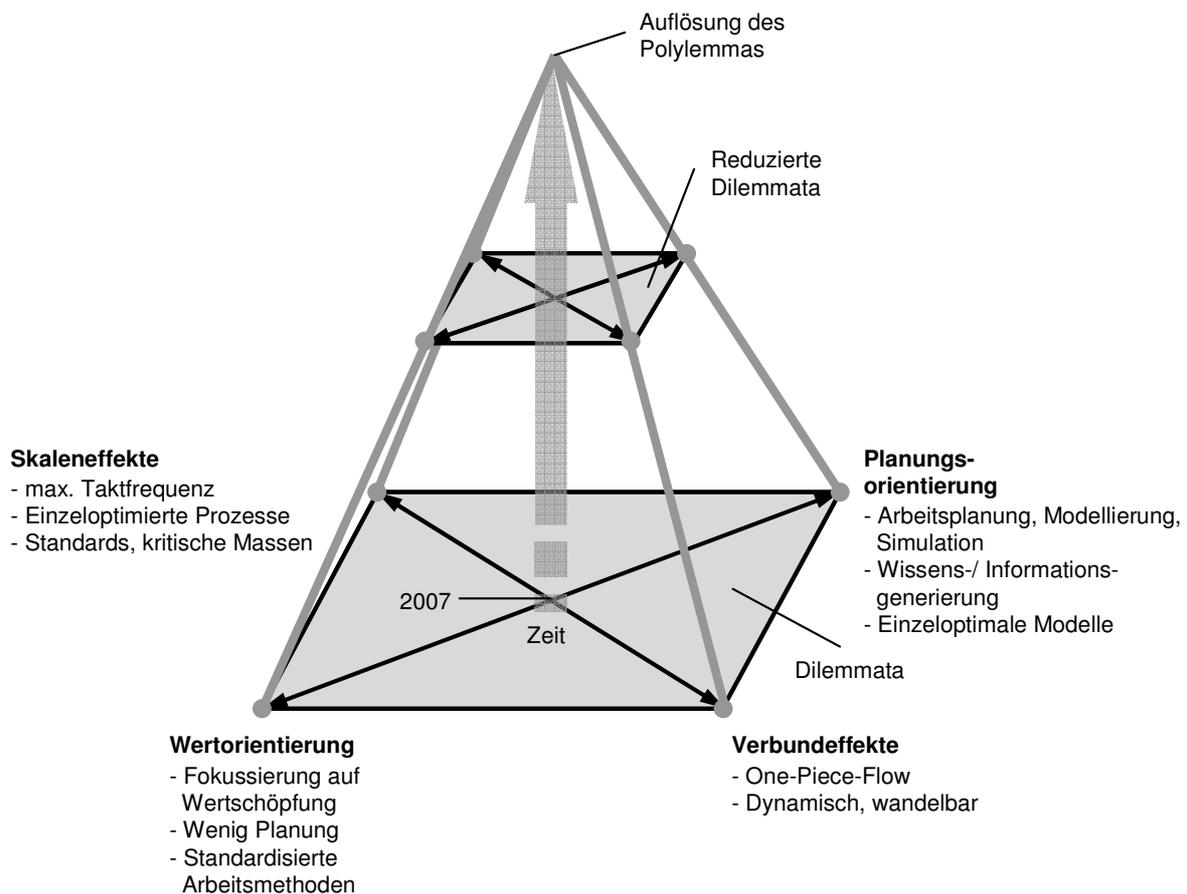


Bild 1.1: Das Polylemma der Produktion und dessen Auflösung (nach [SCHU07])

In der planungswirtschaftlichen Ebene bemühen sich die Produzenten aus Hochlohnländern um eine Prozessverbesserung durch anspruchsvolle und kapitalintensive Planungsinstrumente und Produktionssysteme. Niedriglohnländer fokussieren sich hingegen auf einfache, robuste wertstromoptimierte Prozessketten. Durch eine bessere Positionierung innerhalb der beiden Dichotomien Größeneffekte vs. Verbundeffekte sowie planungsorientiert vs. wertorientiert

lässt sich kein nachhaltiger Wettbewerbsvorteil für produzierende Unternehmen in Hochlohnländern, wie beispielsweise Deutschland, erzielen. Es ist vielmehr eine Auflösung der Dichotomien, die das „Polylemma der Produktion“ (*Bild 1.1*) bilden, notwendig [SCHU07].

Eine Möglichkeit zur Auflösung des Polylemmas für Hochlohnländer ist die Bereitstellung von einfachen, aber effektiven und effizienten Planungsmethoden, die eine Auslegung von robusten und wertschöpfungsorientierten Prozessketten erlauben. Dies ermöglicht die Annäherung der Planungs- und Wertorientierung. Ein wesentlicher Schwerpunkt dieses Lösungsansatzes muss die Vermeidung von Fertigungsfehlern bereits in der Planungsphase sein. Die bisherigen, stark planungsorientierten Ansätze sind zu komplex, um alle wichtigen Einflussfaktoren zur Fehlerbestimmung sinnvoll zu erfassen und sie können somit keine ausreichende Planungssicherheit gewährleisten. Daher verursachen die existierenden Vorgehensweisen der Fehlerbehebung in Fertigung und Montage 30 bis 40 % mehr Aufwand als die Vermeidung der Fehler an den Entstehungsorten „Konstruktion“ und „Fertigungsplanung“ (*Bild 1.2*) [SCHO97a]. Durch eine Verschiebung der Fehlerbehebung in die Planungsphase wird die Wertorientierung stärker an die Planungsorientierung angenähert.

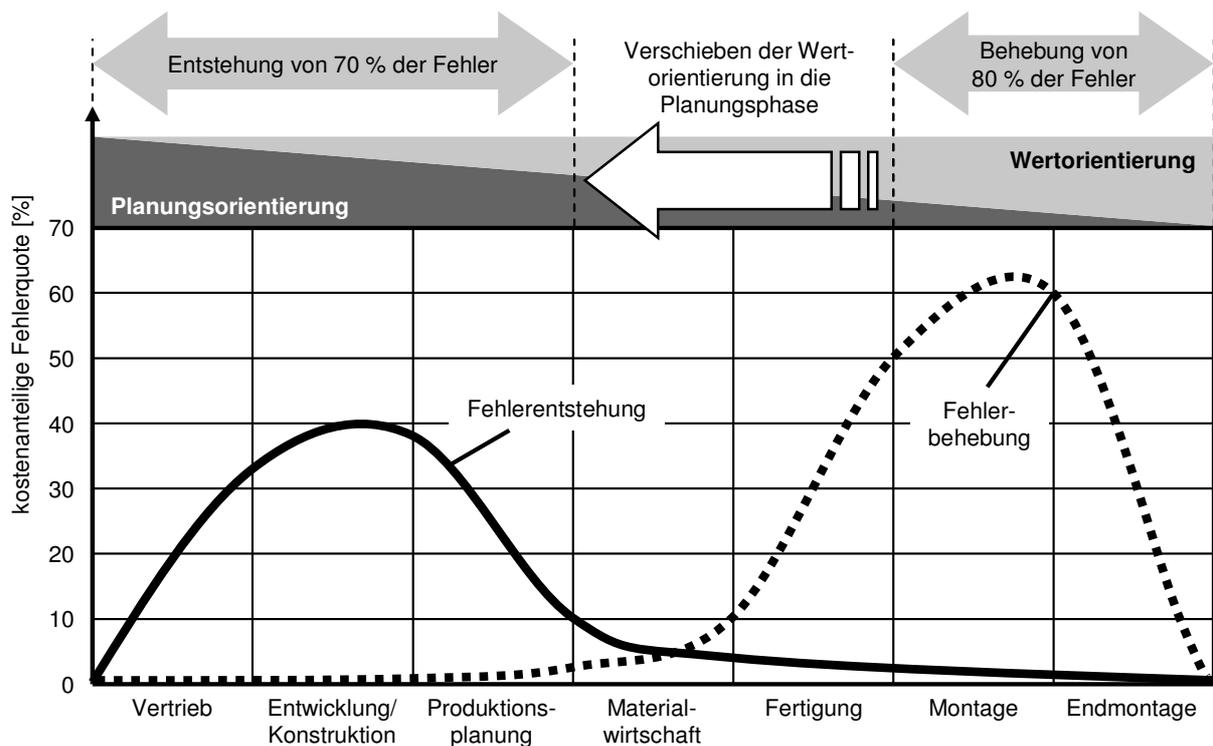


Bild 1.2: Fehlerentstehung und Fehlerbehebung (nach [SCHO97a])

Gerade die Phasen Konstruktion und Produktionsplanung des Produktlebenszyklus bergen ein enormes Potential, um durch gezielte Planung die Kosten der späteren Produktfertigung zu reduzieren. Man spricht von einem 15- bis 30-%igen Verbesserungspotential bei Prozessen, die nicht von Anfang an gezielt gestaltet wurden. Dabei bewahrheiten sich die Poppelreuter'schen Leitsätze [GLAT02]:

- Die Natur des Menschen tendiert nicht zur rationellsten Arbeitsweise.

- Es besteht die Tendenz, Arbeiten auszuführen, ohne sich über die genauere Art und Weise der Ausführung Gedanken zu machen.
- Die anfänglich und häufig zufällig gewählte Arbeitsmethode wird oft beibehalten, auch dann, wenn sie unzweckmäßig ist.
- Die Vorstellung der Ausführungsmethode der eigenen Arbeit ist meist sehr ungenau.
- Prozesse, die nicht gezielt gestaltet wurden, enthalten mit großer Gewissheit wesentliche Verbesserungsmöglichkeiten.
- Selbst bei den einfachsten Arbeitsgängen zeigen sich große individuelle Unterschiede.

Dabei stellt der Markt die strikten Forderungen, Produkte kostengünstig anzubieten und den Wettbewerbern in Produktqualität und/ oder Produktkosten überlegen zu sein. Deutsche Unternehmen geraten daher auf dem internationalen Markt unter Preisdruck. Nur wer es schafft, neue Technologien, Qualität und Preis gleichermaßen zu optimieren, kann auf Dauer bestehen. Der klassische Produktentwicklungsprozess in deutschen Unternehmen ist jedoch immer noch stark alleinig durch die Konstruktion getrieben und vernachlässigt andere Aspekte, wie beispielsweise die Fertigung. Daraus ergibt sich eine stark eingegrenzte Sichtweise: Informationen und Bedingungen, die nicht in das Erfolgskonzept passen, werden einfach ausgeblendet [SPAT01]. Nachträgliche Kostensenkungsprogramme packen jedoch dieses Problem nicht am Ursprung.

Der klassische Gedanke, enge Toleranzen mit den letzten Fertigungsschritten einer Prozesskette – den Endbearbeitungsprozessen – zu fertigen und erzeugte Toleranzen nicht wieder durch nachfolgende Fertigungsprozesse zu verschlechtern, ist überall präsent. Das Resultat sind häufig zu eng tolerierte Maße entlang der wertschöpfenden Prozesskette, welche die Herstellkosten in die Höhe treiben. Die Kombination aus engen Toleranzen und Hochleistungsprozessen führt häufig zu instabilen Prozessen, welche nicht nur zu teurem Ausschuss führen sondern die Fertigung auch nahezu unplanbar machen [MARC07].

Im Folgenden wird ein methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen vorgestellt. Dieses legt erst nach der Planung der Prozesskette die Toleranzen entlang der Prozesskette fest. Dies geschieht auf Basis der vorgegebenen Endtoleranzen aus der Konstruktion und unter Berücksichtigung von Erfahrungswissen. Auf diese Weise wird ein neuer, wesentlicher Beitrag zur Auflösung des Polylemmas der Produktionstechnik in Hochlohnländern geleistet und die zuvor beschriebenen Probleme lassen sich vermeiden.

1 Introduction

The comparison between manufactures in high wage and low wage countries shows a competition in two areas of conflict: planning and production profitableness. On the level of production profitableness, low wage countries focus on effects of scale, while high wage countries define their position between effects of scale and scope. Effects of scale are defined by the production theory, business economics and microeconomics as the dependency of production batch and the deployed amount of production factors. Positive scale effects, e.g. decreasing cost, are the economical declaration of mass production (*Figure 1.1*). The effect of scope is the qualitative consequence of single transaction activities on the utility function of other competitors. Exemplary this means the realisation of cost benefits by an effect of scope in spite of increasing product variety.

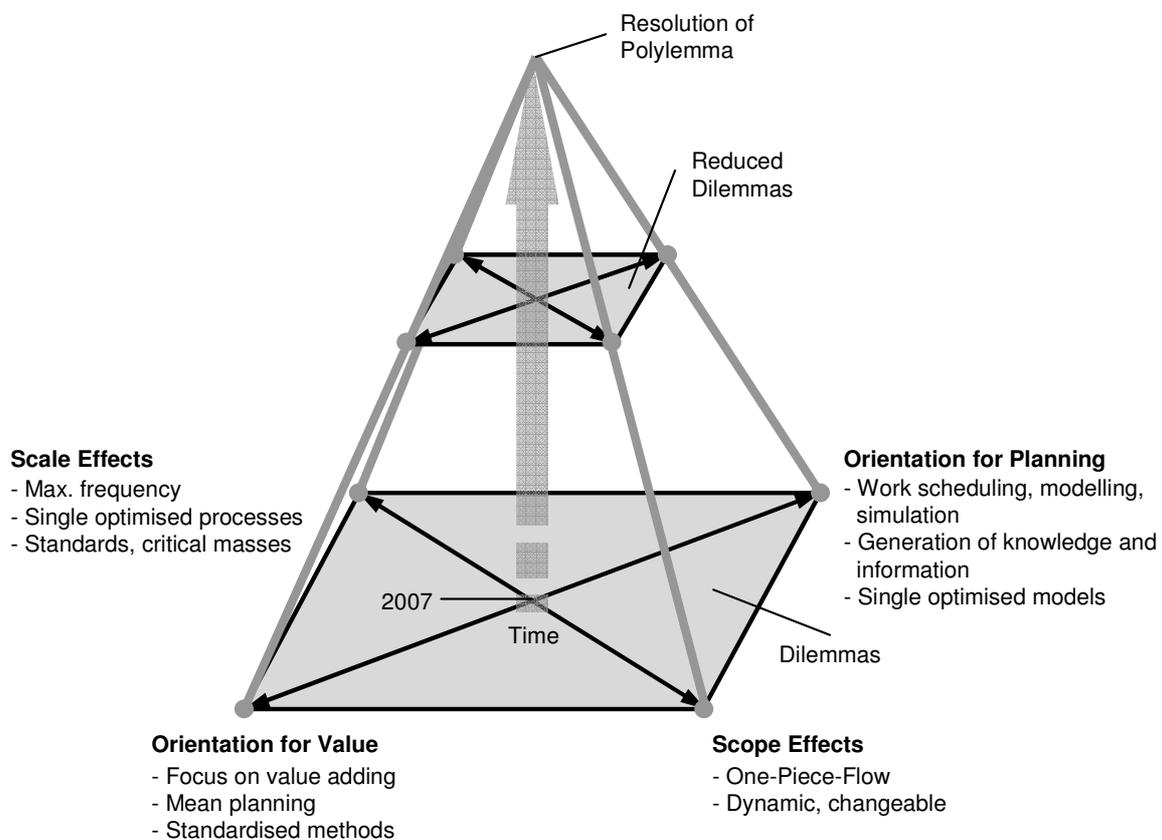


Figure 1.1: *The Polylemma of Production and its Resolution (according to [SCHU07])*

On the level of orientation for planning, the manufactures in high wage countries endeavour for an advancement of processes by ambitious and capital intensive planning methods and production systems. However, low wage countries focus on simple, robust value-stream orientated process chains. By a better positioning within the two dichotomies effects of scale vs. effects of scope as well as orientation for planning vs. orientation for value, a sustainable advantage in competition for manufacturing companies in high wage countries, e.g. Germany, is not realisable. Rather a resolution of the “polylemma of production” (*Figure 1.1*) is necessary [SCHU07].

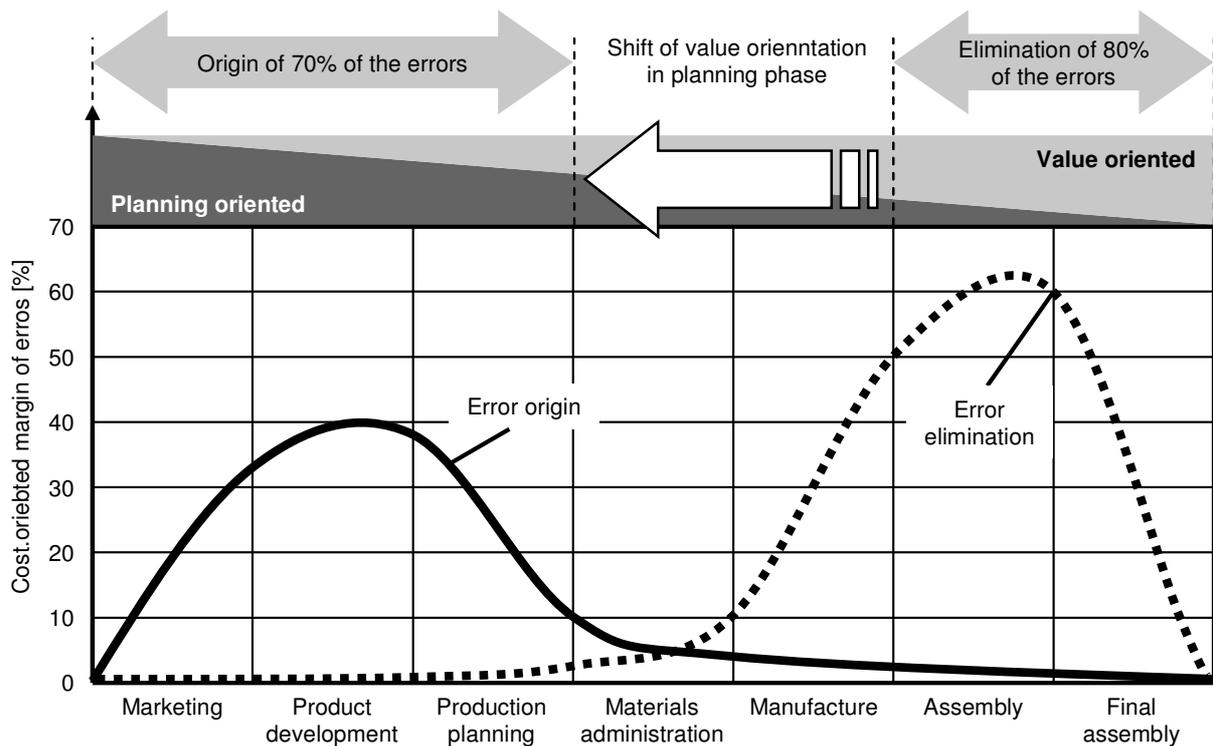


Figure 1.2: Point of Origin and Solution of Errors according to [SCHO97a]

Especially the phases “engineering” and “production planning” of the product life cycle contain an enormous potential to reduce costs of the subsequent manufacturing process simply by systematic and targeted planning. It can be claimed that a potential of advancement of approximately 15 – 30% certainly could be put into practice for all those processes, which have not been designed properly and thoughtful from the beginning on [GLAT02]. For this case the guidelines of Poppelreuter prove true:

- The natural human mode of operation does not lead towards the most efficient solutions.
- A certain tendency to perform tasks without thinking about the specific way of achievement can be noticed.
- An in the beginning accidentally chosen mode of operation often is maintained, even though it appears to be inappropriate or ineffective.
- The perception and definition of own methods to perform a certain task mostly are very inaccurate.
- Processes that do not have to be designed especially targeted, definitely contain a significant potential of advancement.
- Even within the easiest and most simple steps of a process chain considerable individual differences arise.

The market strictly defines its aim, though: to offer cheap and reasonable products and to be superior to all competitors in the fields of product quality and production costs. Therefore, German enterprises are pressurised by the price policy of the international markets. Only those who can manage to optimise innovation, quality and price at the same time will survive on the market. However, the classic process of production development in German companies

still is strongly driven by products. Thus the resulting restricted view prevalently is a consequence of selective cognition. Information and conditions that do not fit the concept of success plainly are being fade out [SPAT01]. Supplementary programs for cost reduction do not solve this problem at its origin.

The classic thought of producing tight tolerances within the last steps of a process chain – the finishing process – and not to deteriorate once achieved tolerances by following steps of machining, is present everywhere. For the most parts the result is a much too tight field of tolerance along the chain of value creation, which directly inflates the costs of production. The combination of tight tolerances and high performance processes leads often to instable processes, resulting in expensive scrap and an unplannable manufacture [MARC07].

Following a methodical system for cost-optimal design of steady-state production chains is going to be provided. The system defines the tolerances along the process chain after the planning of the manufacturing. This happens on basis of given final tolerances from the design and the consideration of expert knowledge. In this manner, a new, essential contribution to resolve the polylemma of production is provided and the prementioned problems can be avoided.

2 Stand der Erkenntnisse

2 State of the Art

2.1 Begriffsdefinitionen

2.1 Definitions

Einige grundlegende Begriffe, welche im direkten Zusammenhang mit der Auslegung von fehlertoleranten und prozessstabilen Fertigungsverkettungen stehen, kommen in der Literatur unterschiedliche Bedeutungen zu und werden von Fachleuten unterschiedlich verwendet. Um ein gemeinsames Verständnis der Thematik aufzubauen, ist es daher zunächst notwendig, diese Begriffe im Kontext dieser Arbeit einheitlich zu definieren.

Der **Fertigungsprozess** bildet den Schwerpunkt der betrieblichen Leistungserstellung. Er ist dem Beschaffungsprozess nach- und dem Distributionsprozess vorgelagert. Unter Fertigung sei die methodische Erstellung von Sachgütern verstanden. Formal ist der Fertigungsprozess ein Kombinationsprozess produktiver Faktoren [SCHN02]. Im Rahmen dieser Arbeit beschreibt der Fertigungsprozess die angewandte Fertigungstechnologie unter Berücksichtigung der Einflüsse von Werkzeug, Werkzeughalter, Werkzeugmaschine und Spannsystem auf das Werkstück. Die Einflüsse von Fertigungstechnologie, Werkzeug, Werkzeughalter, Werkzeugmaschine und Spannsystem werden nicht einzeln quantitativ erfasst, sondern als gesamtheitliches, abgeschlossenes Wirksystem betrachtet. Eine Änderung dieser Größen, z.B. des Werkzeuges, wird als Stell- und Störgröße des Fertigungsprozesses definiert.

Die **Fertigungshistorie** beschreibt die zeitabhängige Veränderung des Werkstückes durch Fertigungsprozesse. Neben geometrischen und physikalischen Veränderungen werden auch Änderungen der Werkstoffeigenschaften berücksichtigt. Logistische Veränderungen des Werkstückes, wie beispielsweise Position, Lage und Kennzeichnung, sind nicht im Betrachtungsfokus der Fertigungshistorie.

Der Begriff der „**Prozesskette**“ ist hingegen nicht allgemeingültig definiert. Nach VDI 2211 [VDI2211] ist eine Prozesskette eine aufeinander aufbauende Folge von Aktivitäten und als System zu betrachten. Allgemein wird innerhalb einer Prozesskette ein allen Subsystemen gemeinsames Systemelement durch eine sequentielle Folge von Prozessen von einem Anfangszustand in einen Endzustand überführt [SCHF03]. Weiterhin wird der Begriff „Prozesskette“ in der ingenieurwissenschaftlich relevanten Literatur für die Gesamtbetrachtung des Produktlebenszyklus als Verkettung der Phasen Produktidee, Entwicklung, Fertigung, Montage, Logistik, Gebrauch und Service verwendet [WENG95, JESC96, KLOC96, WEST96, EVER97, KLOC97, MOL97, EVER99, KLOC99a, SPAT99, KLOC00]. Ebenso findet der Begriff für die Verkettung von Handhabungs-, Transport- und Lagerprozesse in der Logistik [KUHN95, BAUM96, HESS97], beim Produktgestaltungsprozess für die Verkettung von Gestaltungsphasen oder Toleranzen [HOLL97, FELD95] und in der Daten- sowie Informationsverarbeitung für die durchgängige Verwendung gleicher Produktdatensätze für Produktdesign, Produktfertigung, Fertigungsplanung und Qualitätssicherung [KRZE93, CHEN94, FISC95, ANDE99, MUNK99] Verwendung. Andere Autoren verwenden ähnliche Begriffsde-

definitionen, z.B. in der Fertigungstechnik für die Folge von Fertigungsprozessen bei der Herstellung von Erzeugnissen [HOFF96, KLUM97, MERZ97, WARN98, ZAPP98, KLOC99b, GEIG99, WARN99, GEIG00, FALL00, SCHO00, TROM01].

Aufgrund der vielzähligen Verwendung des Begriffes „Prozesskette“ in der Literatur und der daraus resultierenden Zweideutigkeit soll innerhalb dieser Arbeit vielmehr der Begriff „Fertigungsverkettung“ verwendet werden. Eine **Fertigungsverkettung** ist die Verknüpfung von Fertigungsprozessen entsprechend der Fertigungshistorie ohne Berücksichtigung von logistischen und ökonomischen Aspekten. Fertigungsverkettungen stellen eine reine fertigungstechnologische Betrachtungsweise dar.

Unter einer **Technologiekette** ist in diesem Zusammenhang die sequentielle Verknüpfung von abstrakten, produktionsmittelunabhängigen Fertigungstechnologien (z.B. Drehen oder Fräsen) zu verstehen, durch die ein Werkstück durch iterative Veränderung vom Rohzustand über mehrere Zwischenzustände in einen festgelegten Endzustand gebracht wird [FALL00, TROM01]. **Fertigungsfolgen** werden aufbauend auf Technologieketten generiert. Sie sind produktionsumgebungsbezogen und berücksichtigen neben den Fertigungstechnologien auch die im Materialfluss zur Herstellung des Werkstücks notwendigen Transport-, Handhabungs- und Lagerschritte [TROM01].

Die **Prozessfähigkeit** ist ein Maß, inwieweit ein Prozess bzw. sein zu überwachendes Qualitätsmerkmal den spezifizierten Toleranzanforderungen genügt [RINN99]. Sie ist ein Maß für die langfristige Merkmalstreuung. Dabei soll der Nachweis erbracht werden, dass der betrachtete Fertigungsprozess auch auf längere Sicht in der Lage ist, die an ihn gestellten Anforderungen zu erfüllen [KAMI95]. Es wird davon ausgegangen, dass bei der Herstellung von Werkstücken Unterschiede bezüglich des betrachteten Merkmals feststellbar sind. Dieses Abweichungsverhalten eines Merkmals von einem Sollwert ist eine Störung und wird als **Streuung** und **Abweichung** bezeichnet [KAMI95]. Abweichungen entstehen durch systematische Fehlerursachen (z.B. kontinuierlicher Werkzeugverschleiß), während Streuungen aufgrund zufälliger Fehlerursachen erzeugt werden (z.B. Materialinhomogenitäten). Innerhalb dieser Arbeit werden beide Störungen berücksichtigt. Die Überlagerung von Streuungen und Abweichungen wird im Folgenden als **Prozessungenauigkeit** bezeichnet. Ein Prozess gilt als beherrscht, sofern seine Ausgangsgrößen, z.B. erzeugte Werkstückeigenschaften, vorhersagbar sind [PFEI01]. Man spricht von der **Prozessbeherrschung**.

Stabilität ist die Fähigkeit eines Systems, nach einer Störung wieder in den Ausgangszustand zurückzukehren. Ein stabiles System neigt dazu, seinen momentanen Zustand beizubehalten, auch wenn Störungen von außen einwirken. Ein **Fehler** ist hingegen die Nichterfüllung einer festgelegten Forderung [EN9000]. Dabei werden unter Forderung speziell auch Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmerkmale verstanden. Über mögliche oder notwendige Folgen dieser Nichterfüllung wird nichts ausgesagt, so dass jede Abweichung von der vorgegebenen Forderung als Fehler zu betrachten ist [KAMI95].

Durch aus Prozessungenauigkeiten resultierende Prozessfehler erzeugt der Fertigungsprozess **Ausschuss**. Unter Ausschuss werden Werkstoffe, Werkstücke oder Fertigwaren bezeichnet, wenn diese dergestalt fehlerbehaftet sind, dass sie den ihnen zugedachten Zweck nicht hinrei-

chend erfüllen können. Sie werden dann z. B. der Wiederverwertung zugeführt oder anders als ursprünglich geplant eingesetzt. Ein bestimmtes Maß an Ausschuss kann durchaus erlaubt sein und ökonomische Vorteile haben. Dies ist der Fall, sofern der Ausschuss ausreichend erkannt werden kann und die Fertigungskosten soweit gesenkt werden können, dass die Ausschusskosten geringer sind, als das Einsparpotential durch die Einsparung von Fertigungskosten.

Qualität zielt auf die Erfüllung von Erwartungen, zumeist Kundenerwartungen, ab [KAMI95]. Qualität wird in der Norm DIN EN ISO 9000:25 [EN9000] als „Gesamtheit von Eigenschaften und Merkmalen eines Produktes oder einer Dienstleistung, die sich auf deren Eignung zur Erfüllung festgelegter oder vorausgesetzter Erfordernisse beziehen“, definiert. Die in dieser Definition angesprochenen Erfordernisse ergeben sich aus den Ansprüchen vorhandener und potentieller Kunden bezüglich wesentlicher Merkmale von Produktangeboten. Unternehmen versuchen, solche Ansprüche von Kunden durch Marktanalysen zu ermitteln, um die Ergebnisse dann in Planungsvorgaben für Qualitätsmerkmale von Produkten und Dienstleistungen zu überführen [RINN98]. Qualität wird also letztendlich daran gemessen, inwieweit Konstruktionsvorgaben für Qualitätsmerkmale getroffen werden. Qualität ist somit der Grad der Einhaltung von Planungsvorgaben für Eigenschaften und Merkmale bei Produkten und Dienstleistungen.

Als Qualitätsmerkmal wird u.a. die Erfüllung der **Werkstücktoleranzen** herangezogen. Die Werkstücktoleranzen legen erlaubte Abweichungen von der Sollvorgabe eines Merkmals fest. Die betrachteten Merkmale sind nicht nur geometrischer Natur sondern stellen vielmehr alle werkstückbeschreibenden Messgrößen dar, z.B. Oberflächeneigenschaften, Charakterisierung der Werkstückrandzone etc.

Wissensmanagement ist verallgemeinert ein zusammenfassender Begriff für alle Managementpraktiken, die darauf abzielen, in Organisationen Wissen einzusetzen und zu entwickeln, um die Unternehmensziele bestmöglich zu erreichen. Innerhalb dieser Arbeit wird unter Wissensmanagement die Abbildung von komplexem Welt- und Expertenwissen auf regel- und datenbankbasierte Strukturen verstanden. Dazu gehört ebenso die Präsentation in einem intelligenten Informationssystem [SPAT01].

Die **Sensitivitätsanalyse**, oder auch Empfindlichkeitsanalyse, ist eine Analyseform für komplexe Systeme und Probleme, bei der einfache Wirkungsbeziehungen zwischen Systemvariablen zu einem Wirkungsnetz verbunden werden. Mittels dem Wirkungsnetz können Einflüsse auf die Systemvariablen festgelegt werden. In der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Eingangsfaktoren (einzeln oder gemeinsam) auf bestimmte Ergebnisgrößen untersucht. Die Analyse kann mathematisch durch das Analysieren von Modellgleichungen erfolgen oder auch durch die Verwendung von variierten einzelnen Eingangsfaktoren (Iterationsverfahren) [BRON05].

Die **Nutzwertanalyse** ist eine Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen. Die Abbildung der Ordnung erfolgt durch die Angabe der Nutzwerte (Gesamtwerte) der Alternativen [ZANG76]. Das

Benchmarking ist ein Teilaspekt und wird als vergleichende Bewertung von Alternativen verstanden. Als Bewertungsmaßstab wird ein fester Wert festgelegt.

Der **Entwicklungsgrad** ist ein Maß für den Entwicklungsfortschritt und die Implementierung sowie Nutzung einer Methode. Je höher der Entwicklungsgrad ist, desto weiter ist die Methode entwickelt bzw. implementiert.

2.2 *Existierende Methoden und Hilfsmittel zur Gestaltung von stabilen Prozessketten*

2.2 *Existing Methodologies and Tools for the Generation of steady Process Chains*

Fertigungsverkettungen sind durch eine hohe Anzahl zu betrachtender Systemelemente, Beziehungen, Systemparameter und Dynamik charakterisiert [SCHA03]. Dabei muss die Darstellung der Fertigungstoleranzen allen technischen und wirtschaftlichen Anforderungen genügen, das heißt sie muss funktionsgerecht, fertigungsgerecht und prüfgerecht sein [BAER03]. Ob die existierenden Ansätze, Methoden und Hilfsmittel diesem Anspruch genügen, wird im Folgenden untersucht. Der Übersicht wegen wird innerhalb dieser Arbeit zwischen

- wissenschaftlichen Ansätzen,
- mathematischen Ansätzen,
- angewandten Methoden und
- Software

unterschieden.

2.2.1 *Wissenschaftliche Ansätze*

2.2.1 *Scientific Approaches*

Im Folgenden werden die bereits existierenden wissenschaftlichen Ansätze bezüglich ihrer Einsetzbarkeit innerhalb dieser Arbeit untersucht. Als Bewertungskriterien werden dabei

- der Betrachtungsfokus,
- der Einsatzzeitpunkt,
- die Applizierbarkeit auf Fertigungsverkettungen,
- die Ableitung von Fertigungstoleranzen,
- die Bestimmung von Herstellkosten,
- die Bestimmung von Herstellzeiten,
- eine eventuelle Produktspezialisierung,
- die Planung unter Unsicherheit,
- die Verarbeitung von Planungswissen und
- die Ableitung einer optimalen Fertigungsstrategie

verwendet. Der Betrachtungsfokus spiegelt den Anwendungsfokus, z.B. auf bestimmte Werkstücke oder Werkstoffe, wider. Die Planung unter Unsicherheit erlaubt neben der Verarbeitung von exakten Daten auch die Verwendung von linguistischen oder grob geschätzten

Werten. Nicht berücksichtigt wird der Entwicklungsgrad der untersuchten Methoden. Im Folgenden werden die Arbeiten von Fallböhrer, Trommer, Kopner, Knoche, van Vliet, Jurklics und Schäfer diskutiert.

Fallböhrer – Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung

Fallböhrer konzentriert sich bei seinem Ansatz auf die Generierung von Technologieketten (Bild 2.1). Besonderes Augenmerk richtet er dabei auf die Entwicklung einer Methode zur Unterstützung einer integrierten Technologieplanung. Ziel ist die Verzahnung von Produkt- und Prozessgestaltung, was konkret die enge Zusammenarbeit der Konstruktion mit der Technologieplanung in frühen Phasen der Produktentwicklung meint.

Dazu entwickelte Fallböhrer eine Vorgehensweise, die die Tätigkeiten der operativen Technologieplanung mit denen des Produktgestaltungsprozesses kombiniert.

Neben der Integrationsleistung unterstützt die Methode eine Systematisierung der Produkt-Fertigungstechnologie-Zuordnung und die Generierung von alternativen Technologieketten. Dazu wird die featurebasierte Konstruktion (siehe Kapitel 5.2) von Produkt- und Technologiemerkmalen genutzt. Die Vorgehensweise setzt sich aus iterativen Konstruktions- und Technologieplanungsphasen zusammen, die bereits nach der groben Produktgestaltung einsetzen.

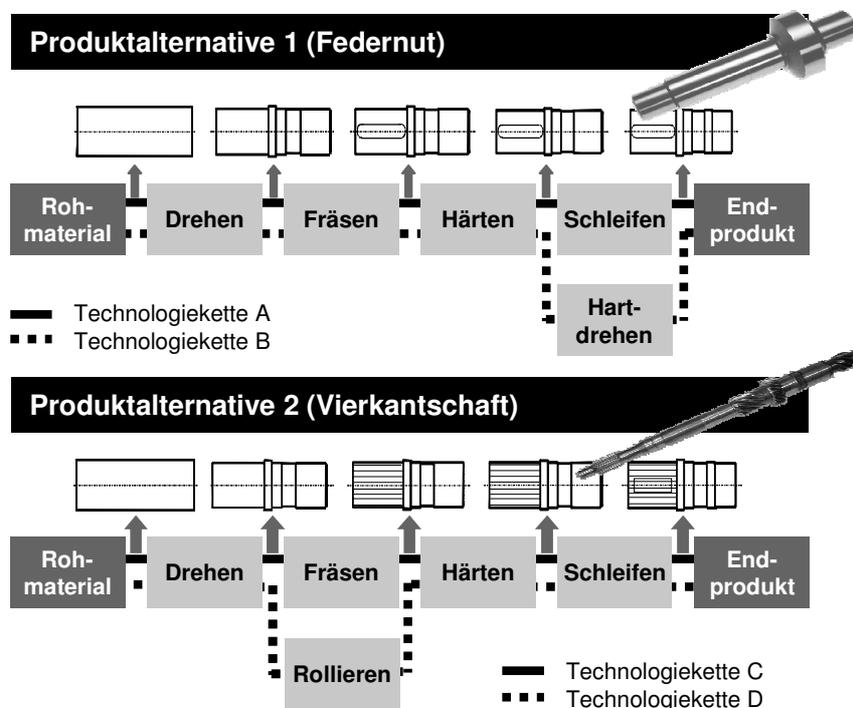


Bild 2.1: *Alternative Technologieketten nach Fallböhrer*

Figure 2.1: *Alternative Technology Chains according to Fallböhrer*

Fallböhmers Ansatz zielt auf die abstrakte Technologieebene ab. Dabei werden ausschließlich technologische Aspekte betrachtet. Es fehlt eine Sichtweise auf weitere Kriterien wie Qualität und Wirtschaftlichkeit. Dennoch bildet die Methode eine Basis zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen. Insbesondere liefern die hergeleiteten Technologieketten eine Grundlage, auf der eine weitere Betrachtung der Bedeutung von Fehlern in der Fertigungsverkettung erfolgen kann [FALL00].

Trommer – Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen

Aufbauend auf der Arbeit von Fallböhmmer liefert die Methode nach Trommer einen Ansatz, der die Planung auf Prozessebene unterstützt. Somit wird in seiner Arbeit von der Generierung von Fertigungsfolgen gesprochen. Ähnlich wie Fallböhmmer setzt Trommer an der Grobgestaltung von Produkten an und zielt auf die Integration von Produkt- und Prozessgestaltung ab. Allerdings findet neben der Betrachtung von Fertigungstechnologien auch die Betrachtung notwendiger Produktions- und Betriebsmitteln statt (*Bild 2.2*).

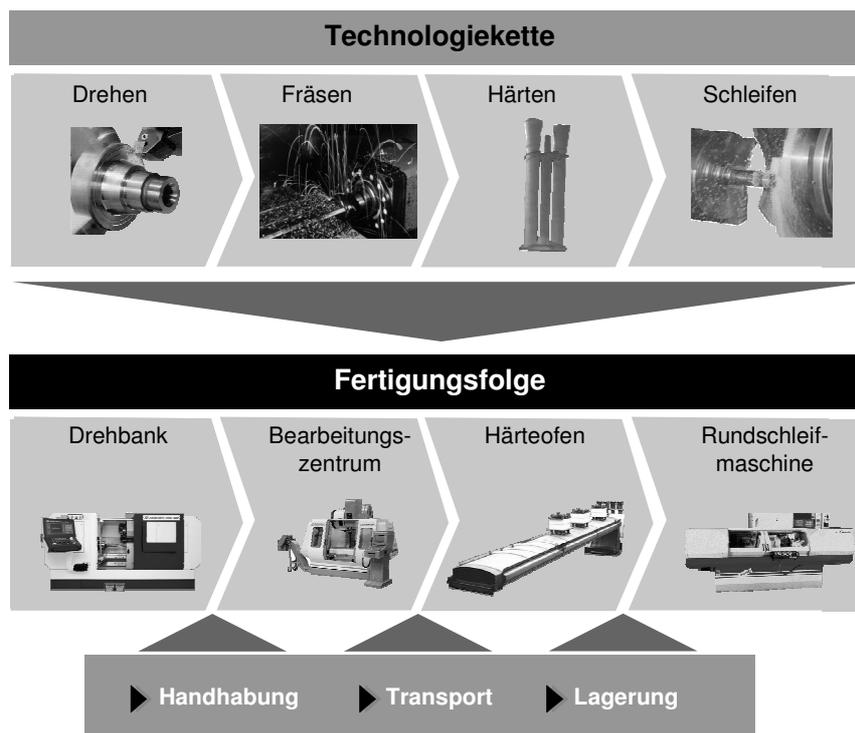


Bild 2.2: *Generierung von Fertigungsfolgen nach Trommer [TROM01]*

Figure 2.2: *Generation of Manufacturing Chains according to Trommer [TROM01]*

Trommer erweitert die Sichtweise auf Betriebsmittel und Produktionsstandorte und führt damit weitere Kriterien ein, die zu einer anschließenden Bewertung genutzt werden können. So treten neben technologischen Kriterien vermehrt auch wirtschaftliche und qualitative Aspekte in den Vordergrund. Obwohl die Methode der Forderung nach einer Ausweitung der Planung

über die technologischen Kriterien hinaus nachkommt, finden sich noch keine Elemente wieder, die ein gezieltes Fehler- und Toleranzmanagement unterstützen [TROM01].

Kopner – Prozessmodellbasiertes Technologieplanungssystem für Autonome Produktionszellen

Ziel der Arbeit von Kopner ist es, dem Benutzer ein Unterstützungswerkzeug zur Verfügung zu stellen, welches ihn ausgehend von der Feature-Beschreibung einer Bearbeitungsaufgabe für die Verfahren Bohren und Fräsen bei der Prozessauslegung unterstützt. Die Arbeit konzentriert sich dabei auf die Werkzeugauswahl, Schneidstoffauswahl, Fräsbahnplanung sowie Schnittparameteroptimierung. Voraussetzung dafür ist einerseits die Kenntnis des Potentials und der Leistungsgrenzen der Werkzeuge und andererseits die Kenntnis der technologischen Zusammenhänge zur Wahl wirtschaftlicher Schnittbedingungen. Denkbar ist die Verwendung innerhalb des zu entwickelnden Systems für die Generierung von Zerspanparametern zur Erzeugung von Prozessalternativen [KOPN02].

Knoche – Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien

Knoche beschäftigt sich zunächst mit der Frage, wie ein Technologiemo­dell beschaffen sein muss, um in der Lage zu sein, verschiedene Fertigungstechnologien zu beschreiben. Knoche stellt dar, dass Fertigungstechnologien dadurch gekennzeichnet sind, dass diese bestimmte Ein- und Ausgangsgrößen besitzen. Diese Größen beschreiben das Werkstück in allen für die Technologieplanung relevanten Aspekten. Eine Fertigungstechnologie hat damit den Charakter einer Übertragungsfunktion, die Ein- und Ausgangsgrößen in definierter Weise miteinander verknüpft.

Das Modell soll die Technologieketten­generierung vom Endprodukt zum Halb- bzw. Rohteil grundlegend unterstützen. Eine Verknüpfung zweier Fertigungstechnologien erfolgt dabei, wenn die Eingangsgrößen des nachfolgenden Prozesses mit den Ausgangsgrößen des vorherigen Prozesses übereinstimmen. Da im Algorithmus keine Arbeitsrichtung enthalten ist, kann es vorkommen, dass ein Prozessschritt den vorherigen wieder rückgängig macht. Es kann somit passieren, dass die Technologiekette sich von den sinnvollen Halb- bzw. Rohteilzuständen entfernt [KNOC05].

Es lässt sich feststellen, dass das Modell so allgemein gehalten ist, dass eine Anwendung für komplexe Fertigungs­verkettungen zwar theoretisch möglich, aber nicht abgesichert ist. Die zwangsläufig mit der Methode verbundenen Ungenauigkeiten führen bei komplexen Fertigungs­verkettungen zu keinen quantifizierbaren, bewertbaren Zielgrößen.

van Vliet – Design for Manufacturing: Development and Application of a Process-based Design Support Methodology

In den Ansätzen ist die Methode nach van Vliet [VLIE01] vergleichbar mit der Methode nach Fallböhmer. Der Grundansatz wurde jedoch um eine Vielzahl von Schnittstellen, z.B. CAD,

ergänzt. Eine Betrachtung von unscharfen Daten, d.h. linguistischen Informationen oder nicht exakt definierten Werten, erfolgt jedoch nicht. Ebenso ist eine ganzheitliche Bewertung einer Fertigungsverkettung nicht möglich. Eine Verwendung der Methode ist somit ausgeschlossen.

Jurklias – Generierung und Bewertung von Prozessketten für den Werkzeug- und Formenbau

Jurklias beschäftigt sich in ihrer Arbeit mit der Konzeption einer Methode zur Generierung und Bewertung von Prozessketten. Die Methode sieht im Wesentlichen die folgenden Schritte vor:

- Bestimmung der Bearbeitungselemente des Werkstücks,
- Definition der Wichtigkeit der Bearbeitungselemente,
- Bestimmung geeigneter Fertigungsverfahren,
- Kombination der Fertigungsverfahren zu Prozesskettenalternativen und
- Auswahl der anforderungsgerechten Prozesskette.

Der Ansatz sieht vor, die Bearbeitungselemente so weit wie möglich über Bilderkennungssysteme automatisch erkennen zu lassen. Bei komplexen Geometrien versagen diese allerdings [JURK04]. Der eigentliche Auswahl- und Generierungsprozess basiert auf einem Expertensystem, so dass nur auf bereits existierendes Wissen zurückgegriffen werden kann.

Schäfer – Analyse und Gestaltung fertigungstechnischer Prozessketten

Die Methode basiert auf einem Referenzmodell für den Betrachtungsraum „Fertigteil, Prozesskette, Analyse, Gestaltung“ [SCHA03]. Das Ziel der Arbeit ist eine Steigerung der Prozesssicherheit in fertigungstechnischen Prozessketten durch eine ganzheitliche, an den Anforderungen des Fertigteils ausgerichtete Prozesskettenbewertung und Prozesskettengestaltung. Die Methode basiert auf Einfluss-Ursache-Wirkzusammenhängen und verfolgt das Ziel einer prozessübergreifenden Analyse und Beseitigung von Fehlerursachen und Schwachstellen in der Prozesskette. Eine Auslegung der Toleranzen erfolgt jedoch nur ansatzweise. Herstellungskosten, -zeiten und die Variation von Prozessparametern erfolgt gar nicht. Eine Verwendung für den betrachteten Anwendungsfall ist somit nicht möglich.

Bild 2.3 zeigt eine zusammenfassende Übersicht der relevanten wissenschaftlichen Methoden und Ansätze. Die Matrix verdeutlicht den Erfüllungsgrad unter Berücksichtigung der anfangs genannten Bewertungskriterien. Es lässt sich feststellen, dass zwar Methoden für Teilaspekte der Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsketten existieren, ein gesamtheitliches Konzept jedoch gänzlich fehlt. Während die Kriterien des Betrachtungsfokus und des Einsatzzeitpunktes in der Planung von den existierenden Methoden gut erfüllt werden, sind gerade die wichtigen Kriterien der Fertigungsverkettungen und der –toleranzen ungenügend methodisch hinterlegt. Weiterhin weist die Erfüllung der Kriterien Herstellkosten, -zeiten, die Planung unter Unsicherheit und das Nutzen von existierendem Planungswissen durch die vorhandenen Methoden starke Lücken auf.

	Betrachtungsfokus	Einsatzzeitpunkt	Fertigungsverkettungen	Fertigungstoleranzen	Herstellkosten	Herstellzeiten	Produktspezialisierung	Planung unter Unsicherheit	Planungswissen	Optimale Fertigungsstrategie
Fallböhrmer [FALL00]	●	○	●	●	○	○	●	●	●	●
Trommer [TROM01]	●	●	●	○	●	●	●	○	○	●
Knoche [KNOC05]	●	●	○	○	○	○	●	○	○	○
Kopner [KOPN02]	●	●	○	○	●	●	○	○	●	○
van Vliet [VLIE01]	●	●	●	●	○	○	●	○	○	●
Jurklies [JURK04]	●	●	●	●	○	○	○	○	●	●
Schäfer [SCHA03]	●	●	●	○	○	○	●	○	○	●
Vorliegende Arbeit	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

- nicht erfüllt
- ◐ teilweise erfüllt
- erfüllt

Bild 2.3: Analyse der wissenschaftlichen Methoden zur Produktionsplanung
Figure 2.3: Analysis of research-based Methods for Production Planning

2.2.2 Industriell eingesetzte Methoden

2.2.2 Industrially deployed Methods

In der industriellen Praxis findet sich eine Vielzahl von Methoden, welche zur Qualitätssicherung und Fertigungsplanung eingesetzt werden. Die meisten dieser Methoden basieren auf festgelegten Abläufen und haben die Organisation des „miteinander Arbeiten“ bzw. der abteilungsübergreifenden Kommunikation zum Ziel. Die für diese Arbeit relevanten Methoden werden im Folgenden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für den betrachteten Anwendungsfall untersucht. Als Bewertungskriterien werden dabei die in Kapitel 2.2.1 aufgeführten Kriterien verwendet.

Failure Mode and Effects Analysis FMEA

Die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) ist eine formalisierte Methode, um mögliche Probleme sowie deren Risiken und Folgen bereits vor ihrer Entstehung systematisch zu erfassen. Dieses potentielle Auftreten von Fehlern wird von einem bereichsübergreifenden Arbeitsteam unter Anwendung in der Vergangenheit gewonnener Erfahrungen und unter Benutzung des kreativen Potentials der Beteiligten frühzeitig aufgezeigt, bewertet und durch Festlegung geeigneter Maßnahmen vorausschauend vermieden. Dabei unterscheidet man je nach dem Zeitpunkt der Anwendung und dem Objekt der Untersuchung zwischen der Konstruktions-FMEA für ein Produkt und der Prozess-FMEA für ein Herstellungsverfahren. Hinzu kommt die System-FMEA, die sich in den letzten Jahren zur Betrachtung übergeordneter Gesamtsysteme mit ihren Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Einzelsystemen entwi-

ckelt hat [KAMI95]. Die identifizierten Risiken werden anhand ihrer Risikoprioritätszahl $RPZ = R_{\text{Wahrscheinlichkeit des Auftretens}} \cdot R_{\text{Bedeutung der Folgen}} \cdot R_{\text{Wahrscheinlichkeit der Entdeckung}}$ bewertet [PFEI01a].

Nachteilig bei der FMEA wirkt sich die alleinige Konzentration auf bereits vorhandene Erfahrungen aus. Neue Aspekte können nicht berücksichtigt oder bei frühzeitiger Erkennung abgeschätzt werden. Eine Ableitung von quantitativen Toleranzen ist ebenso nicht möglich. Die Prozess-FMEA, welche für die vorliegende Arbeit die größte Relevanz aufweist, bezieht sich weiterhin auf einen bestimmten Prozess in den Bereichen Fertigung, Montage oder Prüfung. Fertigungsverkettungen lassen sich somit nicht oder nur ansatzweise durch die System-FMEA betrachten.

Fehlerbaumanalyse FTA

Im Gegensatz zur FMEA ist die Fehlerbaumanalyse (FTA) eine wissenschaftlich basierte Methode. Dabei geht man von einem unerwünschten Ergebnis aus und stellt in einer Baumstruktur die Ausfallursachen dar. Die Auswertung eines Fehlerbaums liefert sowohl quantitative als auch qualitative Ergebnisse der Fehlerursachensuche [HERI03]. Die Ergebnisse sind jedoch durch die Kenntnis und Sorgfalt des Anwenders begrenzt. Weiterhin ist es schwierig, komplexe Zusammenhänge, beispielsweise eine Fertigungsverkettung, überschaubar zu analysieren.

Taguchi

Taguchi entwickelte die so genannte Methode des Design of Experiments (DoE), welche eine Methode der statistischen Versuchsplanung ist. Die Methode basiert auf Taguchi's Sichtweise der Qualität, die er als Verlust beschreibt, der entsteht, wenn ein ausgeliefertes Produkt seine Funktion nicht erfüllt und bei der Benutzung schädliche Nebeneffekte auftreten. Die Vorgehensweise wird häufig unterschiedlich interpretiert, da keine klare und strukturierte Vorgehensweise beschrieben ist. Der Versuch, z.B. von Boeing oder General Motors, die Methoden Taguchi's mit der Kostenrechnung zu verknüpfen, weist keine gute Quantifizierung der Herstellungskosten auf [PFEI01a].

Quality Function Deployment QFD

Quality Function Deployment ist eine umfassende Methode zur Qualitätsplanung. Sie koordiniert und steuert unter Einbeziehung aller Beteiligten den Produktentstehungsprozess kundenorientiert durch die systematische Anwendung aufeinander abgestimmter Hilfsmittel im Hinblick auf Zeit-, Kosten- und Qualitätsziele. Die gesamte QFD-Methode besteht aus einer Reihe aufeinander aufbauenden Planungsschritten, die sich in vier Entwicklungsphasen einteilen lassen [KAMI95]:

- Qualitätsplan Produkt,
- Qualitätsplan Konstruktion/ Teile,

- Qualitätsplan Prozess und
- Qualitätsplan Produktion.

Dabei kommt in jeder Phase das so genannte House of Quality zum Einsatz. Letztendlich werden anhand von manuell identifizierten Anforderungen und Qualitätsmerkmalen, Gewichtungen und Wechselbeziehungen entsprechende Ziele abgeleitet. Eine Quantifizierung von Toleranzen, Fertigungsprozessen, Kosten und Zeiten erfolgt jedoch nicht.

Prozessfähigkeitsanalyse

Die Prozessfähigkeitsanalyse bewertet die Streuung, die Tendenz und die Stabilität eines Prozesses. Sie basiert auf Kennzahlen, wie beispielsweise c_p - und c_{pk} -Werten. Sie ist eines der wichtigsten Hilfsmittel, um eine laufende Fertigung zu überwachen und gegebenenfalls Unregelmäßigkeiten zu korrigieren [PFEI01a]. Aufgrund der Kennzahlengenerierung ist sie allerdings nur für existierende Fertigungen einsetzbar. Als apriori-Planungshilfsmittel ist sie nicht einsetzbar.

Statistical Process Control SPC

Die statistische Prozessregelung (SPC) ist ein auf mathematisch-statistischen Grundlagen basierendes Instrument, um einen bereits optimierten Prozess durch kontinuierliche Beobachtung und gegebenenfalls Korrekturen auch in diesem optimierten Zustand zu halten [KAMI95]. Mit der Methode kann eine unmittelbare Prozessverbesserung nicht erreicht werden, da die statistische Prozessregelung in der laufenden Fertigung angewendet wird, also nach Festlegung der Prozessparameter. Damit sind grundlegende Änderungen am Prozess nicht mehr möglich. Es können lediglich kleinere Abweichungen ausgeregelt sowie Daten gesammelt und aufbereitet werden, um Ansatzpunkte für eine Verbesserung aufzuzeigen [KAMI95].

Die Analyse der existierenden und industriell eingesetzten Methoden zeigt, dass sich die verwendeten Hilfsmittel größtenteils nur für laufende Fertigungssysteme eignen und außerdem nicht problemlos auf Fertigungsverkettungen anwendbar sind. Eine Übersicht und eine zusammenfassende Bewertung der betrachteten Methoden gibt *Bild 2.4*. Analog zu den wissenschaftlichen Ansätzen sind auch bei den industriell eingesetzten Methoden deutliche Defizite bei der Planung unter Unsicherheit, der Fertigungsoptimierung und der konkreten Berechnung der Herstellzeiten und –kosten vorhanden.

	Betrachtungsfokus	Einsatzzeitpunkt	Fertigungsverkettungen	Fertigungstoleranzen	Herstellkosten	Herstellzeiten	Produktspezialisierung	Planung unter Unsicherheit	Planungswissen	Optimale Fertigungsstrategie
Produkt- und Prozess-FMEA	☐	●	○	☐	☐	○	●	☐	☐	☐
Fehlerbaumanalyse FTA	☐	●	○	○	☐	○	●	○	○	○
Taguchi	●	●	○	☐	☐	☐	●	○	☐	☐
Quality Function Deployment	☐	●	○	☐	☐	☐	●	○	☐	☐
Prozessfähigkeitsanalyse	●	○	○	●	○	○	●	○	●	○
Statistical Process Control	●	○	○	●	○	○	●	○	●	○
Vorliegende Arbeit	●	●	●	●	●	●	☐	☐	●	●

Bild 2.4: Analyse der industriell eingesetzten Methoden zur Produktionsplanung

Figure 2.4: Analysis of industrially used Methods for Production Planning

2.2.3 Mathematische Modelle und Methoden

2.2.3 Mathematical Models and Methods

In der Mathematik und Physik existieren generell einsetzbare Methoden zur Suche und Ermittlung eines Optimums. Es gilt zwischen Optimierungsverfahren und Simulationsalgorithmen zu unterscheiden. Die Optimierungsverfahren suchen lokale und globale Optima von Wirkzusammenhängen. Sie lassen sich in deterministische und probabilistische Verfahren unterteilen. Die Simulationen folgen physikalischen und naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten und berechnen anhand vorgegebener Eingangsgrößen den zu erwartenden Ausgangszustand.

Deterministische Optimierungsverfahren

Bei deterministischen Optimierungsverfahren werden Regeln formuliert, die eindeutig festlegen, welche Operationen beim Eintritt eines bestimmten Zustandes durchzuführen sind. Das bedeutet, dass durch die Definition von kausalen Zusammenhängen das Ergebnis eines entsprechenden Algorithmus für jeden zulässigen Ausgangspunkt exakt vorherbestimmt ist. Eine typische Anwendung der deterministischen Verfahren sind die so genannten Expertensysteme, welche festen Regeln folgen. Derartige Verfahren sind nur dann sinnvoll einsetzbar, wenn die bei der Implementierung des Modells getroffenen Annahmen für das vorliegende Problem gültig und fest definierbar sind. Anderenfalls sind keine brauchbaren Ergebnisse zu erwarten. Für das vorliegende Problem ist davon auszugehen, dass die Zielfunktion derart komplex ist, dass durch ein deterministisches Optimierungsverfahren keine sinnvollen Ergebnisse berechnet werden können [BRON05].

Probabilistische Optimierungsverfahren

Im Gegensatz zu den deterministischen Verfahren greifen die probabilistischen Optimierungsverfahren auf Zufallselemente zurück, um das globale Optimum zu lokalisieren. Das bedeutet, dass der Suchverlauf nicht eindeutig vorherbestimmt ist. Vielmehr können aufgrund der Zufallselemente unterschiedliche Wege eingeschlagen werden, weswegen sowohl die Qualität der ermittelten Optima als auch der hierfür erforderliche Aufwand trotz identischer Ausgangssituationen differieren kann. Das Ergebnis ist daher nicht reproduzierbar [BRON05].

Simulation der Fertigungsverkettung

Die Qualität und der Umfang von Prozesssimulationen steigen ständig. Mit zunehmenden Rechnerkapazitäten und –leistungen nimmt der Umfang der Simulationsmöglichkeiten zu. Sie ersetzen somit in zunehmendem Maße die konventionellen Methoden der Ergebniserzeugung, ohne diese jedoch überflüssig zu machen. Generell funktionieren alle Simulationssysteme gleich. Die Ausgangsgrößen werden anhand einer fest definierten Modellbildung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten und mathematischer Lösungsverfahren sowie zu definierender Eingangsgrößen berechnet. Prozessstreuungen können nicht betrachtet werden, da – wie bei den deterministischen Optimierungsverfahren – eine feste Zuordnung von Ein- und Ausgangsgrößen besteht. Weiterhin ist zurzeit nur ein begrenzter Umfang von Merkmalen der Fertigungsprozesse simulierbar (Bild 2.5). Die Simulation einer gesamten Fertigungsverkettung ist sogar ferne Zukunft [KLOC05].

	Gießen	Umformen	Drehen	Bohren	Fräsen	Schleifen	Härten	Schmelzschweißen
Geometrie	●	●	●	●	◐	●	◐	◐
Temperatur	●	●	◐	◐	○	●	◐	●
Reale Randbedingungen	◐	◐	●	◐	◐	○	◐	◐
Eigenspannungen	○	○	○	○	○	◐	◐	●
Verschleiß	○	○	○	○	○	○		○
Gefüge	◐	○	○	○	○	○	◐	○

Bild 2.5: Fortschritt exemplarischer Prozesssimulationen (nach [KLOC05])

Figure 2.5: Status of exemplary Process Simulations (according to [KLOC05])

Eine gezielte Anwendung einer mathematischen oder physikalischen Methode ist, resultierend aus den aufgeführten Analysen, nicht möglich. Vielmehr können ausgewählte Modelle für einzelne Aspekte des Konzeptes verwendet werden.

2.2.4 Kommerzielle Software

2.2.4 Commercially available Software

Die Entwicklungen der letzten Jahre im Bereich der EDV-Technik haben, aufgrund von zunehmender Leistung und Kapazität der Rechner, dazu geführt, dass innerhalb des Produktentstehungsprozesses eine steigende Digitalisierung von Planungs- und Entwicklungsvorgängen stattfindet. Die zugrunde liegenden Programme unterstützen den Ingenieur in vielfältiger Weise in nahezu allen Phasen des Produktlebenszyklus (*Bild 2.6*). Zudem hat sich der Einsatz von Software zur Produktionsplanung und zum Qualitätsmanagement in den letzten 10 Jahren nahezu verdrei- bis vervierfacht [SHEA06]. Neben den eingesetzten Methoden ist daher auch eine Analyse der aktuellen Software notwendig.

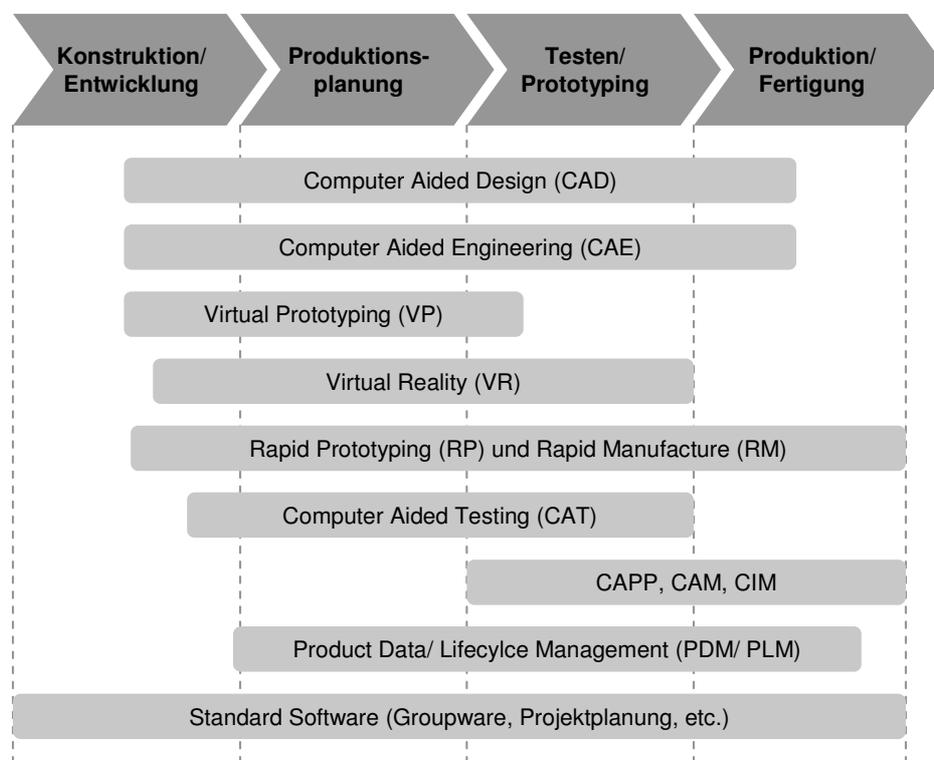


Bild 2.6: Softwareprodukte in der Produktentwicklung (nach [SHEA06])

Figure 2.6: Software within Product Development (according to [SHEA06])

Eine Analyse der existierenden Software erfolgt unter den Kriterien

- Funktionsumfang und durchführbare Planungstätigkeiten,
- Betrachtungsfokus (Anwendungsgebiet),
- Berücksichtigung von Fertigungsverkettungen,
- Betrachtung von Fertigungstoleranzen,
- Produktspezialisierung,
- Planung unter Unsicherheit und
- enthaltenes Planungswissen.

Der Markt für kommerzielle Software zur Unterstützung des Produktentstehungsprozesses teilt sich in zwei große Segmente. Zum einen gibt es vier bis fünf große Unternehmen, die umfassende Softwarelösungen anbieten, d.h. es sind mehrere der zuvor genannten Kriterien in einem Programmpaket vereint. Diese Produkte enthalten in der Regel mehrere Module, die den anwendungsspezifischen Anforderungen entsprechend kombiniert werden können. Zum anderen gibt es eine große Anzahl an kleinen Unternehmen, die nur einzelne bzw. wenige Funktionalitäten als Stand-Alone-Lösung anbieten. Die relevanten Softwarelösungen werden im Folgenden erläutert.

UGS – Technomatrix eM-Machining

Die Analyse der in eM-Machining enthaltenen Module zeigt, dass die Planung von Fertigungsverkettungen nur ansatzweise und unter rudimentärer Sichtweise unterstützt wird.

PTC – Pro/Engineer

Die Module Expert Modelbase, Production Machining und Computer-Aided Verification unterstützen den Fertigungsplaner bei der Werkzeugkonstruktion, der Erstellung von NC-Simulationen und Werkzeugberechnungen sowie bei der Erstellung von Prüfprogrammen, welche im Rahmen der Qualitätssicherung durchzuführen sind. Ansatzweise sind hier die Ableitung dieser Programme anhand von Form- und Lagetoleranzen enthalten. Im Rahmen der Fertigungskettenbetrachtung leistet die Software keinen Beitrag.

Dassault Systems – Delmia Process Engineer

Demlia Process Engineer bietet viele Funktionen mit dem Schwerpunkt auf einzelne Maschinen und Montagelinien. Das Programm liefert Unterstützung im Rahmen der Fabrikplanung bei der Planung des Layouts, der Optimierung des Materialflusses und der ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen. Ferner ist es möglich, Zeit- und Kostenanalysen durchzuführen. Der Fokus des Programms liegt im Wesentlichen in der Fabrikplanung. Toleranzbetrachtungen sind nicht Bestandteil der Software.

WZL RWTH Aachen – INNOTECH

Die innerhalb des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereiches 361 – Modelle und Methoden zur integrierten Produkt- und Prozessentwicklung erstellte Software INNOTECH ist für die Generierung von Technologieketten innerhalb der frühen Phasen der Produktentwicklung bestimmt. Anhand vereinfachter Produktdarstellungen werden alternative Fertigungsprozesse zu kompletten Technologieketten verknüpft. Eine Bewertung der Toleranzen und der Kosten erfolgt nicht. Die Software ist gut geeignet, um eine erste Technologiekette für eine Produktgrobplanung zu erzeugen. Ergänzt wird die Software durch die Programme BAFF und RATECH, welche eine Bewertung von Fertigungsfolgen und -technologien erlauben. Da der Fokus in den frühen Phasen der Produktentwicklung angesiedelt ist und die Datengrundlage entsprechend unscharf ist, ist eine

Nutzung innerhalb dieser Arbeit nur beschränkt möglich. Außerdem sind lediglich Teile der Software kommerziell erhältlich.

Autodesk

Der Hersteller Autodesk bietet verschiedene CAD-Lösungen an, die um zusätzliche Funktionen, insbesondere zur Wiederverwendung von Konstruktionen, und anderen PDM-Funktionen erweitert worden sind. Das Programm liefert in Hinsicht auf die Fertigungsplanung nur indirekt einen Mehrwert, indem es beim Projektmanagement durch die enthaltenen Workflow-Funktionen Hilfe leistet.

TEBIS

Tebis ist ein spezialisiertes Programm für den Werkzeugbau. Mit dessen Hilfe ist es möglich, Werkzeuge vom ersten Entwurf bis zur Fertigung komplett abzubilden. Durch die Integration verschiedener Datenbanken, kann dem Ingenieur bei wesentlichen Schritten geholfen werden. Fertigungsverkettungen finden keinerlei Betrachtung.

Automod

Automod erlaubt die Darstellung des kompletten Materialflusses von Fabriken in einer dreidimensionalen Umgebung. Insbesondere der Einbindung von verschiedenen Handhabungskonzepten ist viel Aufmerksamkeit gewidmet worden. Es handelt sich primär um eine Software zur Visualisierung und zur Senkung der Logistikkosten.

EasyCalc

Dieses Programm erlaubt die Kalkulation der Maschinenstundensätze. Bei der Berechnung der Bearbeitungszeiten wird nach den Richtlinien des Reichsausschusses für Arbeitszeitermittlung e.V. (REFA) vorgegangen. Diese Vorgehensweise setzt voraus, dass Erfahrungswerte für die Haupt-, Neben- und Rüstzeiten vorliegen. Da dies häufig nicht der Fall ist, ist dieses Programm nur begrenzt für den vorliegenden Anwendungsfall nutzbar.

Facton

Mit der Software Facton für entwicklungsbegleitende Produktkalkulationen im Bereich Cost Process Optimisation (CPO) werden technisches Verständnis und betriebswirtschaftliches Wissen zusammengeführt. Der Lösungsansatz der Software ermöglicht es, in beliebigen Stadien der Produktdefinition die genauen Auswirkungen des Produktansatzes (Struktur, Technologie, Werkstoffe, Maschinen, etc.) auf die Gesamtherstellkosten abzubilden. Die Software analysiert die Produktmodelle und ermittelt Machbarkeit, Kostentreiber sowie erwartete Herstellkosten. Allerdings werden nur Teilaspekte des Technologieplanungsprozesses unterstützt.

Die zugrunde liegenden Berechnungsmodelle sind zudem für den vorliegenden Anwendungsfall nicht detailliert genug. Zudem wird die technische Machbarkeit nicht überprüft.

GRANTA – CES Selectors

Das Werkstoff- und Verfahrensauswahltool CES Selectors bietet einige Funktionen von Interesse. So lässt sich über die umfassende integrierte Datenbank auf Werkstoffe und Fertigungsverfahren zugreifen. Bei der Auswahl der Werkstoffe und Verfahren verspricht das Programm eine auf die Funktion der Konstruktion bezogene Vorgehensweise. Da sich diese Funktion jedoch auf die Werkstoffauswahl konzentriert, ist eine Auswahl von geeigneten Fertigungsverfahren fraglich. Darüber hinaus ist die Betrachtung von Fertigungsverkettungen kein Bestandteil der Software.

DP Technology – Esprit

Esprit ist ein NC-Programmiersystem für die Verfahren Fräsen, Bohren, Drehen und Draht-erodieren. Das zusätzlich enthaltene Modul Esprit Knowledge Base hat zum Ziel, das im Laufe der Zeit anfallende Fertigungswissen über die besten Zerspanstrategien systematisch zu erfassen und für die Zukunft nutzbar zu machen. Da der Ansatz im Wesentlichen darauf beruht, auf bereits durchgeführte Bearbeitungen zurückzugreifen, ist jedoch davon auszugehen, dass ein sinnvoller Einsatz hauptsächlich bei Ähnlichkeitsprüfungen möglich ist. Eine Betrachtung von Fertigungsverkettungen wird nicht berücksichtigt.

EXAPT

Dieses Programm enthält verschiedene Module, die sich im Wesentlichen der NC-Planung und der Produktionsdatenorganisation zuweisen lassen. Der Funktionsumfang der NC-Planung ist mit dem oben beschriebenen Esprit von DP Technology vergleichbar. Im Bereich der Planung von Fertigungsverkettungen bietet dieses Programm keine Unterstützung.

Boothry Bewhurst Inc. – DFMA Concurrent Costing

Dieses Programm ist das bekannteste Unterstützungstool für die Produktentwicklung bzw. zur Unterstützung des Design for Manufacture DFM. In einem interaktiven Dialog zwischen Anwender und Programm werden die relevanten Produktdaten eingegeben. Aus diesen Daten ermittelt die Software mit Hilfe von Tabellen die vorgegebenen Zeitwerte für Fertigungsprozesse und Montageoperationen. Die Bewertung der Herstellkosten ist feature- und volumenbezogen. Fertigungsverkettungen sind nicht Bestandteil der Software.

CIM Aachen GmbH – CIMSource

Das Programm CIMSource ist in verschiedenen Programmumfängen und Funktionalitäten erhältlich. Im Wesentlichen handelt es sich um eine Software zur Verwaltung von fertigungs-

technologischem Wissen über Zerspanwerkzeuge. Basierend auf einem Katalog der Zerspanwerkzeughersteller stellt die Software eine Vielzahl von Anwendungsparametern für zerspanende Prozesse zur Verfügung. Der Katalog kann durch unternehmensspezifische Daten ergänzt werden. Der Fokus liegt auf der Betrachtung von Zerspanwerkzeugen. Fertigungsverkettungen und Toleranzen werden nicht berücksichtigt.

Grindaix GmbH – Grindaix IT

Die Software Grindaix IT umfasst mehrere Module zur Auslegung von Fertigungsprozessen, u.a. ein Modul zur Abschätzung der Fertigungskosten und zum Verwalten von Technologiewissen. Die generelle Struktur des Moduls APOS zur Verwaltung von Technologiewissen erlaubt eine Übertragung auf die spanende Fertigung mit geometrisch definierten Schneiden. Eine Betrachtung von Fertigungsverkettungen erfolgt nicht.

	Funktionsumfang	Betrachtungsfokus	Fertigungsverkettungen	Fertigungstoleranzen	Produktspezialisierung	Planungswissen	Planung unter Unsicherheit
Technomatrix eM-Machining	●	○	◐	○	●	○	◐
Pro/Engineer	◐	○	○	◐	●	○	○
Delmia Process Engineer	◐	○	◐	○	●	○	◐
INNOTECH	○	○	●	◐	◐	◐	●
Autodesk	○	○	○	○	●	◐	○
TEBIS	○	○	○	○	◐	○	○
Automod	○	○	◐	○	●	○	○
EasyCalc	◐	◐	○	○	●	◐	○
Facton	◐	◐	○	○	●	○	○
CES Selectors	○	◐	○	◐	◐	○	○
Esprit	◐	◐	○	◐	◐	●	○
Exapt	◐	◐	○	◐	◐	●	○
DFMA Concurrent Costing	◐	●	○	◐	◐	◐	○
CIMSource	◐	◐	○	◐	◐	◐	○
Grindaix IT	◐	◐	○	◐	○	●	○
Vorliegende Arbeit	●	●	●	●	◐	●	◐

Bild 2.7: Analyse der existierenden Softwarelösungen zur Produktionsplanung

Figure 2.7: Analysis of existing Software for Production Planning

Es kann festgestellt werden, dass es derzeit keine Software gibt, die den Fertigungsplaner bei der Auslegung von Fertigungsverkettungen und deren Tolerierung umfassend unterstützt. Den Anforderungen der optimalen Toleranz- und Kostenbestimmung wird bisher nicht nachgekommen. Ein Hauptkritikpunkt besteht darin, dass die existierenden Programme in der Regel für Änderungsplanungen ausgelegt sind. Eine Planung unter Unsicherheit ist nur mit wenigen existierenden Softwarelösungen möglich. Eine Übersicht der betrachteten Softwaretools und deren Bewertung hinsichtlich der zuvor genannten Kriterien zeigt *Bild 2.7*. Weiterhin stellt *Bild 2.7* die vorhandenen Programme mit dem innerhalb dieser Arbeit zu entwickelnden Methoden und des daraus resultierenden Software-Prototypen gegenüber.

2.3 Zwischenfazit

2.3 Intermediate Results

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass die gebräuchlichen Methoden bei der Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen an ihre Grenzen stoßen. Insbesondere, wenn eine Fertigungsverkettung hinsichtlich ihrer Schwachstellen, Fehlerursachen, Kostenfaktoren und Fertigungstoleranzen betrachtet werden soll. Eine Steigerung der Prozessstabilität und der damit verbundenen Freisetzung von Wirtschaftlichkeitspotentialen durch eine an den Anforderungen des Produktes ausgerichteten Auslegung von Fertigungsverkettungen kann keine existierende Methode nachkommen. Ebenso genügen die aktuell eingesetzten Softwarelösungen diesen Anforderungen nicht. Die allgemeinen Ansätze der Mathematik hingegen bergen zwar ein entsprechendes Potential, deren Applikation auf den vorliegenden Anwendungsfall ist allerdings nicht möglich. Größtenteils unberücksichtigt bleibt bei den existierenden Ansätzen die Planung unter Unsicherheit und die systematische Berücksichtigung von existierendem Planungswissen. Aufgrund der identifizierten Defizite lassen sich die Anforderungen und die exakte Zielsetzung eines Konzeptes zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen ableiten.

3 Zielsetzung und These

3 Objectives and Thesis

Die im vorherigen Kapitel durchgeführte vergleichende Bewertung existierender Ansätze ergab, dass die bisherigen Modelle, Methoden und Softwaretools nur einzelne Aspekte der Planung von fehlertoleranten und prozessstabilen Fertigungsverkettungen betrachten. Methoden zur gesamtheitlichen Betrachtung und Verknüpfung entlang der Fertigungshistorie unter dem Aspekt der kombinierten Toleranz-, Ausschuss- und Kostenoptimierung in der Produktplanungsphase sind bisher nicht vorhanden. Ebenso ist nicht nachgewiesen, dass eine solche durchgängige Planung möglich ist. Daraus folgt die **Hauptthese** dieser Arbeit:

Eine kostenoptimale und prozessstabile Auslegung von Fertigungstoleranzen entlang der Fertigungsverkettung kann auch noch nach Festlegung der Fertigungsparameter in der Produktentwicklungsphase unter Berücksichtigung von Erfahrungswissen erfolgen.

Hierzu müssen einige Randbedingungen erfüllt werden. Die in Kapitel 2 identifizierten Defizite existierender Modelle und Methoden sowie das in Kapitel 1 gezeigte Polylemma der Produktionstechnik müssen als Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Daraus leiten sich die Teilthesen dieser Arbeit ab:

- Teilthese 1:** Die Wechselwirkungen von Fertigungsprozessen und deren Parametern mit dem Produkt und der Losgröße sind bereits in der Planung quantitativ bewertbar (siehe u.a. *Bild 5.6*).
- Teilthese 2:** Die Bestimmung der zeitlichen Veränderung des Werkstücks unter Berücksichtigung von Prozessungenauigkeiten (Streuungen und Abweichungen) ist bereits in der Planung quantitativ möglich.
- Teilthese 3:** Mit Unsicherheit behaftetes Erfahrungswissen über Fertigungsprozesse kann zu einem reproduzierbaren, stabilen Ergebnis führen.
- Teilthese 4:** Es besteht eine quantifizierbare Korrelation zwischen Herstellkosten und Fertigungstoleranzen.
- Teilthese 5:** Die Fertigungstoleranzen lassen sich nach abgeschlossener Untersuchung und Planung der Fertigungsverkettung kostenoptimal festlegen.

Ziel dieser Arbeit ist es, diese Thesen für die zerspanenden Fertigungstechnologien nachzuweisen. Unter zerspanenden Fertigungstechnologien werden die Prozesse nach DIN 8580 der Gruppen 3.1, 3.2 und 3.3 [DIN8580] verstanden. Der Nachweis erfolgt durch die Entwicklung eines neuen methodischen Systems zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen. Das methodische System stellt einen modular aufgebauten Rahmen zur Integration neuer und existierender Methoden dar, der an unterschiedliche Anwender anpassbar ist. Dabei wird berücksichtigt, dass unterschiedliche Anwender (z.B. unterschiedliche Unternehmen) und unterschiedliche Herangehensweisen (z.B. Planung in Europa oder im asiatischen Raum) zu ein und demselben reproduzierbaren Ergebnis führen. Dies ist nicht durch die Bereitstellung einer in Ihrer Durchführung fest vorgeschriebenen Methode sondern durch die individuelle Berücksichtigung von Erfahrungswissen möglich. Voraussetzung für den Nachweis der Thesen sind reproduzierbare und stabile Ergebnisse der Methode. Die Qua-

lität des individuellen Erfahrungswissens kann sich stark unterscheiden und somit zu einer Verfälschung des Ergebnisses führen. Dies wird in dem zu entwickelnden methodischen System berücksichtigt und es erfolgt eine Kompensierung von Ergebnisabweichungen durch fehlerbehaftetes Erfahrungswissen.

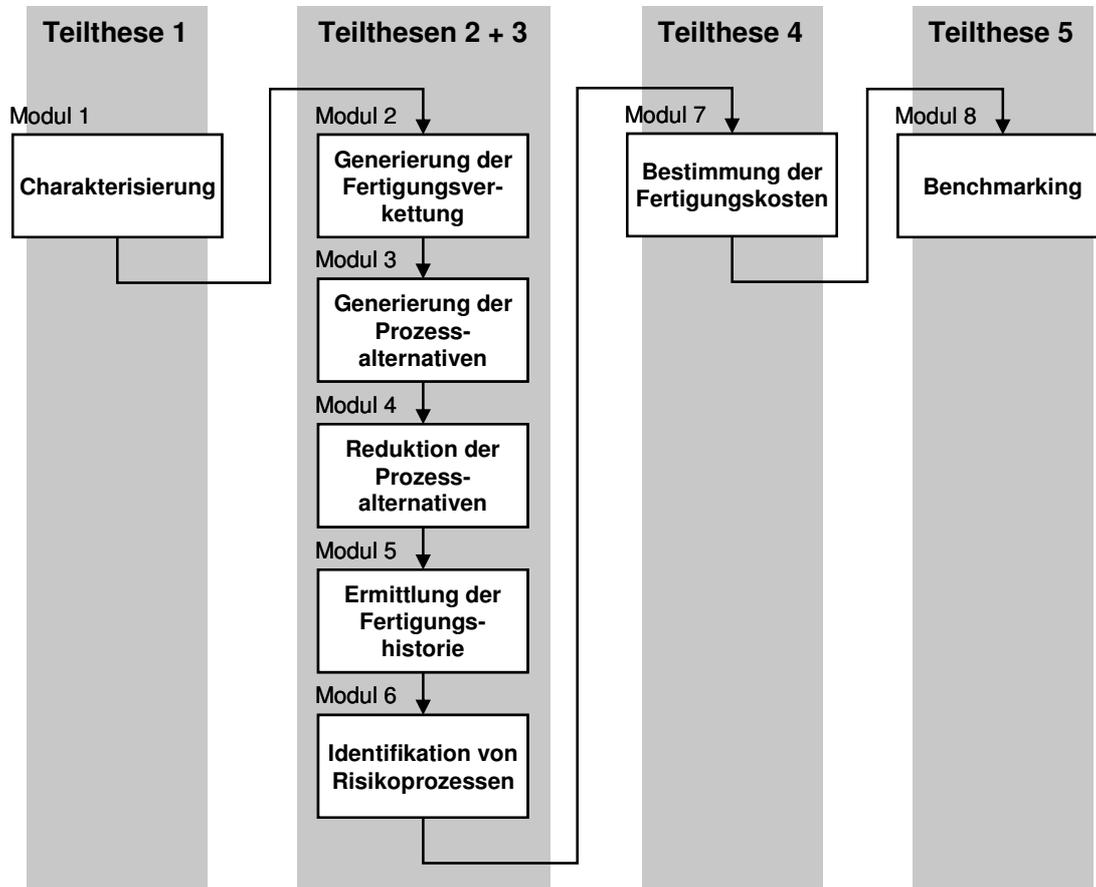


Bild 3.1: Struktur des Rahmensystems

Figure 3.1: Structure of the System Framework

Zuerst wird ein neues Modell entwickelt, das anhand gegebener Produkthanforderungen entsprechende Werkstückmerkmale definiert und deren Wechselwirkungen untereinander quantitativ erfasst. Die Wechselwirkungen bilden die Grundlage, um im Folgenden anhand der gegebenen Fertigungsverkettung die Fertigungshistorie zu bestimmen. Es muss zwischen Prozesswirkungen (Einfluss des Prozesses auf das Bauteil) und Eigenschaftswirkungen (Einfluss der Bauteileigenschaften auf den Prozess) unterschieden werden. Ersteres wird durch die Beschreibung des Prozesseinflusses auf die Werkstückmerkmale berücksichtigt. Letzteres wird durch eine vollständige Abbildung der Fertigungshistorie erreicht. Die Erforschung neuer Modelle zur Fertigungsprozessbeschreibung, die Nutzung existierender Modelle und die Integration von Erfahrungswissen erlauben eine vollständige Abbildung der Fertigungshistorie, d.h. der Prozess- und Eigenschaftswirkungen und deren direkte sowie indirekte Einflüsse auf die Produkthanforderungen. Zur Bestimmung von kosten- und technologisch-optimalen Toleranzen und zur Vermeidung von „Angsttoleranzen“ ist es abschließend notwendig, ein neues Bewertungsmodell zu entwickeln, um alternative Fertigungsverkettungen vergleichen zu kön-

nen und ein Optimum unter den Alternativen zu identifizieren. Die entwickelten Module und die Korrelation mit den nachzuweisenden Teilthesen zeigt *Bild 3.1*.

Eine detaillierte Übersicht über das Rahmensystem gibt das nachfolgende Kapitel. In den einzelnen Modulen wird, wo vorhanden, auf existierende Methoden zurückgegriffen. Fehlende und nicht integrierbare Methoden werden neu entwickelt bzw. überarbeitet, angepasst und anwendbar gemacht. Der Anspruch der vorliegenden Arbeit besteht nicht in der Neuentwicklung von einzelnen Methoden sondern in der erstmaligen Bereitstellung eines neuen Rahmensystems zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen. Verbesserte und detailliertere Einzelmethoden können zu einer Berechnung genauerer Ergebnisse führen. Sie haben jedoch keinen Einfluss auf die Funktionsweise und Auslegung des Rahmensystems. Das Rahmensystem ist so ausgelegt, dass eine Integration zukünftiger, verbesserter Methoden möglich ist.

4 Struktur der Methode

4 Structure of the Method

In Kapitel 2 wurde der Stand der Erkenntnisse bezüglich der Planung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen diskutiert. Darauf aufbauend werden nun Anforderungen an das zu entwickelnde Rahmensystem ermittelt und ein Konzept für die Umsetzung des Systems erstellt.

Allgemeingültig betrachtet, benötigt das zu entwickelnde Rahmensystem Informationen sowohl aus der Konstruktion als auch der Fertigungsplanung. Ebenso müssen die bauteilbezogenen Tätigkeiten aus diesen beiden Bereichen eng miteinander verknüpft werden, um die Synergieeffekte aus beiden Bereichen nutzbar zu machen. Daraus ergeben sich die folgenden Anforderungen an die Entwicklungen innerhalb dieser Arbeit.

Um sowohl die Konstruktion und die Fertigungsplanung in die Anwendung des zu entwickelnden Rahmensystems zur Planung von Fertigungsverkettungen einzubinden, muss das System eng in die Konstruktions- und Fertigungsplanungsphase integriert werden. Hierzu muss eine regelmäßige Ausgabe von Zwischenergebnissen zur Abstimmung der Tätigkeiten aus Konstruktion und Fertigung aufeinander erfolgen. Die enge Verknüpfung von Konstruktion und Fertigungsplanung kann während der Planungsdurchführung zu Änderungen in der Produktkonstruktion führen. Deswegen ist eine Möglichkeit zum jederzeitigen Abbruch und Wiederaufnahme des Systemdurchlaufs erforderlich. Bisher im industriellen Einsatz vorhandene Methoden fokussieren stark auf eine subjektive Bewertung der Fertigungsalternativen durch den Anwender (siehe Kapitel 2.2). Eine optimale Alternativenselektion ist somit nicht möglich, sondern vielmehr vollständig personenbezogen. Das innerhalb dieser Arbeit zu entwickelnde Rahmensystem zur Planung von Fertigungsverkettungen muss daher eine objektive Bewertung der alternativen Fertigungsmöglichkeiten anhand der durch die Konstruktion vorgegebenen Qualitätsanforderungen beinhalten. Dies ermöglicht den Einsatz des Systems durch unterschiedliche Anwender mit differenzierenden Erfahrungsqualitäten und Herangehensweisen (z.B. Einsatz in europäischen oder asiatischen Unternehmen), ohne das Ergebnis signifikant zu beeinflussen.

Die wichtigste Bewertungsgröße in der industriellen Praxis sind die Herstellkosten, welche auch die indirekten Kosten enthalten (*Bild 5.25*). Deren quantitative Erfassung ist daher zwingend erforderlich. Weiterhin scheitern bisherige Methoden der industriellen Praxis und der Forschung (siehe Kapitel 2.2) häufig in der Anwendung, da die Durchführung zu aufwendig oder undurchschaubar ist. Der Anwendungsaufwand des zu entwickelnden Systems muss daher auf ein praktikables Maß beschränkt werden.

Ein gesamtheitlich fest definierter Methodenansatz ist nicht auf einzelne Teilaspekte anwendbar, sondern lediglich auf den gesamten Ablauf und erfüllt somit nicht alle vorher genannten Anforderungen. Weiterhin ist ein gesamtheitlicher Methodenansatz zu unflexibel, um auf unterschiedliche Anwenderbedürfnisse und -fähigkeiten (z.B. Ausbildungsstand, Unternehmensrandbedingungen etc.) reagieren zu können. Innerhalb dieser Arbeit wurde deshalb ein modularer Konzeptaufbau entwickelt, der flexibel auf unterschiedliche Anforderungen ange-

passt werden kann (*Bild 4.1*). Der Anwender kann somit je nach Bedarf auf diejenigen Module zurückgreifen, welche ihm eine konkrete Hilfestellung geben und ist nicht gezwungen den gesamten Methodendurchlauf durchzuführen.

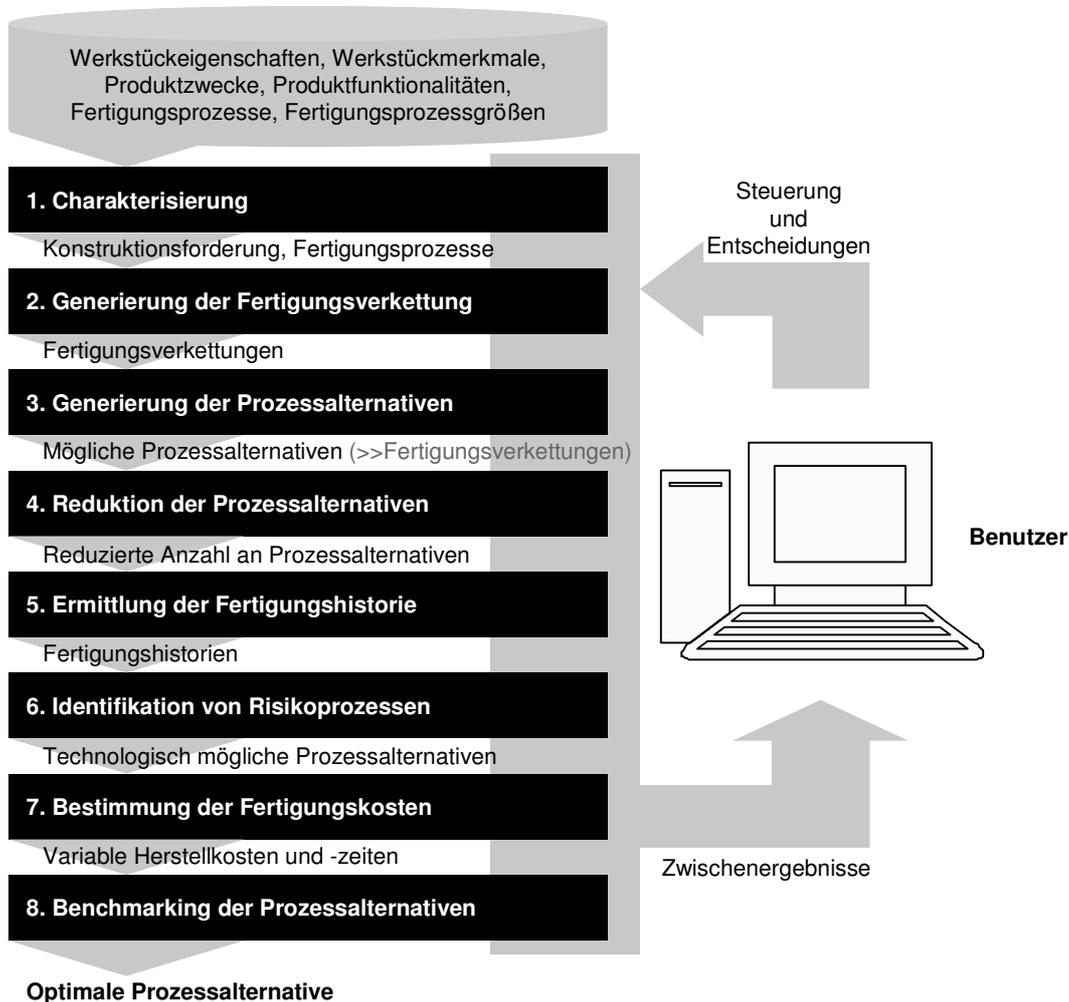


Bild 4.1: Modulare Darstellung des Konzepts zur Auslegung von fehlertoleranten und prozessstabilen Fertigungsverkettungen

Figure 4.1: Modular Description of the Methodology for the Design of fault-tolerant and robust Manufacturing Process Chains

Das Konzept dieser Arbeit basiert auf insgesamt acht Einzelmodulen, welche je nach Anwendungsszenario einzeln oder nacheinander durchlaufen werden können:

- *Modul 1 – Charakterisierung des Produktes und der Fertigungsprozesse* (Kapitel 5.1): Dieses Modul beinhaltet die Untersuchung und Verknüpfung der Fertigungsprozesse mit den herzustellenden Produkthanforderungen. Sie bildet die Grundlage für alle folgenden Arbeitsschritte.
- *Modul 2 – Generierung der Fertigungsverkettung* (Kapitel 5.2): Anhand bisheriger Methoden zur Auslegung von Technologieketten und Fertigungsfolgen werden gezielt Fertigungsverkettungen generiert. Die Generierung erfolgt anhand von unscharfen

Zielvorgaben aus der Konstruktion und Basisinformationen über die eingesetzten Fertigungsprozesse.

- *Modul 3 – Generierung der Prozessalternativen* (Kapitel 5.3): Aufbauend auf den Fertigungsverkettungen werden nun Prozessalternativen erzeugt. Diese unterscheiden sich von der Fertigungsverkettung durch eine weitaus detailliertere Beschreibung der Fertigungsprozesse (z.B. Schnittwertparameter, Stellgrößen, Werkzeuge, Betriebsmittel etc.). Der Großteil der Fertigungsprozesse hat keine festen, sondern variable Stellgrößen (z.B. Wertebereich der Schnittgeschwindigkeit v_c), deren Variation unterschiedliche Einflüsse auf das Werkstück, die erzeugbaren Fertigungstoleranzen, die entstehenden Herstellkosten und den erzeugten Ausschuss haben. Innerhalb dieses Moduls werden daher anhand statistischer Modelle mögliche Variationen der Prozesse bestimmt und entsprechend Prozessalternativen erzeugt. Diese beinhalten alle die gleichen Fertigungsprozesse, welche sich jedoch in ihren Prozessparametern unterscheiden. Insbesondere wird die gegenseitige Beeinflussung der Fertigungsprozesse entlang der Fertigungsverkettung berücksichtigt.
- *Modul 4 – Reduktion der Prozessalternativen* (Kapitel 5.4): Die Anzahl der in Modul 3 erzeugten Prozessalternativen kann je nach Länge und Komplexität der Fertigungsverkettung sehr groß werden. Unter Umständen ist die Untersuchung aller Alternativen unter zeitlichen Gesichtspunkten daher nicht möglich. Dementsprechend werden in diesem Modul die Prozessalternativen anhand der statistischen Versuchsplanung analysiert und die notwendige Anzahl der zu untersuchenden Prozessalternativen anhand eines Grenzwertalgorithmus auf ein handhabbares Maß reduziert.
- *Modul 5 – Ermitteln der Fertigungshistorie* (Kapitel 5.5): Die Fertigungshistorie der einzelnen verbleibenden Prozessalternativen wird nun erzeugt. D.h. der Einfluss der Fertigungsprozesse und ihrer Stellgrößen auf das Werkstückergebnis wird ermittelt. Dies kann durch Erfahrungswissen, praktische Untersuchungen oder Simulationen erfolgen. Das Modul bietet Schnittstellen für alle drei Fälle. Eine offene Schnittstelle sorgt für die Möglichkeit eine Wissensdatenbank anzuknüpfen, und erzeugtes Wissen dauerhaft zu speichern und für weitere Anwendungsfälle zu nutzen.
- *Modul 6 – Identifikation von Risikoprozessen* (Kapitel 5.6): Einige Fertigungsprozesse werden aufgrund der gewählten Stellgrößen oder des vorhandenen Werkstückeingangsstatus nicht stabil laufen oder eine zu große Toleranzstreuung aufweisen. Diese Prozesse werden innerhalb dieses Moduls identifiziert und eliminiert.
- *Modul 7 – Bestimmung der Fertigungskosten* (Kapitel 5.7): Anhand der vorliegenden Ergebnisse werden die Fertigungskosten und der zu erwartende Ausschuss bestimmt. Die Toleranzen entlang der Fertigungsverkettung werden hierbei als Variablen angenommen. Für die verbleibenden Prozessalternativen können die Toleranzen auf diese Weise unter kostenoptimalen Gesichtspunkten bestimmt werden.
- *Modul 8 – Benchmarking der Prozessalternativen* (Kapitel 5.8): Abschließend erfolgt ein Benchmarking der verbleibenden Prozessalternativen. Die Bewertungskriterien sind die Herstellkosten, die Herstellzeiten und der jeweils zu erwartende Ausschuss. Der Benutzer hat an dieser Stelle die Möglichkeit, die optimale Prozessalternative auszuwählen.

In dieser Arbeit wird ein neues Rahmensystem zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen entwickelt. Innerhalb der einzelnen Module wird, wo möglich, auf existierende Methoden zurückgegriffen. Der Einsatz von existierenden Methoden beeinflusst zwar die Qualität des durch das System berechneten Ergebnisses, auf die Entwicklung des eigentlichen Rahmensystems hat dies jedoch keinen Einfluss. Durch die offenen Schnittstellen des Rahmensystems lassen sich zukünftige, verbesserte Einzelmethoden integrieren und somit die Ergebnisqualität steigern. Für die Bewertung des neuen Rahmensystems reicht die zur Zeit erzielbare Ergebnisqualität jedoch aus. Ebenso wird in den Modulen, sofern keine geeigneten Modelle vorhanden sind, auf Erfahrungswissen zurückgegriffen. Das neu entwickelte Rahmensystem kann die damit verbundenen Datenunsicherheiten kompensieren und trotzdem ein stabiles Ergebnis berechnen. Zukünftige Modelle können in das System integriert werden und somit kann schrittweise die Einbindung von Erfahrungswissen minimiert werden.

Im Gegensatz zu existierenden Methoden ergeben sich bei der Vorgehensweise dieser Arbeit eine Vielzahl von Neuerungen. Hervorzuheben ist die erstmalige Anwendbarkeit eines Rahmensystems zur Auslegung von kostenoptimalen und fehlertoleranten Fertigungsverkettungen durch verschiedene Benutzer und deren Einbringung von subjektivem Wissen ohne die signifikante Beeinträchtigung der Ergebnisqualität. Verschiedene Benutzer erhalten für den gleichen Anwendungsfall das gleiche optimale Ergebnis. Weiterhin erfolgt zum ersten Mal die Erweiterung der Generierung von Technologieketten um konkrete Prozessparameter, die Berücksichtigung von Prozessungenauigkeiten bei der Auslegung von Fertigungsverkettungen, die quantitative Nutzung von Erfahrungswissen für die Toleranzbestimmung, die Anbindung der Auslegung von Fertigungsverkettungen an eine Wissensdatenbank und die Bestimmung der Herstellkosten ohne Vorgabe von Toleranzen.

Im Folgenden werden die einzelnen Module und deren Funktionsweisen sowie die zugehörigen entwickelten Methoden detailliert erläutert. Weiterhin erfolgt die Überprüfung der in Kapitel 3 aufgeführten Thesen.

5 Methodenbasiertes System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen

5 Methodology based System for the Design of cost-optimal and stable Process Chains

5.1 Modul 1 - Charakterisierung des Produktes und der Fertigungsprozesse

5.1 Module 1 - Product-Characterisation and Manufacturing Processes

Grundlage für die Bewertung einer Fertigungsverkettung – nicht nur in Bezugnahme auf Fehlertoleranz und Stabilität – ist die Erfüllung der geforderten Produktzwecke und -funktionalitäten. Es gilt demnach als Erstes ein Modell zu entwickeln, welches die Produktzwecke und die durch die Fertigung erzeugten Werkstückmerkmale korreliert und eine spätere Bewertung der Fertigungsverkettung ermöglicht (Bild 5.1). Dies kann nur durch einen quantitativen Zusammenhang zwischen Planung der Fertigungsprozesse und der Produktentwicklung erfolgen, welcher bisher nicht umgesetzt ist. Dies wird durch das Modul „Charakterisierung“ realisiert.

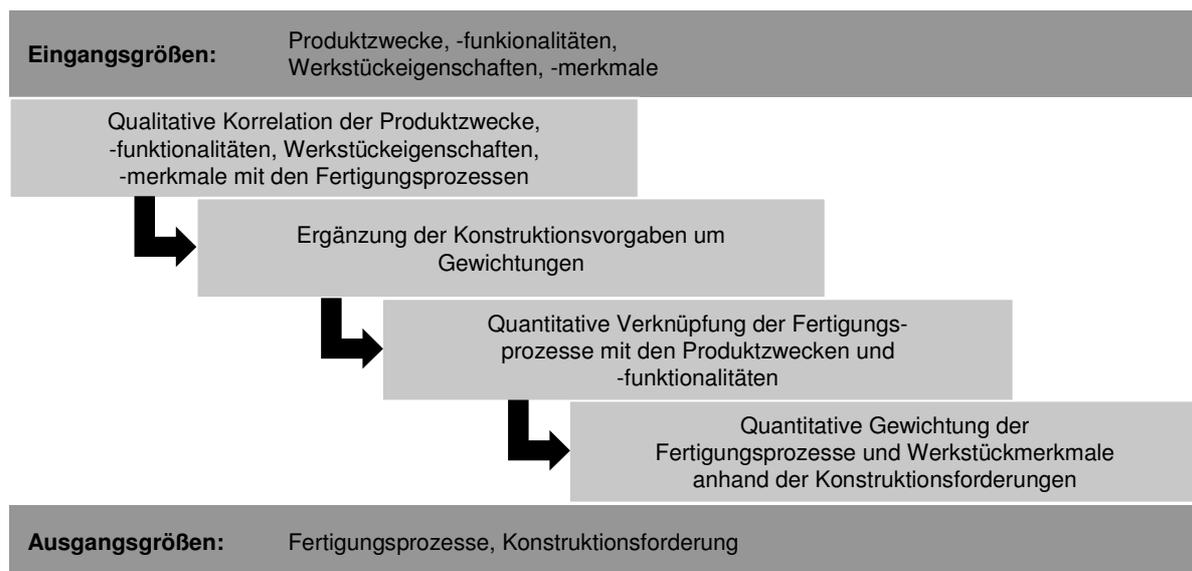


Bild 5.1: Ablaufdiagramm des Moduls „Charakterisierung des Produktes und der Fertigungsprozesse“

Figure 5.1: Description of Module „Product-Characterisation and Manufacturing Processes“

Bestimmte Werkstückmerkmale haben einen größeren Einfluss auf die Erfüllung der Produktzwecke als andere. Die Wirkungszusammenhänge zwischen Produktzwecken und Werkstückmerkmalen betreffen sowohl die Produktkonstruktion als auch die Fertigung. Innerhalb dieses Kapitels werden zunächst diese Wirkungszusammenhänge und Wechselwirkungen abgeleitet. Darauf aufbauend wird ein neues Gewichtungsmodell entwickelt, welches eine explizite und quantitative Bewertung des Einflusses bestimmter Fertigungsprozesse auf die

Konstruktionsforderungen erlaubt.

Jedes technische Produkt besteht aus einem oder mehreren Bauteilen und dient einem oder mehreren bestimmten Zwecken. In dieser Arbeit wird unter Zweck (in Anlehnung an [KOLL98]) eine Beschreibung verstanden, die angibt, was mit dem zu entwickelnden Produkt erreicht werden soll, ohne dass dabei die Zahl der möglichen Lösungen zur Erfüllung dieses Zweckes in irgendeiner Weise eingeschränkt wird. Die Zweckbeschreibung sagt im Allgemeinen nur etwas über das mit dem technischen Produkt zu erreichende Ergebnis aus; sie sagt nichts darüber aus, wie dieses Ergebnis erreicht werden soll [KOLL98]. Letztendlich wird das zu entwickelnde Produkt durch den Zweck, den es zu erfüllen hat, und die gesamten an ein Produkt zu stellenden Bedingungen bestimmt. Es gilt:

$$\text{Produkt} = f(\text{Zweck}, g_1 B_1, g_2 B_2 \dots g_n B_n) \in L_T \quad \text{Gleichung 5.1}$$

Mit B_1 bis B_n werden bestimmte Bedingungen bezeichnet, mit g_1 bis g_n zugeordnete Gewichtungsfaktoren. Für das Rahmensystem zur Auslegung von Fertigungsverkettungen werden die Bedingungen an technische Produkte in die folgenden Bereiche eingeteilt:

- marktbedingte,
- umwelt- und gesellschaftsbedingte,
- entstehungs- und lebensbedingte sowie durch
- Eigenstörungen bedingte Forderungen.

Eine Übersicht der Forderungen ist in *Bild 5.2* dargestellt.

Damit das Produkt seinen Zweck erfüllen kann, muss dieses bestimmte Funktionalitäten aufweisen. Die Funktionalitäten berücksichtigen die gegebenen Bedingungen $B_1 \dots B_n$ und verknüpfen diese unmittelbar mit den Produktzwecken. Ein Kraftfahrzeug dient beispielsweise dem Zweck, Personen und Sachen zu transportieren. Die Antriebswelle des Kraftfahrzeuges muss hierzu das erzeugte Drehmoment vom Antriebsstrang auf das Rad übertragen. Eine Funktionalität der Welle ist somit die Drehmomentübertragung. Aufgabe der Konstruktion ist es, die an ein Produkt gestellten Zweckforderungen in entsprechende Bauteile, Funktionalitäten und Merkmale umzusetzen. Innerhalb dieser Arbeit werden diese Konstruktionstätigkeiten (in Anlehnung an [KOLL98]) in die in *Bild 5.3* gezeigten Phasen eingeteilt.

Die Konstruktionsprozesse bestehen aus Funktionsstruktur-, Prinzip-, Gestalt- und Maßsynthese. Jeder Syntheseschritt erzeugt einen höheren Konkretisierungsgrad der Produktkonstruktion und ist stets mit den Produktbedingungen zu überprüfen. In den letzten beiden Syntheseschritten werden die Merkmale festgelegt. Der Fertigungsplaner wählt geeignete Fertigungsprozesse zu deren Erzeugung aus. Hieraus ergeben sich wiederum Verbesserungen und Ergänzungen der Konstruktion aufgrund von Restriktionen aus der Fertigung oder Produktbedingungen, z.B. ein kostengünstiges Produkt herzustellen.

Aus produktionstechnischer Sichtweise, beeinflussen Fertigungsprozesse nur in den seltensten Fällen das gesamte Bauteil. Vielmehr wirken Prozesse jeweils nur auf Bereiche des Bauteils

oder einzelne Merkmale. Eine Ermittlung des Prozesseinflusses auf konkrete Funktionalitäten ist demnach nicht unmittelbar möglich.

Marktbedingte Forderungen		Umwelt- und gesellschaftsbedingte Forderungen	Entstehungs- und werdegangsbedingte Forderungen	Durch Eigenstörungen bedingte Forderungen
Gebrauch	Kosten, Preis			
Zweck(e)	Entwicklungskosten	Einwirkungen der Umwelt auf technische Systeme Einwirkungen technischer Systeme auf die Umwelt Betriebssicherheit Arbeitssicherheit Umweltsicherheit Gesetze Normen Vorschriften Personalressourcen Energieressourcen Werkstoffressourcen Schutzrechte u.a.	Entwicklungsgerecht Fertigungsgerecht Montagegerecht Prüfgerecht Lager- und Transportgerecht Vertriebsgerecht Gebrauchsgerecht Wartungsgerecht Reparaturgerecht Recyclinggerecht Beseitigungsgerecht u.a.	Störursachen reduzieren oder vermeiden Reibung Verschleiß Eigenspannungen Ermüdung Alterung Korrosion Wärmeausdehnung Wärmeleitung Kriechen Relaxation Aufladung Eigenschwingungen Resonanzen u.a.
Fähigkeiten	Fertigungs- und Werkstoffkosten			
Leistung	Montagekosten			
Kraft	Prüfkosten			
Geschwindigkeit	Lager- und Transportkosten			
Drehzahl	Preis			
Weg, Hub	Betriebskosten			
Durchsatz	Wartungskosten			
Bit/sec.	Reparaturkosten			
Systemzugehörigkeit	Recyclingkosten			
Gewicht, zul.	Beseitigungskosten			
Baugröße, zul.	u.a.			
Zuverlässigkeit				
Lebensdauer				
Wartungsabstände				
Design				
u.a.				

Bild 5.2: Forderungen bei der Produktkonstruktion (in Anlehnung an [KOLL98])

Figure 5.2: Restriction for the Design of Products (according to [KOLL98])

Es ist daher zunächst erforderlich, die Wirkzusammenhänge der Funktionalitäten auf das Bauteil modellhaft und strukturiert abzubilden. Das Bauteil wird aus einzelnen Features aufgebaut. Das Feature selbst wird über Featuremerkmale genauer beschreiben. Featuremerkmale sind nicht nur von geometrischer Natur, sondern beschreiben auch werkstoffkundliche, physikalische und chemische Eigenschaften des Feature:

- geometrische Featuremerkmale, wie z. B.
 - Längen- und Winkelmaße, Radien etc.
 - Form-, Lage- und Maßtoleranzen
 - geometrische Lage des Features im Bauteil
 - Tiefe/Breite-Verhältnis
 - etc.
- technologische Featuremerkmale, wie z. B.
 - Oberflächenhärte
 - Rauigkeit
 - Farbe
 - Wärmebehandlungszustand
 - etc.

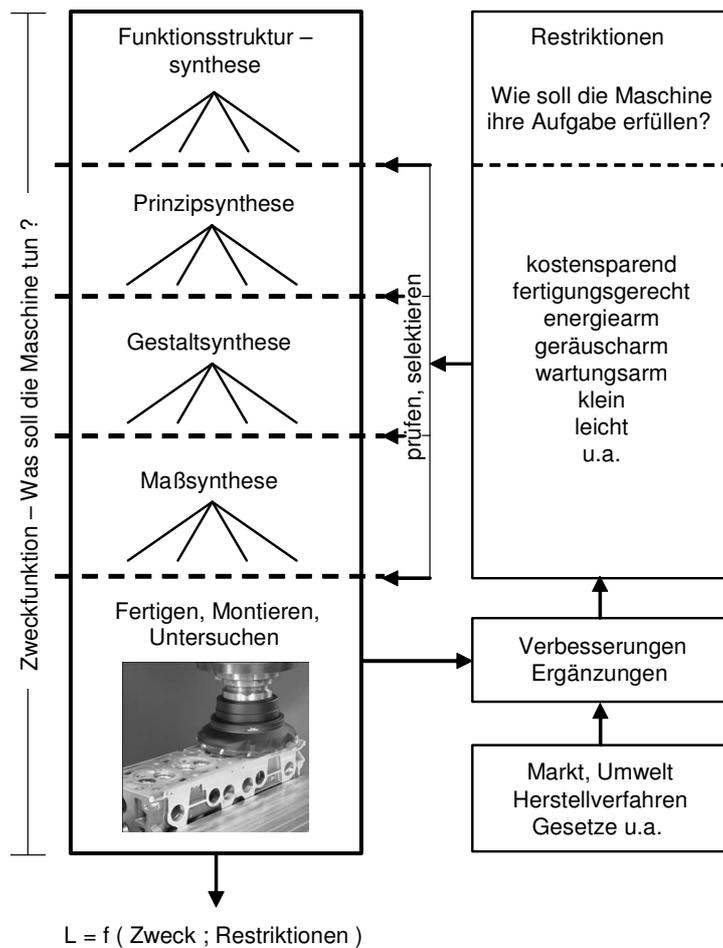


Bild 5.3: Konstruktionstätigkeiten und Zwischenergebnisse (in Anlehnung an [KOLL98])

Figure 5.3: Design Activities and intermediate Results (according to [KOLL98])

Die Summe aller Featuremerkmale eines Bauteils beschreibt die Bauteileigenschaften. Die Bauteileigenschaften werden unmittelbar durch die Fertigungsschritte erzeugt. Die Bauteilfunktionalitäten beschreiben die Wirkung der Bauteileigenschaften auf die Funktion des Bauteils im Einsatz (z. B. Rundlauf einer Welle, Durchbiegung eines Balkens etc.). Es bestehen somit unmittelbare Zusammenhänge zwischen Bauteileigenschaften und Bauteilfunktionalitäten, welche die modellhafte Beschreibung von Bauteilfunktionalitäten anhand von Bauteileigenschaften in dieser Arbeit erlauben.

Die vorangegangenen Überlegungen zeigen, dass sich die konstruktions- und fertigungstechnische Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Produkt, Produktzwecken, Produktfunktionalitäten, Eigenschaften und Merkmalen zu der in dieser Arbeit entwickelten Wirkungskette zusammenfassen lassen (Bild 5.4):



Bild 5.4: Verknüpfung von konstruktiver und fertigungstechnischer Betrachtung

Figure 5.4: Combination of Design- and Manufacturing-related Perception

Innerhalb des Rahmensystems beschreibt der *Zweck* das Resultat, welches mit dem Produkt durchgeführt werden soll. Die *Funktionalität* legt die Funktion eines Produktes zur Erfüllung des Produktzwecks fest. Die Funktionalitäten werden wiederum durch die *Eigenschaften* eines Bauteils erzeugt. Diese werden durch die *Merkmale* eines Werkstückes sichergestellt. Der *Fertigungsprozess* erzeugt dann letztendlich die Merkmale. Bei der Produktkonstruktion und Fertigungsplanung werden auf diese Weise eine Vielzahl von Wirkungsketten gebildet, beispielsweise (Bild 5.5):

Beispiel: Automobil

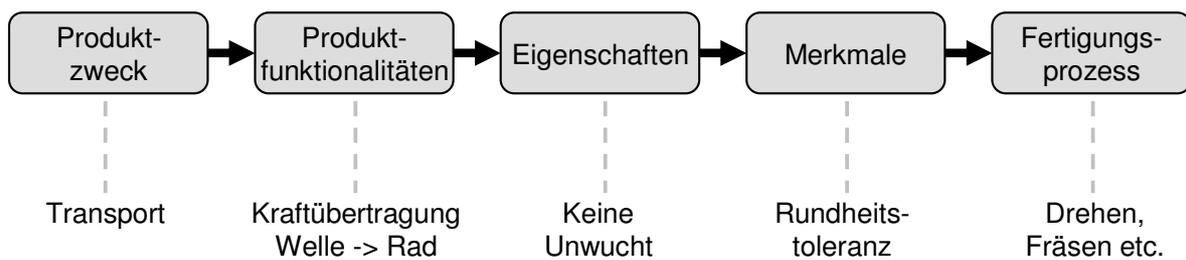


Bild 5.5: Beispielartige Wirkungskette am Beispiel „Automobil“

Figure 5.5: Exemplary Interdependency Chain „Automobile“

Mit Hilfe dieser Wirkungsketten werden die Einflüsse des Fertigungsprozesses auf die Funktionalitäten und die Produktzwecke beschrieben. Es ist zu beachten, dass den verschiedenen Funktionalitäten und Produktzwecken unterschiedliche Bedeutungen zukommen. Dies wird in den bisherigen Ansätzen nicht berücksichtigt. Erstmalig wird deshalb ein neues Basisgewichtungsmodell entwickelt, welches bestimmten Eigenschaften und Merkmalen unterschiedliche Bedeutungen zuweist. Die Zusammenhänge lassen sich unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gewichtungen beschreiben (Bild 5.6).

Das Produkt muss eine bestimmte Anzahl von Produktzwecken $PZ_1 \dots PZ_a$ erfüllen. Ein Produktzweck wird durch mehrere Produktfunktionalitäten $PF_1 \dots PF_b$ und deren Erfüllung definiert. Der Einfluss der einzelnen Produktfunktionalitäten auf einen Produktzweck weist unterschiedliche Gewichtungen $g_{PF_1 \dots PF_b}$ auf. Genauso werden durch die unterschiedlichen Erfüllungsgrade der Werkstückeigenschaften $E_1 \dots E_c$ die Produktfunktionalitäten festgelegt. Der Erfüllungsgrad ist eine quantifizierte Kennzahl, die angibt, in wie weit die Fertigung einer Eigenschaft erfüllt wird. Bestimmten Eigenschaften werden ebenso verschiedene Gewichtun-

gen $g_{E1} \dots g_{Ec}$ beigemessen. Eine endgültige Definition der Eigenschaften erfolgt durch die Merkmale $M_1 \dots M_m$. Alle Merkmale weisen die gleiche Gewichtung auf, da die Erfüllung eines Merkmales die zwingende Voraussetzung für die Erfüllung der zugehörigen Eigenschaft ist. Die Verknüpfung der Merkmale mit den Fertigungsprozessen ist weitaus komplexer und kann durch empirische und mathematische Zusammenhänge beschrieben werden. Dies wird in Kapitel 5.5 näher erläutert.

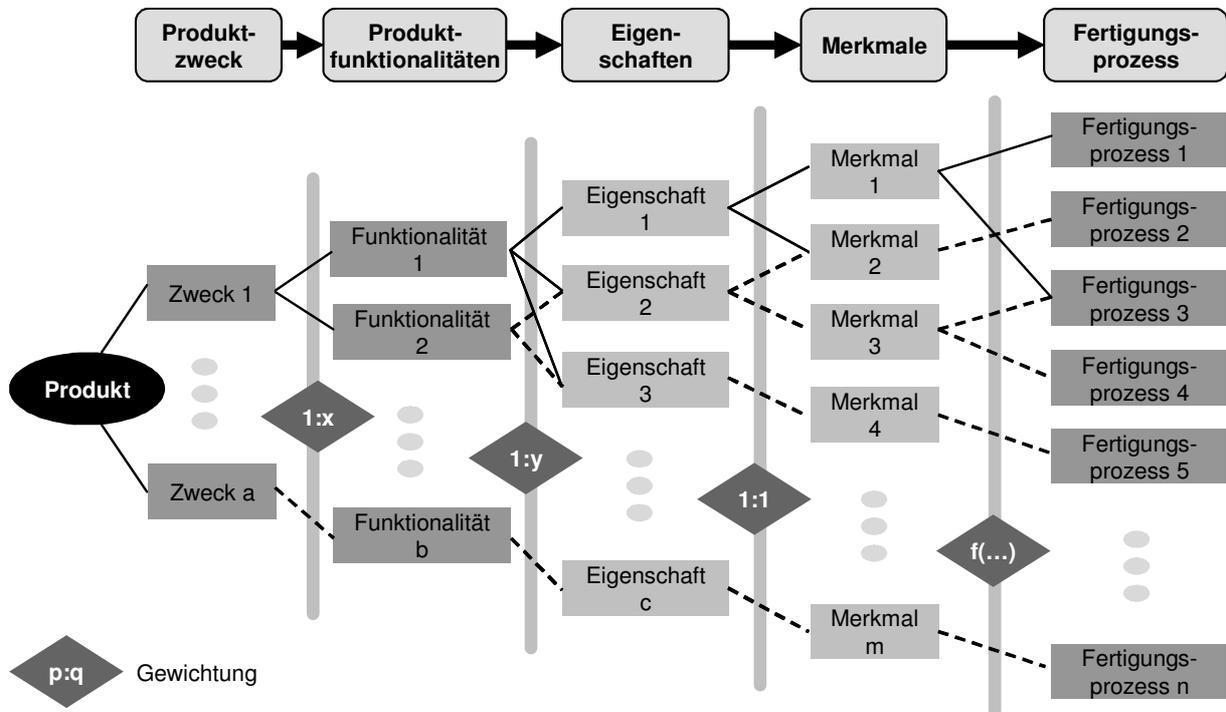


Bild 5.6: Gewichtungmodell zur reversiven Bewertung der Fertigungsprozesse anhand der zu erfüllenden Produktzwecke

Figure 5.6: Weighting Model for the reverse Evaluation of Manufacturing Processes based on the Fulfillment of the Product Objectives

Die Zusammenhänge innerhalb der Wirkungskette werden wie folgt formell ausgedrückt:

$$PZ_{1..a} = f(g_{PF1} * PF_1; g_{PF2} * PF_2 \dots g_{PFb} * PF_b) \quad (\text{Produktzwecke}) \quad \text{Gleichung 5.2}$$

$$PF_{1..b} = f(g_{E1} * E_1; g_{E2} * E_2 \dots g_{Ec} * E_c) \quad (\text{Produktfunktionalitäten}) \quad \text{Gleichung 5.3}$$

$$E_{1..c} = f(M_1; M_2 \dots M_m) \quad (\text{Eigenschaften}) \quad \text{Gleichung 5.4}$$

$$M_{1..m} = f(FP_1 \dots FP_n) \quad (\text{Merkmale}) \quad \text{Gleichung 5.5}$$

Die unterschiedlichen Einflussgewichtungen der einzelnen Größen werden durch die Gewichtungsfaktoren $g_{PF,E}$ beschrieben. Die Zusammenhänge der Wirkungskette zwischen Fertigungsprozess und Produkt werden somit mathematisch durch Gleichungen und Gewichtungsfaktoren beschrieben. Die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren erfolgt während der Konstruktion durch den Konstrukteur und Fertigungsplaner. Dies erlaubt die Ableitung einer

Kennzahl zur Beschreibung der Wichtigkeit eines bestimmten Merkmals und zur quantitativen Bestimmung des Einflusses bestimmter Fertigungsprozesse auf die Produktzwecke. Für eine Bewertung von Fertigungsverkettungen in Bezug auf Fehlertoleranz, Stabilität und Kosten ist dies zwingend erforderlich. Die Realisierung der Zusammenhänge nach Bild 5.6 erfolgt für das Rahmensystem in Form einer Baumstruktur (Bild 5.7).

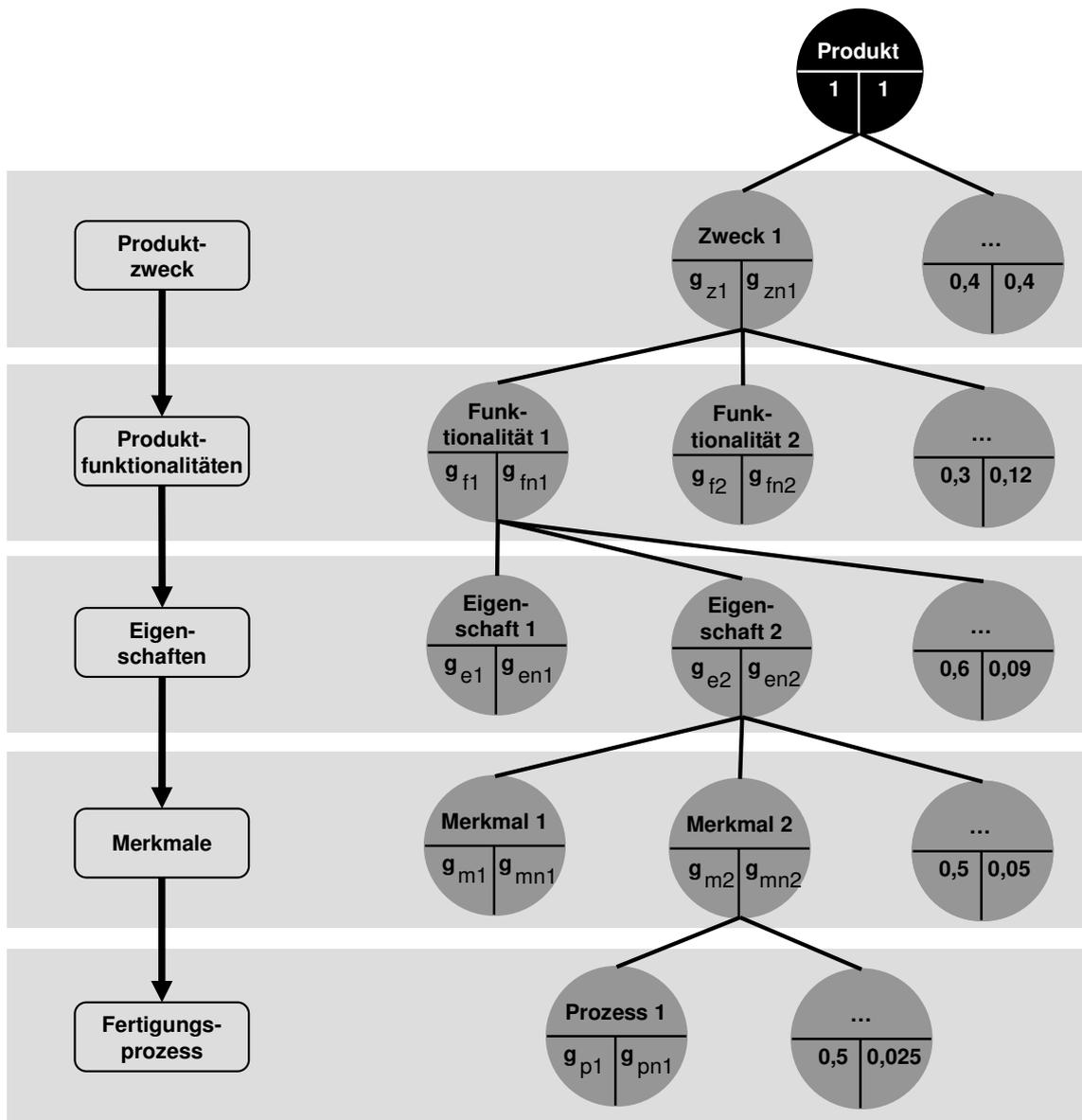


Bild 5.7: Einflussgewichtung der Fertigungsprozesse

Figure 5.7: Manufacturing Process Weighting of Influence

Die Wichtigkeit eines jeden einzelnen Elementes wird durch zwei verschiedene Gewichtungsfaktoren ausgedrückt, das so genannte Verknüpfungsgewicht g_x und das Stufengewicht g_{xn} . Das Verknüpfungsgewicht gibt die Wichtigkeit der Elemente in Bezug auf die nächst höhere Stufe an. Das Stufengewicht gibt die absolute Wichtigkeit bezogen auf das Produkt wider und errechnet sich anhand der einzelnen Verknüpfungsgewichtungen. Bei der Berechnung der Gewichte ist zu beachten, dass einzelne Elemente Einfluss auf mehrere Elemente der nächst

höheren Stufe besitzen können und dass neben einer objektiven Gewichtung der Elemente auch eine subjektive Gewichtung, z.B. des Konstrukteurs, einbezogen werden muss.

Bei der Bewertung der Eigenschaften und Funktionalitäten liegen subjektive Gewichtungen vor. Sie werden durch den Konstrukteur vorgegeben und normiert. Die restlichen Gewichtungsfaktoren ergeben sich durch eine gleichmäßige Wichtigkeitsverteilung auf die vorhandenen Elemente. Diese Vorgehensweise erlaubt die separate quantitative Erfassung der gegenseitigen Beeinflussung der Elemente untereinander und die Bestimmung der Wichtigkeit jedes einzelnen Elementes auf das finale Produktergebnis. Die Summe der einzelnen Gewichtungen g_i je Element ergibt zudem immer den Wert 1 bzw. 100 %.

Für die verschiedenen Stufen der Wirkungskette ergeben sich folgende Berechnungsgrundlagen:

$$g_{p,i,j} = \frac{1}{i} \quad (\text{Gewichtungsfaktoren Prozess}) \quad \text{Gleichung 5.6}$$

$$g_{m,j,k} = \frac{1}{j} \quad (\text{Gewichtungsfaktoren Merkmal}) \quad \text{Gleichung 576}$$

$$g_{e,k,l} = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{k} + g_{e,\text{subjektiv},l} \right) \quad (\text{Gewichtungsfaktoren Eigenschaft}) \quad \text{Gleichung 5.8}$$

$$g_{f,l,m} = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{l} + g_{f,\text{subjektiv},m} \right) \quad (\text{Gewichtungsfaktoren Funktionalität}) \quad \text{Gleichung 5.9}$$

$$g_{z,m} = g_{zn,m} = \frac{1}{m} \quad (\text{Gewichtungsfaktoren Zweck}) \quad \text{Gleichung 5.10}$$

$$g_{pn,n} = \frac{\sum (g_{p,\bar{n}} * g_{mn,\bar{n}})}{\bar{n}} \quad (\text{normierte Gewichtungsfaktoren Prozess}) \quad \text{Gleichung 5.11}$$

$$g_{mn,o} = \frac{\sum (g_{m,\bar{o}} * g_{en,\bar{o}})}{\bar{o}} \quad (\text{normierte Gewichtungsfaktoren Merkmal}) \quad \text{Gleichung 5.12}$$

$$g_{en,p} = \frac{\sum (g_{e,\bar{p}} * g_{fn,\bar{p}})}{\bar{p}} \quad (\text{norm. Gewichtungsfaktoren Eigenschaft}) \quad \text{Gleichung 5.13}$$

$$g_{fn,q} = \frac{\sum (g_{f,\bar{q}} * g_{zn,\bar{q}})}{\bar{q}} \quad (\text{norm. Gewichtungsfaktoren Funktionalität}) \quad \text{Gleichung 5.14}$$

Hierbei ist i die Anzahl der beeinflussenden Fertigungsprozesse für Merkmal j, j die Anzahl der beeinflussenden Merkmale für Eigenschaft k, k die Anzahl der beeinflussenden Eigenschaften für Funktionalität l, l die Anzahl der beeinflussenden Funktionalitäten für Produktzweck m, m die Anzahl der Produktzwecke, n die Anzahl der Fertigungsprozesse, o Anzahl der Merkmale, p die Anzahl der Eigenschaften, q die Anzahl der Funktionalitäten, \bar{n} die An-

zahl der durch den Fertigungsprozesse beeinflussten Merkmale, \bar{o} die Anzahl der durch das Merkmal beeinflussten Eigenschaften, \bar{p} die Anzahl der durch die Eigenschaft beeinflussten Funktionalitäten und \bar{q} die Anzahl der durch die Funktionalität beeinflussten Produktzwecke.

Die Stufengewichtungen werden aus den Summen der einzelnen, innerhalb der Wirkungskette vorhandenen Verknüpfungsgewichten berechnet. Für die Stufengewichtung $g_{pn,n}$ der einzelnen Fertigungsprozesse, also den Einfluss der Fertigungsprozesse auf das Produkt, gilt demnach:

$$g_{pn,n} = \frac{1}{n} \sum_i \frac{1}{i} \frac{1}{\bar{o}} \sum_j \left[\frac{1}{j} \frac{1}{\bar{p}} \sum_l \left(\frac{1}{2} \left(\frac{1}{k} + g_{e,subjektiv,\bar{p}} \right) \frac{1}{\bar{q}} * \sum \left[g_{zn,\bar{q}} \left(\frac{1}{2l} + \frac{g_{f,subjektiv,\bar{q}}}{2} \right) \right] \right) \right] \tag{Gleichung 5.15}$$

Die Stufengewichtungen $g_{pn,n}$ ergeben sich durch Einsetzen der vorherigen Formelansätze in Gleichung 5.15.

Die Definition der Gewichtungen erfolgt im Rahmensystem, bis auf die Stufengewichtungen, subjektiv anhand der Vorgaben des Benutzers. Es gilt demnach zunächst zu überprüfen, auf welche Weise Fehler, die durch die subjektive Festlegung erfolgen, Einfluss auf das Endergebnis nehmen. Dies erfolgt durch eine Sensitivitätsanalyse. Die Analyse untersucht zum einen die Variation einzelner Gewichtungsfaktoren und deren Einfluss auf das resultierende Ergebnis. Zum anderen werden unterschiedliche Anzahlen an Fertigungstechnologien und Merkmalen berücksichtigt. Es gilt, je höher die Anzahl der Fertigungstechnologien und Merkmale ist, desto mehr Gewichtungsfaktoren werden benötigt und desto geringer ist der Einfluss eines einzelnen Fehlers. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird bei der Sensitivitätsanalyse mit einer konstanten Anzahl an Eigenschaften und Funktionalitäten in Höhe von jeweils zwei gerechnet. Eine höhere Anzahl würde die Anzahl an Gewichtungsfaktoren erhöhen und somit den Fehlereinfluss verringern. Auf diese Weise kann der „Worst-Case“ für verschiedene Anzahlen von Fertigungstechnologien untersucht werden. *Bild 5.8* zeigt den maximalen resultierenden Gesamtfehler des Gewichtungmodells bei einer vollständig fehlerhaften Eingangsgröße. Variiert wurden die Anzahl der betrachteten Fertigungstechnologien und die Anzahl der Werkstückmerkmale je Fertigungstechnologie.

Bei der Sensitivitätsanalyse wurden zur Darstellung des „Worst-Case“ nur eine geringe Anzahl an Eigenschaften und Funktionalitäten betrachtet. In der praktischen Anwendung sind diese Anzahlen erheblich größer, was zu einem – im Vergleich zu *Bild 5.8* – deutlich reduzierten Fehlereinfluss führt.

Es zeigt sich, dass das Bewertungsmodell erst ab einer höheren Anzahl an Fertigungstechnologien (>3) und Merkmalen (>3) sicher Fehlereinflüsse kompensieren kann. Erst unter diesen Bedingungen können Eingabefehler wirkungsvoll kompensiert werden und eine stabiles Endergebnis gewährleistet werden. Dies deckt sich mit dem anvisierten Einsatzbereich des Rahmensystems, nämlich der Betrachtung von komplexen Fertigungssystemen. Diese weisen typischerweise eine hohe Anzahl an Bauteilmerkmalen und lange Fertigungsverkettungen auf.

Bei geringeren Komplexitäten ist ein methodenbasiertes Rahmensystem nicht zwingenderweise erforderlich, da der Benutzer die Wirkzusammenhänge noch manuell überschauen kann. Der Einfluss von Eingabefeldern auf das Endergebnis bei der Festlegung der Gewichtungsfaktoren ist somit im anvisierten Einsatzbereich des Rahmensystems minimal.

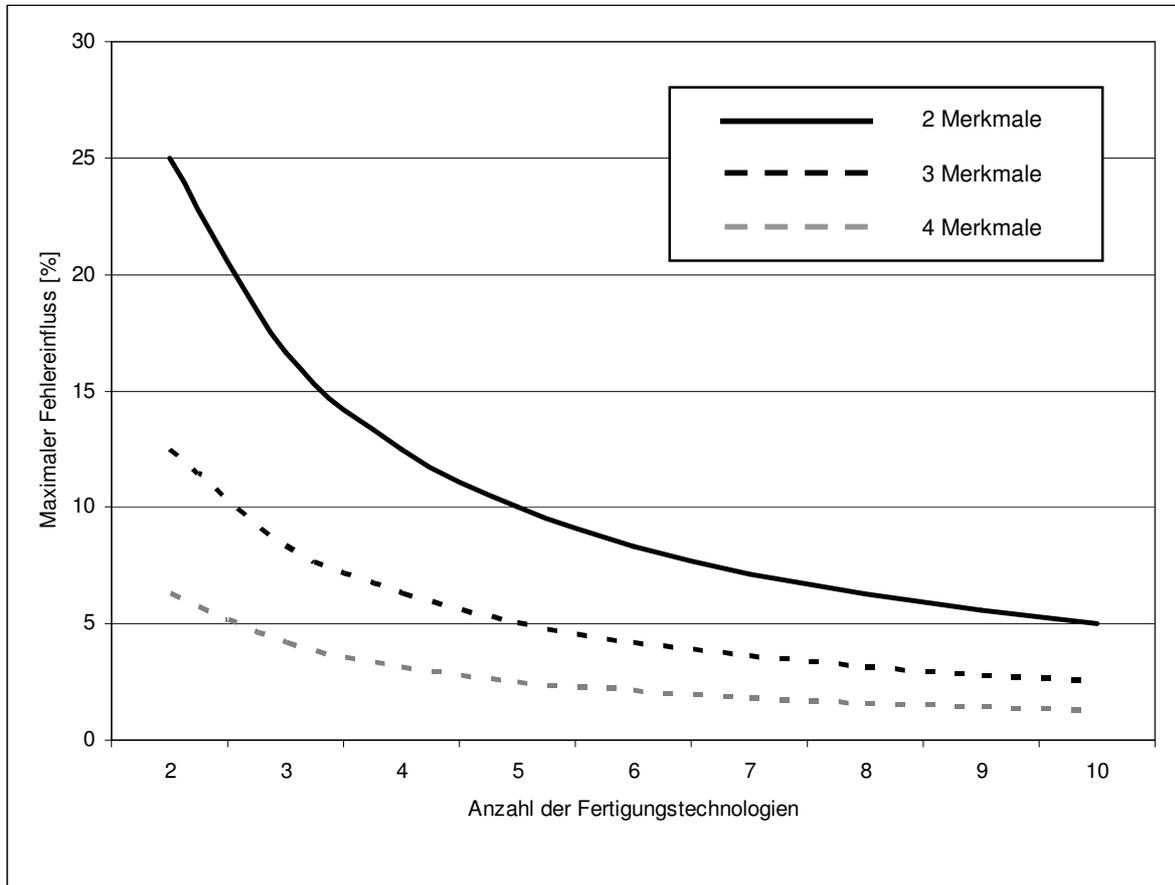


Bild 5.8: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse („Worst Case“)

Figure 5.8: Results of Sensitivity Analysis („Worst Case“)

Die vorherigen Entwicklungen und Überlegungen zeigen, dass ein quantitativer und gleichzeitig methodischer Zusammenhang zwischen den Fertigungsprozessen und dem Produktergebnis realisierbar ist. Die Teilthese 1 ist somit nachgewiesen.

5.2 Modul 2 - Generierung der Fertigungsverkettung

5.2 Module 2 - Generation of Manufacturing Process Chain

Nach der Korrelation der zu produzierenden Werkstückmerkmale mit den einzusetzenden Fertigungsprozessen ist es innerhalb des Rahmensystems notwendig, diese in eine fertigungstechnologisch sinnvolle Reihenfolge zu setzen und hierdurch eine Fertigungsverkettung zur Erzeugung des Werkstückes zu generieren (Bild 5.9). Dies erfolgt nach den Methoden von Fallböhrer [FALL00] und Trommer [TROM01].

Das Modul „Generierung der Fertigungsverkettung“ wird neben den Modulen „Generierung der Prozessalternativen“, „Reduktion der Prozessalternativen“, „Ermittlung der Fertigungshistorie“ und „Identifikation von Risikoprozessen“ zum Nachweis der Teilthese 2 und Teilthese 3 (siehe Kapitel 3) herangezogen.

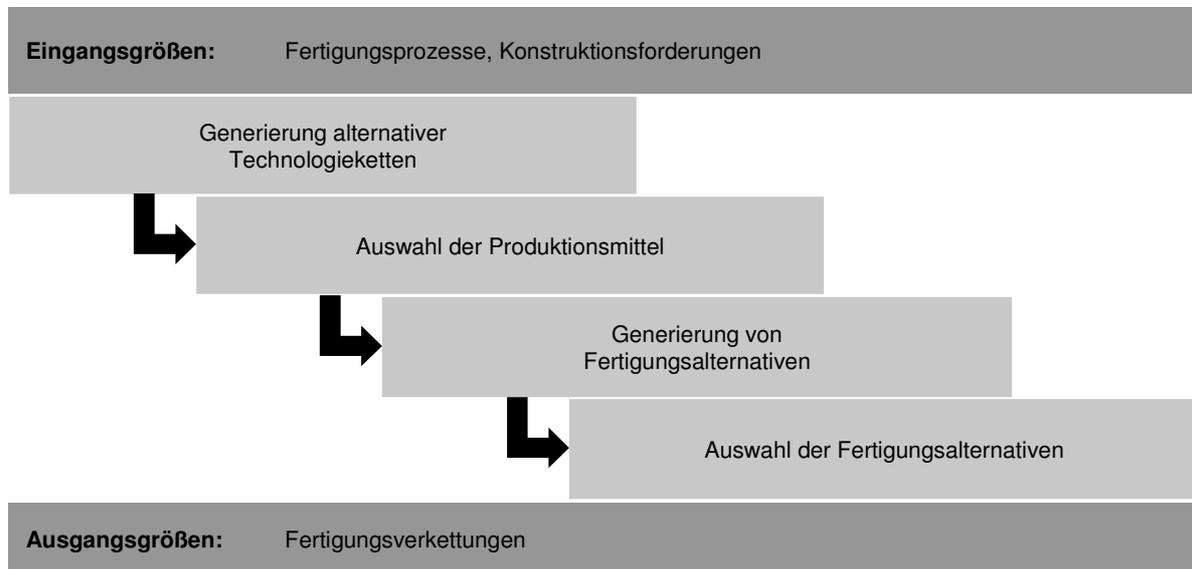


Bild 5.9: Ablaufdiagramm des Moduls „Generierung der Fertigungsverkettung“

Figure 5.9: Description of Module „Generation of Manufacturing Process Chain“

Beide Methoden sind für den Einsatz in den frühen Phasen der Produktentwicklung gedacht. Eine Nutzung in späteren Phasen ist jedoch ebenso möglich. Hierbei unterscheidet sich lediglich der Informationsreifeegrad der zugrunde liegenden Datensätze, also die Qualität der verfügbaren Informationen.

Für das Rahmensystem zur Auslegung von Fertigungsverkettungen werden die Arbeiten nach Fallböher und Trommer auf die folgenden Module reduziert:

- Generierung alternativer Technologieketten
- Produktionsmittelauswahl
- Generierung von Fertigungsalternativen
- Fertigungsalternativenauswahl

Zunächst werden aufbauend auf den in Kapitel 5.1 identifizierten Werkstückmerkmalen mehrere alternative Technologieketten generiert. Diese beinhalten die möglichen, einsetzbaren Fertigungstechnologien. Um eine Fertigung des Produktes zu realisieren, werden den Fertigungstechnologien geeignete Produktionsmittel zugewiesen und alternative Fertigungsalternativen generiert. Abschließend werden durch den Fertigungsplaner die geeignetsten Fertigungsalternativen ausgewählt. Eine detaillierte Beschreibung der Module, ihrer Funktionsweise und der methodischen Führung des Benutzers kann in den Arbeiten von Fallböher [FALL00] und Trommer [TROM01] nachgelesen werden. Als Datengrundlage werden die Datenbanken von Fallböher und Trommer herangezogen. Zukünftige Methoden können

alternativ für die Methoden nach Fallböhrer und Trommer in das Rahmensystem integriert werden.

5.3 Modul 3 - Generierung der Prozessalternativen

5.3 Module 3 - Generation of Process Alternatives

Als Ergebnis der Generierung der Fertigungsverkettungen liegen eine oder mehrere Fertigungsverkettungen vor. Diese Fertigungsverkettungen haben gemeinsam, dass ihre Elemente bzw. ihre Fertigungstechnologien identisch sind. Dies wird durch die Methode nach Fallböhrer [FALL00] sichergestellt. Die Fertigungsverkettungen unterscheiden sich lediglich durch die Anordnung der Fertigungstechnologien innerhalb der Fertigungsverkettung. Die bisher generierten Werkstückzwischenzustände weisen noch einen sehr groben Detaillierungsgrad auf und erlauben keine konkrete Aufstellung der Fertigungshistorie des Werkstückes. Für eine Bewertung der alternativen Fertigungsverkettungen, im Besonderen unter ökonomischen Aspekten, ist die detaillierte Analyse der Fertigungshistorie jedoch zwingend erforderlich.

Die Berechnung der Einflüsse der Fertigungstechnologien auf das Werkstück erfolgt durch Entwicklung einer Schnittstelle zu einer Wissensdatenbank (Kapitel 5.5). Diese erlaubt die Ankopplung existierender und zukünftiger Prozessmodelle zur Ermittlung des Fertigungstechnologieverhaltens. Diese erzeugen die für das Rahmensystem benötigten Technologieinformationen. Das im Folgenden beschriebene Basismodul zur Generierung aller möglichen Prozessalternativen ist für die Nutzung dieser Informationen ausgelegt. Eine flexible Anpassung des gesamten Rahmensystems auf individuelle Bedürfnisse des Benutzers und die zukünftige Erweiterbarkeit sind somit gewährleistet.

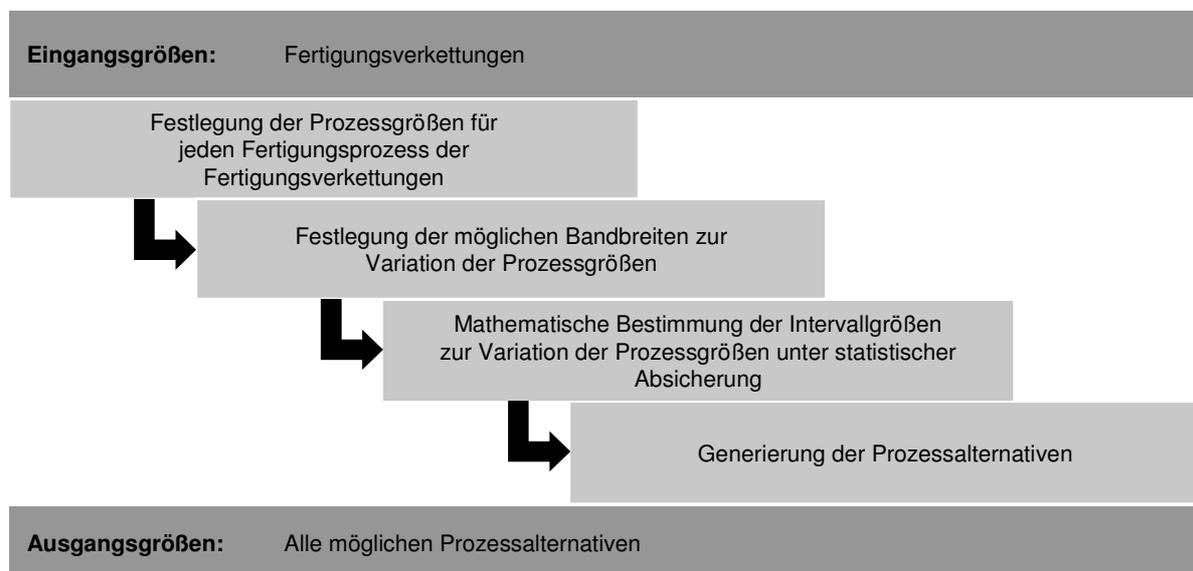


Bild 5.10: Ablaufdiagramm des Moduls „Generierung der Prozessalternativen“

Figure 5.10: Description of the Module „Generation of Process Alternatives“

Jede Fertigungstechnologie innerhalb der Fertigungsverkettung hat diverse Einstell- und Störgrößen, wie beispielsweise eine veränderliche Schnittgeschwindigkeit v_c oder eine variable Kühlschmierstoffzufuhr (siehe Kapitel 5.3.2). Diese variablen Größen führen dazu, dass ein und dieselben Fertigungsverkettungen auf verschiedene Art und Weise durchgeführt werden können. Diese Variationen derselben Fertigungsverkettung werden im Folgenden **Prozessalternativen** genannt. Die folgenden Erläuterungen zeigen die Vorgehensweise zur Aufstellung der Prozessalternativen für die später folgenden Analyse- und Bewertungsmethoden. Zunächst wird die Vorgehensweise für eine Fertigungsverkettung geschildert. Liegen mehrere alternative Fertigungsverkettungen vor, so ist die Methode für jede Fertigungsverkettung einzeln zu durchlaufen.

In dieser Arbeit erfolgt die Entwicklung eines Basismodells zur Generierung aller möglichen Prozessalternativen unter statistischer Absicherung bei Variation der Prozessstellgrößen (*Bild 5.10*). Das Basismodell weist im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen eine geringe Komplexität auf, die der praktischen Handhabung zu Gute kommt ohne negativ die Qualität des Endergebnisses zu beeinflussen. Für die methodische Vorgehensweise des Rahmensystems zur Auslegung von Fertigungsverkettungen reicht diese geringe Komplexität aus. Detailliertere Modelle können an das Rahmensystem angekoppelt werden, führen allerdings zu keiner Verbesserung der Ergebnisse.

5.3.1 Generierung der fertigungstechnologischen Prozessalternativen

5.3.1 Generation of Manufacturing Process Alternatives

In dieser Arbeit wird unter jeder Fertigungsverkettung ein System verstanden. Das Wort System steht für Konnektivität. Damit ist jede Ansammlung miteinander in Beziehung stehender Teile gemeint, welche nach außen betrachtet ein Ganzes bilden. Systeme bestehen demnach aus Elementen, wobei damit die Bausteine des Systems gemeint sind. Elemente können ihrerseits wieder als Systeme betrachtet werden. Die Elemente sind untereinander durch Beziehungen verbunden. Es kann sich um Materialflussbeziehungen, Informationsflussbeziehungen, Lagebeziehungen, Wirkzusammenhänge etc. handeln. Reflektiert man diese Aussagen des Systems Engineering (siehe [HABE02]) auf die Betrachtung von Fertigungsverkettungen, so stellt die Fertigungsverkettung das eigentliche System dar, die Fertigungsprozesse bilden die Elemente des Systems und die Wirkzusammenhänge der Fertigungsprozesse bzw. des Werkstückflusses sind die Systembeziehungen.

Als Systemgrenze wird für das Rahmensystem zur Auslegung von Fertigungsverkettungen der Werkstückfluss vom Rohteil zum fertigen Werkstück definiert. Das System, also die Fertigungsverkettung, tritt mit ihrer Umgebung über Stör- und Stellgrößen in Beziehung. Die Fertigungsprozesse, als Elemente des Systems, sind tiefer betrachtet ebenso einzelne Systeme (*Bild 5.11*) - die Untersysteme.

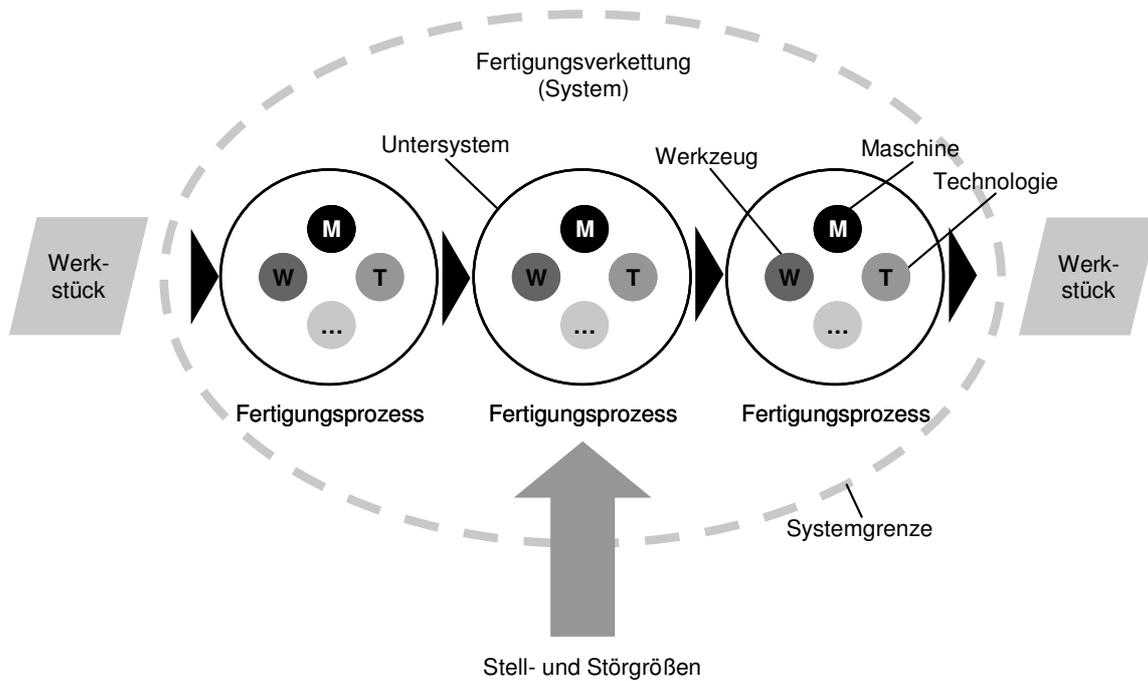


Bild 5.11: Systemgrenzen von Fertigungsverkettungen für das Rahmensystem

Figure 5.11: System borders of Process Chains within the Framework System

Die Wirkzusammenhänge der einzelnen Untersysteme (Werkstoff, Fertigungstechnologie, Maschine etc.) werden bei der Ermittlung der Fertigungshistorie in Kapitel 5.5 näher betrachtet. Für die weiteren Betrachtungen innerhalb des Rahmensystems werden diese Untersysteme als variable Verknüpfungssysteme angenommen (Bild 5.12). Es interessiert lediglich die Funktion sowie die vorhandenen Eingänge und Ausgänge – in diesem Fall die Werkstückzustände, Werkzeugdaten etc. – bzw. Ergebnisse [HABE02]. Dies dient zur gezielten Definition der Schnittstellen des Rahmensystems mit vorhandenen und zukünftigen Modellen und zur Festlegung eines standardisierten Systemablaufs.

Der wesentliche Vorteil der zuvor beschreibenden Betrachtungsweisen besteht darin, durch modellhafte Abbildungen Systeme und komplexe Zusammenhänge zu vereinfachen. Für das Rahmensystem wird die wirkungsorientierte Betrachtung (Eingangs-/Ausgangsbetrachtung) eines System appliziert. Dies wird im Folgenden beschrieben.

Bei der wirkungsorientierten Betrachtung eines Systems wird von der Frage ausgegangen, welche wichtigen Einwirkungen oder Eingangsgrößen aus der Umgebung zusammen mit den Verhaltensmöglichkeiten des Systems welche Auswirkungen oder Ausgangsgrößen auf die Umgebung zur Folge haben. Die eigentlichen strukturellen Wirkungszusammenhänge innerhalb der Untersysteme interessieren bei der Betrachtung des Gesamtsystems nicht. Werden diese Betrachtungen auf den Gedanken der Fertigungsverkettung adaptiert, ergibt sich eine Aneinanderreihung mehrerer variabler Verknüpfungssysteme, deren Eingangs- und Ausgangsgrößen eine Überlagerung und eine Vielzahl von Stell- und Störgrößen aufweisen.

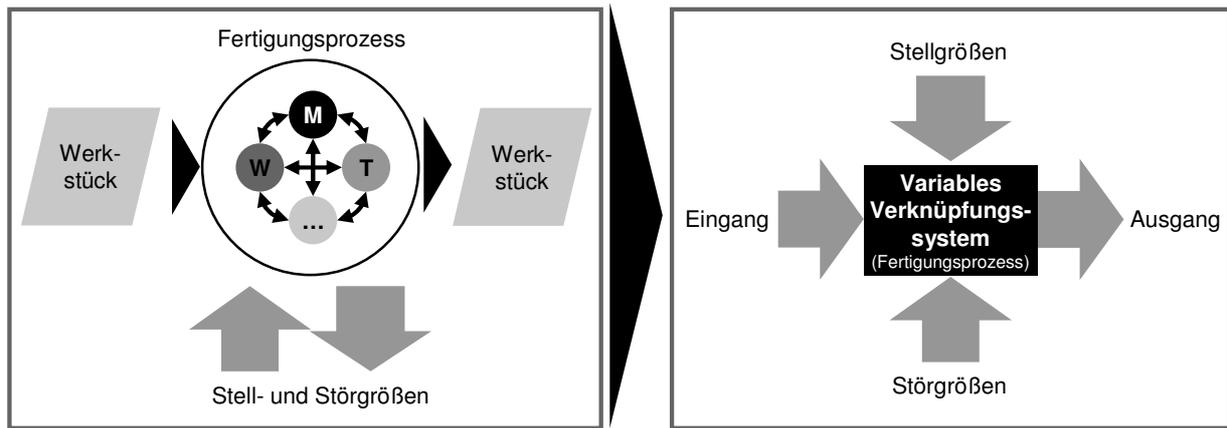


Bild 5.12: Betrachtung des Fertigungsprozesses als variables Verknüpfungssystem

Figure 5.12: Consideration of Manufacturing Process as variable Interface System

Die Fertigungsverkettung wird innerhalb des Rahmensystems, wie oben beschrieben, als System mit variablen Verknüpfungs(unter-)systemen betrachtet. Eine Variation der Stell- und Störgrößen (hierzu gehört u.a. auch die Verwendung unterschiedlicher Werkzeuge) führt zu Prozessalternativen, welche sich in den resultierenden Ausgangsgrößen unterscheiden. Dies wird im Folgenden näher beschrieben.

5.3.2 Variation der Stellgrößen

5.3.2 Variation of Actuating Parameters

Nach der Übertragung einer Fertigungsverkettung in ein wirkungsorientiertes System und die daraus resultierende Verknüpfung von Fertigungsprozessen als variable Verknüpfungssysteme werden nun die Stell- und Störgrößen betrachtet. Innerhalb des Rahmensystems zur Auslegung von Fertigungsverkettungen wird zwischen drei möglichen Typen von Stell- und Störgrößen unterschieden:

- variable Stellgrößen, z.B. Schnittgeschwindigkeit,
- erfassbare Störgrößen, z.B. Umgebungstemperatur und
- zufällige Störgrößen, z.B. schwankende Werkstoff- und Werkzeugeigenschaften.

Die variablen Stellgrößen sind für die Generierung von Prozessalternativen essentiell und stellen mit dem Werkstückeingangszustand die wichtigsten Einflussfaktoren dar. Im Rahmensystem wird zwischen variablen Stellgrößen mit definierten (z.B. Werkzeugauswahl) und undefinierten Zuständen (z.B. Schnittgeschwindigkeit v_c) unterschieden. Eine Stellgröße mit undefiniertem Zustand kann jeden beliebigen Wert innerhalb eines vorgegebenen Bereiches annehmen.

Die Störgrößen führen zu einer Prozessungenauigkeit. Eine quantitative Berücksichtigung ist nur bei den erfassbaren Störgrößen möglich und auch nur, wenn die Zusammenhänge modelliert werden können. Die zufälligen Störgrößen sind nicht direkt quantifizierbar. Die Störgrößen sind somit ein kritischer Faktor und werden im Rahmensystem durch eine Berücksichti-

gung der Prozessungenauigkeiten erfasst. Ihre Betrachtung und Verarbeitung wird in den Kapiteln 5.5 und 5.6 näher erläutert.

Daraus resultierend werden für das entwickelte Modul zur Generierung der Prozessalternativen die variablen Stellgrößen herangezogen. Exemplarisch sind diese in *Bild 5.13* für das Beispiel der Bohrbearbeitung dargestellt. Eine detaillierte Übersicht der variablen Stellgrößen für die betrachteten Verfahren nach DIN 8580 der Untergruppen 3.1, 3.2 und 3.3 [DIN8580] sind im Anhang 9.2 aufgezeigt. Die Verarbeitung von variablen Stellgrößen mit definierten und undefinierten Zuständen wird in dem entwickelten Modul unterschiedlich berücksichtigt. Bei den variablen Stellgrößen mit definierten Zuständen sind die anzunehmenden Zustände bereits fest definiert (z.B. Kühlschmierstoff an/ aus). Bei den variablen Stellgrößen mit undefinierten Zuständen müssen die definierten Zustände hingegen erst bestimmt werden. Hierzu wird in der vorliegenden Arbeit der vorgegebene Wertebereich in geeignete Intervalle eingeteilt. Der Wertebereich ist üblicherweise z.B. durch die Vorgaben der Werkzeughersteller vorgegeben (*Bild 5.13*).

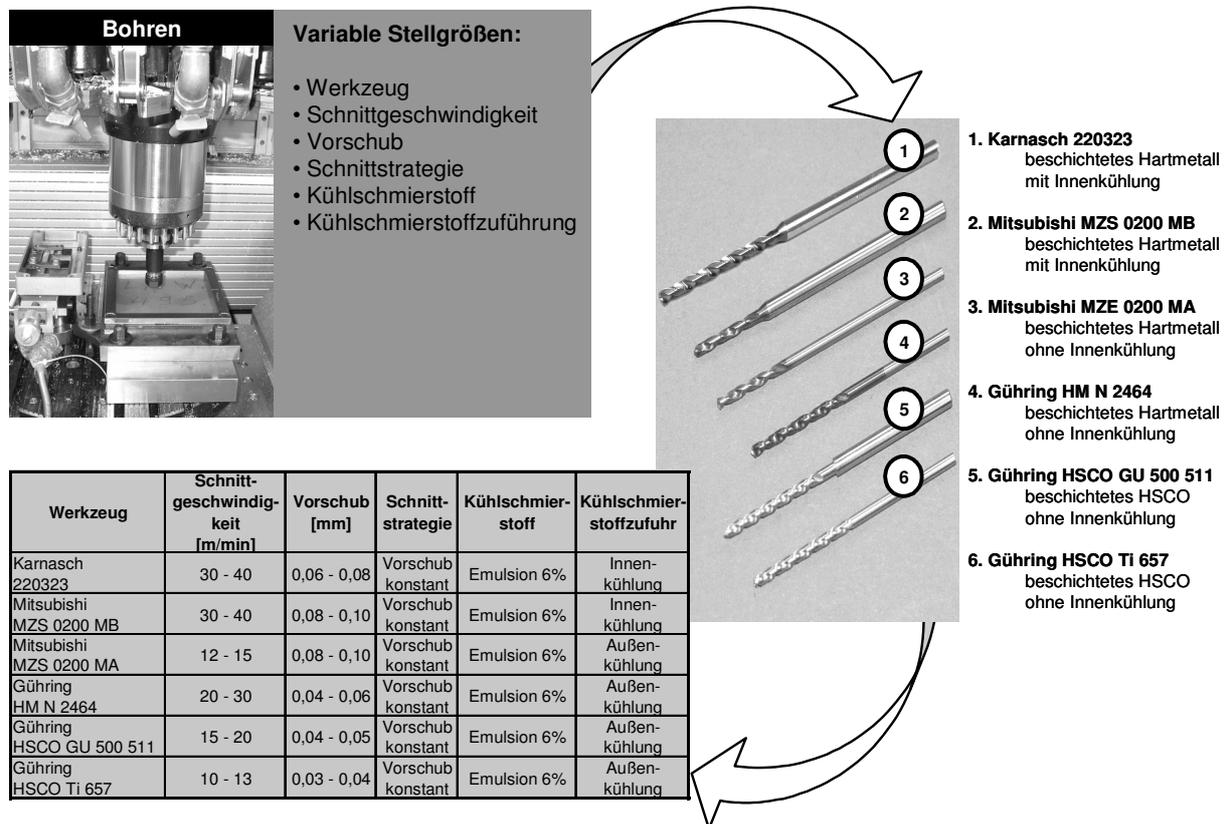


Bild 5.13: Variable Stellgrößen am Beispiel des Bohrens von Lochblechen

Figure 5.13: Variable Actuating Parameters for the Drilling of perforated Sheets

Die Größe der Intervalle ist von der Größe des Wertebereichs und der notwendigen statistischen Sicherheit bei der späteren Kostenberechnung und dem Benchmarking in den Kapiteln 5.7 und 5.8 abhängig. Das zugrunde liegende Problem ist der mathematischen Statistik zuzuordnen und wird über die statistische Stichprobenverteilung eingrenzt. Für das Rahmensystem

zur Auslegung von Fertigungsverkettungen sind lediglich die quantitativen Merkmale relevant.

Als Grundlage des entwickelten Moduls „Generierung der Prozessalternativen“ ergibt sich nach den mathematischen Grundlagen der Stichprobenrechnung (siehe Anhang 9.5) eine empirische Verteilungsfunktion W_n der Stichprobe (x_1, \dots, x_n) :

$$W_n(x) = \frac{M_n(x)}{n} \tag{Gleichung 5.16}$$

M_n ist hierbei die Anzahl der Stichproben. In der methodischen Vorgehensweise des Rahmensystems zur Auslegung von Fertigungsverkettungen liegt häufig lediglich eine Stichprobe pro Intervall vor (vergleiche Kapitel 5.3.1), so dass gilt:

$$W_n(x) = M_n(x) \tag{Gleichung 5.17}$$

Die Abweichung D_n der Verteilungsfunktion von der wahren Verteilung F ergibt sich zu:

$$D_n = \max_{x \in R^1} |W_n(x) - F(x)| \tag{Gleichung 5.18}$$

Damit gilt der Hauptsatz der mathematischen Statistik (Satz von Gliwenko):

Für $n \rightarrow \infty$ konvergiert die Folge $W_n(x)$ der empirischen Verteilungsfunktionen fast sicher gleichmäßig gegen die Verteilungsfunktion $F(x)$ des Merkmals X in der Grundgesamtheit [BRON05].

Im Fall einer kleinen Stichprobe (n relativ klein) interessiert hiernach die Verteilung der Stichprobenfunktion $W_n(x)$. Im Fall einer großen Stichprobe (n groß) genügt die Kenntnis der asymptotischen Verteilung von $W_n(x)$, d.h. die Kenntnis der Gesamtverteilung von W_n für $n \rightarrow \infty$. Ein allgemeines Kriterium, welches zu entscheiden gestattet, wann eine Stichprobe als klein oder groß anzusehen ist, gibt es nicht [BRON05]. Als praktischer Wert für das weitere methodische Vorgehen wird eine Menge von 10% des Minimalwertes angenommen. Adaptiert man die getroffenen Feststellungen auf das Rahmensystem und auf die Intervallgrößenbestimmung, so ergibt sich für die Intervallgröße Δ :

$$\Delta = \frac{10\% * x_n}{100\%} \tag{Gleichung 5.19}$$

x_n ist der kleinste Wert des Wertebereiches.

Im entwickelten Rahmensystem wird erstmals eine gleichmäßige Intervallverteilung in Betracht gezogen, so dass die Intervallgröße noch auf den zu betrachtenden Wertebereich normiert wird:

$$\Delta_{norm} = \frac{x_n - x_1}{\text{abs} \left| \frac{x_n - x_1}{\Delta} \right|}, x_n > x_1 \quad \text{Gleichung 5.20}$$

Hierbei ist Δ_{norm} die normierte Intervallgröße, x_1 der kleinste Wert und x_n der größte Wert des Wertebereichs.

Da eine Fertigungsverkettung nicht nur aus einem Fertigungsprozess besteht und jeder Fertigungsprozess mehrere Prozessvariationen erlaubt, sind die sich ergebenden Möglichkeiten miteinander zu kombinieren. Dabei sind die optimalen Intervallgröße aus Gleichung 5.19 und die vorgegebenen Wertebereiche sowie Paramtervariationen zu berücksichtigen.

Die resultierenden alternativen Auslegungen der Fertigungsverkettung sind die Prozessalternativen. Im Rahmensystem zur Auslegung von Fertigungsverkettungen werden die drei folgenden Typen von Prozessalternativen unterschieden:

- technologisch mögliche Prozessalternativen,
- technologisch nicht erlaubte Prozessalternativen und
- unzureichende Prozessalternativen.

Die technologisch möglichen Prozessalternativen können sinnvoll durchgeführt werden und das erzeugte Werkstück entspricht den ermittelten Merkmalvorgaben aus Kapitel 5.1. Technologisch nicht erlaubte Prozessalternativen sind nicht technologisch durchführbar. Es wird innerhalb der Fertigungsverkettung ein Werkstückzustand generiert, welcher keine weitere Bearbeitung zulässt. Die unzureichenden Prozessalternativen sind zwar technologisch durchführbar, allerdings genügt der erzeugte Werkstückendzustand nicht den geforderten Merkmalvorgaben. Das erzeugte Werkstück ist Ausschuss. Für eine stabile Fertigung der Produktanforderungen sind somit nur die technologisch möglichen Prozessalternativen relevant. Diese sind zu diesem Zeitpunkt allerdings noch nicht von den nicht erlaubten und unzureichenden Prozessalternativen unterscheidbar. Hierfür müssen zunächst die Werkstückzwischenzustände ermittelt werden. Dies wird in Kapitel 5.5 beschrieben.

Je nach Größe und Komplexität der Fertigungsverkettung liegt zu diesem Zeitpunkt der methodischen Vorgehensweise des Rahmensystems allerdings eine unüberschaubar große Anzahl von Prozessalternativen vor, da zunächst alle theoretisch möglichen Alternativen betrachtet werden. Zur Bestimmung der Fertigungshistorie ist es allerdings nicht erforderlich, jede dieser Prozessalternativen explizit zu kalkulieren und zu validieren. Vielmehr ist die hohe Anzahl an notwendigen Prozessalternativen nur für das spätere Benchmarking und die detaillierte Kostenberechnung (Kapitel 5.7 und 5.8) notwendig. Ein Großteil der Prozessalternativen kann daher zunächst abgeschätzt oder interpoliert werden. Dies muss statistisch abgesichert erfolgen. Mit dem Ziel einer praktikablen Methodendurchführung wird im Rahmensystem demnach zunächst die Anzahl der zu validierenden Prozessalternativen reduziert. Bei einer kleinen Anzahl von Prozessalternativen ist eine Reduktion nicht erforderlich.

5.4 Modul 4 - Reduktion der Prozessalternativen

5.4 Module 4 - Reduction of Process Alternatives

Je nach Komplexität und Größe der Fertigungsverkettungen wird eine große und unüberschaubare Anzahl von Prozessalternativen generiert. Diese Prozessalternativen haben jedoch alle gemeinsam, dass sie sich größtenteils nur durch die Veränderung eines Parameters unterscheiden. Im Falle einer linearen Abhängigkeit ist eine weitere Betrachtung der entsprechenden Prozessalternativen daher nicht notwendig, sondern kann durch eine mathematische Interpolation ersetzt werden. Generell werden in dieser Arbeit zur Reduktion der zu validierenden Prozessalternativen (*Bild 5.14*) folgende Prinzipien eingesetzt (angelehnt an [AMEN02]):

- Nutzung von Symmetrien: Sofern symmetrische Eingangsgrößen auch symmetrische Ausgangsgrößen liefern (z.B. Normalverteilung), können diese Symmetrien genutzt werden, um die Zahl der Prozessalternativen zu reduzieren.
- Nutzung des Raums der unabhängigen Eingangsgrößen: Die gleichzeitige Variation mehrerer Einflussgrößen verringert die Prozessalternativen.
- Vermengen: Die systematische Überlagerung von wesentlichen Effekten und unwesentlichen Nebeneffekten verringert die Prozessalternativen.
- Iterative Analyse: Um die Zahl der Prozessalternativen zu verringern, kann es sinnvoll sein, die Versuchsplanung abhängig von vorhergehenden Versuchsergebnissen zu gestalten.
- Eliminieren von unmöglichen Prozessalternativen: Häufig kommt es vor, dass während des Erprobens von Prozessalternativen diese nicht durchgängig durchführbar sind, da ein nicht mehr weiter bearbeitbarer Werkstückzwischenzustand entsteht. Dies ist z.B. der Fall, wenn das Werkstück beschädigt wurde oder die Werkzeuge aufgrund der eingestellten Parameter überlastet werden.

Die Nutzung von Symmetrien und die iterative Analyse basiert bis zum heutigen Zeitpunkt auf bereits vorhandenem Wissen und Informationen. Eine automatisierte oder methodische Verarbeitung ist daher zur Zeit noch nicht möglich. Vielmehr gilt es, momentan den Methodennutzer bzw. erfahrene Experten in die Betrachtungen mit einzubeziehen und entsprechende Eingangsgrößen identifizieren zu lassen. Zukünftige Modelle, die zunehmend den Experten ersetzen, können aufgrund der offenen Schnittstellenstruktur an das Rahmensystem zur Auslegung von Fertigungsverkettungen angekoppelt werden. Die Anbindung einer Wissensdatenbank (siehe Kapitel 5.5) führt zudem zu einer Speicherung der bereits genutzten Erfahrungen, so dass diese bei einem erneuten Bedarf automatisch aus der Datenbank abgerufen werden können.

Die Elimination von unmöglichen Prozessalternativen erfolgt im Rahmensystem automatisch, sobald innerhalb der betrachteten Fertigungsverkettung ein nicht mehr bearbeitbarer Werkstückzwischenzustand entsteht. Dies geschieht grenzwertbasiert anhand der Konstruktionsvorgaben. Es werden sofort alle angekoppelten Prozessalternativen aus den weiteren Betrachtungen eliminiert.

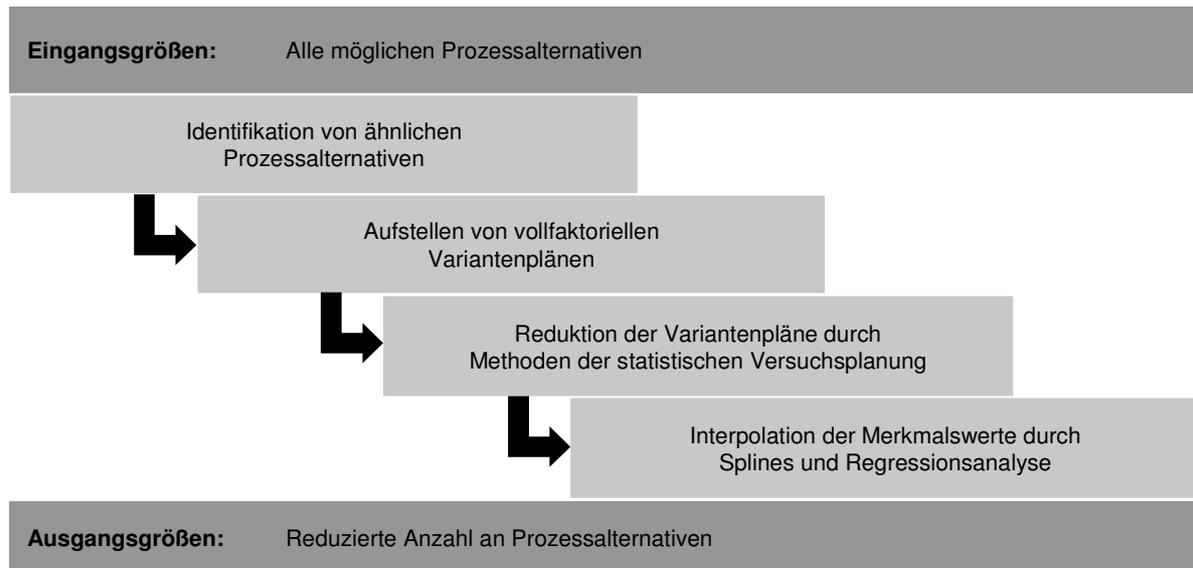


Bild 5.14: Ablaufdiagramm des Moduls „Reduktion der Prozessalternativen“

Figure 5.14: Description of the Module „Reduction of Process Alternatives“

Die Nutzung des Raums der unabhängigen Eingangsgrößen und das Vermengen der wesentlichen Effekte stellen einen optimalen Anwendungsfall für die statistische Versuchsplanung dar und werden daher im Folgenden näher betrachtet. Zur Reduktion der zu untersuchenden Prozessalternativen kommt im Rahmensystem zur Auslegung von Fertigungsverkettungen eine angepasste Variante der Methode Design of Experiments (DoE) nach Taguchi [ROY01, VECC97] zum Einsatz. Ziel des DoE ist es, die Zahl der Experimente, die zur Bestimmung des Einflusses von Parametern auf ein zu untersuchendes Merkmal erforderlich sind, auf ein Minimum zu begrenzen. Bei der multifaktoriellen Analyse müssen theoretisch alle untersuchten Parameter vollständig durchvariiert werden und dies in allen möglichen Kombinationen, um auch nicht-lineare Effekte, z.B. Wechselwirkungen zwischen den Parametern, zu erfassen. Da bei dieser vollfaktoriellen Versuchsplanung die Variantenzahl mit der Zahl der Parameter exponentiell ansteigt, wird durch vereinfachende Annahmen und durch den Einsatz statistischer Auswerteverfahren die Variantenzahl erheblich reduziert [ROY01]. Die oben genannten Methoden decken die mathematischen Grundlagen zur Variantenreduktion bereits ausreichend ab, weswegen sie als Basis für die weiteren Betrachtungen eingesetzt werden. Die Interpolation der restlichen Werte erfolgt erstmals mit Hilfe von Splines (siehe Anhang 9.1) und durch eine Regressionsanalyse.

Bei dem im Rahmensystem angewendeten teilfaktoriellen Variantenplan werden repräsentative Varianten ausgewählt. Diese werden durch einen Center Point Versuch ergänzt, um Nicht-linearitäten zu erkennen. Bei einer großen Anzahl von Varianten, Faktoren (Parametern) und Faktorstufen (Parametergrößen) erfolgt erstmals eine weitere Reduktion der notwendigen Varianten durch die Werteinterpolation mittels kubischer Splines. Diese Vorgehensweise ist statistisch abgesichert. Sie wird im Rahmensystem eingesetzt, sobald es eine geringe Anzahl von Variantenwerten zu interpolieren gilt. Eine detaillierte Beschreibung der dabei eingesetzten mathematischen Zusammenhänge ist im Anhang 9.1 dargestellt. Als Grenze wird eine Anzahl

von 5 Variantenwerten festgelegt. Über 5 Variantenwerte steigt der Rechenaufwand überproportional an, so dass in diesem Fall eine Regressionsanalyse vollzogen wird.

Adaptiert man die in Kapitel 5.3 getroffenen Feststellungen bzgl. der relevanten Einflussgrößen auf die einzelnen Fertigungsprozesse und überträgt man diese auf die Variantenplanung, ergibt sich das in *Bild 5.15* dargestellte vereinfachte Modell eines Fertigungsprozesses.

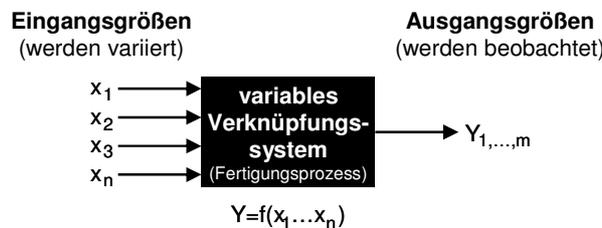


Bild 5.15: Vereinfachtes Fertigungsprozessmodell für die Versuchsplanung

Figure 5.15: Simplified Manufacturing Process Model for DoE

Der Fertigungsprozess wird weiterhin als variables Verknüpfungssystem betrachtet. Seine Eingangsgrößen x_1, \dots, x_n sind die in Kapitel 5.3.1 identifizierten variablen Stellgrößen und der Werkstückeingangszustand, da dieser entlang der Fertigungsverkettung veränderlich ist. Die Ausgangsgröße ist der Werkstückzustand nach Bearbeitung durch den zu betrachtenden Fertigungsprozess, aufgeschlüsselt nach den einzelnen Werkstückmerkmalen Y_1, \dots, Y_m . Die Abhängigkeit der Ausgangsgrößen von den Eingangsgrößen ist die Veränderungsleistung des Fertigungsprozesses. Sie müssen durch geeignete Modelle und Versuche bestimmen werden und durch einen statistisch abgesicherten mathematischen Zusammenhang beschrieben werden. Unberücksichtigt bleibt das so genannte Prozessrauschen ϵ bzw. das Auftreten von Messfehlern, deren Einfluss durch entsprechende statistische Absicherung für das Rahmensystem zur Auslegung von Fertigungsverkettungen eliminiert werden muss.

Hierfür wird ein in dieser Arbeit angepasstes Polynom der multiplen linearen Regression als Näherungsansatz verwendet:

$$Y = f(x) = f(x_1, \dots, x_n) \quad (\text{reale Ausgangsgröße}) \quad \text{Gleichung 5.21}$$

$$\hat{Y} = g(x) = g(x_1, \dots, x_n) \quad (\text{berechnete Ausgangsgröße}) \quad \text{Gleichung 5.22}$$

$$e = Y - \hat{Y} \quad (\text{Fehler}) \quad \text{Gleichung 5.23}$$

$$\hat{Y} = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \dots \quad \text{Gleichung 5.24}$$

Y ist die reale und \hat{Y} die berechnete Ausgangsgröße. Die Eingangsgrößen werden als $x_{i,j}$ bezeichnet. Ihre Anzahl ist k . Der resultierende Fehler zwischen realer und berechneter Ausgangsgröße ergibt sich als e . a_0 , a_i , a_{ij} und a_{ii} sind die zu ermittelnden Koeffizienten der Regressionsgleichung. Durch Gleichung 5.24 werden neben den linearen Zusammenhängen auch

die Wechselwirkungen der Eingangsgrößen sowie quadratische und Effekte höherer Ordnung berücksichtigt. Die Regressionskoeffizienten a_0 , a_i , a_{ij} und a_{ii} werden durch die Minimierung des mittleren quadratischen Modellfehlers Q bestimmt. Es gilt:

$$Q = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (\text{quadratischer Modellfehler}) \quad \text{Gleichung 5.25}$$

k wird als Anzahl der Eingangsgrößen definiert. Wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben können diese Eingangsgrößen variiert werden. Nehmen diese Eingangsgrößen fest vorgegebene Werte an, z.B. verschiedene Werkzeuge oder Kühlschmierstoffe, so kann deren Anzahl nicht reduziert werden. Ihr Einfluss auf die Anzahl der Prozessalternativen ist allerdings auch nicht besonders hoch. Alle anderen Eingangsgrößen mit nicht fest definierten Werten, z.B. die Schnittgeschwindigkeit v_c , haben den größten Einfluss auf die Anzahl der Prozessalternativen und werden im Rahmensystem durch drei Faktorstufen für die Erprobung festgelegt:

1. Faktorstufe: *minimaler Wert des definierten Wertebereiches*
2. Faktorstufe: *maximaler Wert des definierten Wertebereiches*
3. Faktorstufe: *Center Point, d.h. mittlerer Wert des definierten Wertebereichs*

Die ersten beiden Faktorstufen grenzen den Wertebereich ein, z.B. minimale und maximale Schnittgeschwindigkeit. Da kein linearer Zusammenhang vorausgesetzt werden kann, ist es erforderlich, eine dritte Faktorstufe einzuführen, welche zwischen den Minimal- und Maximalwerten liegt und somit eventuelle Nichtlinearitäten erfasst und berücksichtigt. Die Anzahlen der notwendigen zu untersuchenden Prozessalternativen b_{gesamt} wird in dem entwickelten Modul wie in den Gleichungen 5.26 bis 5.20 festgelegt. Zur statistischen Absicherung wird im Rahmensystem eine weitere Anzahl p an Prozessalternativen untersucht. Hierbei ergibt sich die notwendige Anzahl b_{gesamt} aus der Summe der notwendigen, zu untersuchenden Prozessalternativen zur Bestimmung der linearen Haupteffekte b_{linear} , der Wechselwirkungen $b_{\text{Wechselwirkungen}}$, der quadratischen Effekte $b_{\text{quadratisch}}$ und der Varianz b_{Varianz} . Die Varianz berücksichtigt die Prozessstreuung als statistische Größe und ist bei einer praktischen Untersuchung zwingend erforderlich. Die Größe des entsprechenden Faktors p zur statistischen Absicherung sollte mindestens 5 [WASC03], besser allerdings 10 [ROY01, VECC97] betragen.

$$b_{\text{linear}} = k + 1 \quad \text{Gleichung 5.26}$$

$$b_{\text{Wechselwirkungen}} = k * \frac{(k-1)}{2} \quad \text{Gleichung 5.27}$$

$$b_{\text{quadratisch}} = k \quad \text{Gleichung 5.28}$$

$$b_{\text{Varianz}} = p \quad \text{Gleichung 5.29}$$

$$b_{\text{gesamt}} = b_{\text{linear}} + b_{\text{Wechselwirkungen}} + b_{\text{quadratisch}} + b_{\text{Varianz}} = (k + 1) + k * \frac{(k-1)}{2} + k + p \quad \text{Gleichung 5.30}$$

Durch diese Vorgehensweise lässt sich die Anzahl der zu untersuchenden Prozessalternativen drastisch senken. Beispielhaft zeigt dies *Bild 5.16*.

Die Umsetzung der mathematischen Zusammenhänge zur Reduktion der zu untersuchenden Prozessalternativen kann mittels Standardsoftware zur Versuchsplanung (z.B. MiniTab R14) erfolgen, so dass der Benutzer einfach auf existierende Hilfsmittel zurückgreifen kann. Ergebnis des entwickelten Moduls zur Generierung der Prozessalternativen sind deutlich verkürzte Variantenpläne zur quantitativen Bestimmung der in Kapitel 5.3 generierten Prozessalternativen. Die Ermittlung der Ausgangsgrößen entsprechend dieser Versuchspläne wird im Folgenden beschrieben.

Anzahl der Eingangsgrößen:	$k = 10$
Anzahl der notwendigen Varianten:	
• lineare Haupteffekte $k+1$	11
• Wechselwirkungen $k*(k-1)/2$	45
• quadratische Effekte k	10
• Versuchsvarianz	10
Summe:	76
Anzahl der Varianten bei vollfaktorieller Planung:	59.049

Bild 5.16: Exemplarischer Vergleich der notwendigen Prozessalternativen

Figure 5.16: Exemplary Comparison of necessary Process Alternatives

5.5 Modul 5 - Ermitteln der Fertigungshistorie

5.5 Module 5 - Determination of Work Piece intermediate States across the Manufacturing Process Chain

Zu diesem Zeitpunkt liegen lediglich die Prozessalternativen und deren mögliche Variantenpläne vor. Sie beschreiben die Variation der Einstellgrößen einer Fertigungsverkettung. Die Veränderungen am Werkstück, welche diese Variationen hervorrufen, sind bisher noch nicht bestimmt worden. Zur Beschreibung der Fertigungshistorie einer Fertigungsverkettung sind die Werkstückveränderungen zwingend erforderlich. Im Folgenden wird daher ein Konzept zur Ermittlung der möglichen resultierenden Werkstückveränderungen anhand der gegebenen Einstellgrößen und Prozessvariationen vorgestellt. Entsprechende Methoden zur Bestimmung der Werkstückmerkmale einzelner Fertigungsprozesse sind genügend vorhanden (siehe Seite 60). Die Grundlage des Konzeptes ist daher nicht die Entwicklung von Methoden zur Bestimmung der Veränderungen am Werkstück, sondern vielmehr die Integration von bestehenden Methoden in das Rahmensystem (*Bild 5.17*). Dies erfolgt durch Anbindung eines Wissensmanagementsystems.

Anhand der systematischen Ermittlung der Variantenpläne aus Kapitel 5.4 werden die Werkstückveränderungen im Folgenden bestimmt. Häufig ähneln die Variantenparameter bereits durchgeführten Versuchen oder Simulationen. Es ist somit nicht zwingend erforderlich, diese Varianten erneut zu untersuchen. Es kann vielmehr auf existierendes Wissen zurückgegriffen werden. Ebenso sind häufig Simulationsmodelle oder Erfahrungswissen vorhanden, welche auf gleiche Art und Weise genutzt und in das Rahmensystem zur Auslegung von Fertigungs-

verkettungen integriert werden können. Hierzu ist es allerdings erforderlich, das bereits existierende Wissen und neu generiertes Wissen zu sammeln und zu speichern. Ein systematisches Wissensmanagement kann diese Aufgabe erfüllen. Das hierfür entwickelte Modul wird im Folgenden vorgestellt (Bild 5.18). Das Modul bietet die Möglichkeit Daten aus Simulationen, Versuchen und Erfahrungswissen in das Rahmensystem einzubinden. Zunächst werden die verwendeten Grundlagen des Wissensmanagements kurz erläutert und auf das Rahmensystem appliziert.

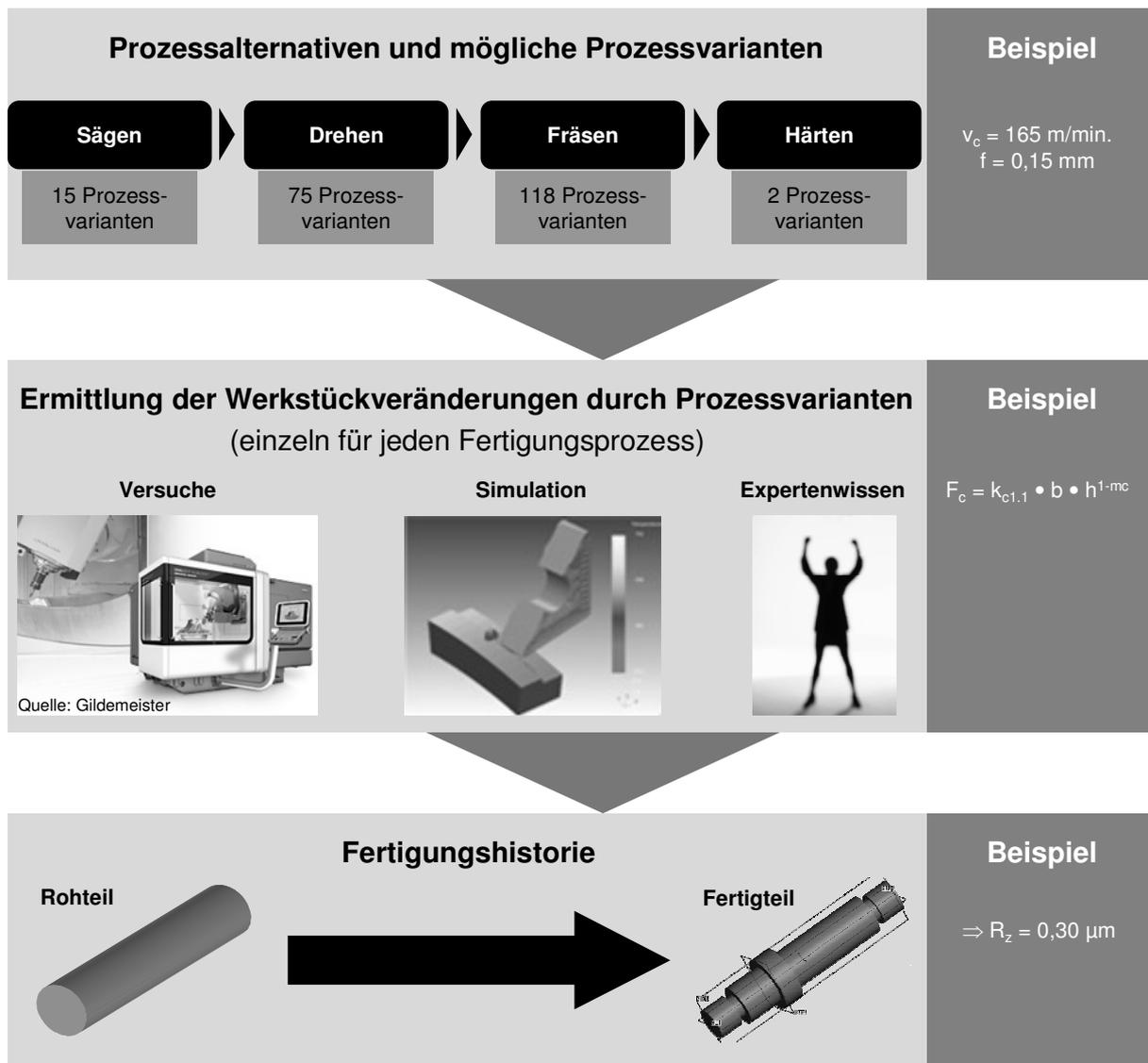


Bild 5.17: Vorgehensweise zur Bestimmung der Fertigungshistorie

Figure 5.17: Procedure for estimating the Manufacturing History

Innerhalb des Rahmensystems wird zwischen Wissen, Informationen und Daten unterschieden (Bild 5.19). Weitere Größen sind die Zeichen, das Können, das Handeln, die Kompetenz und die Wettbewerbsfähigkeit [NORT02].

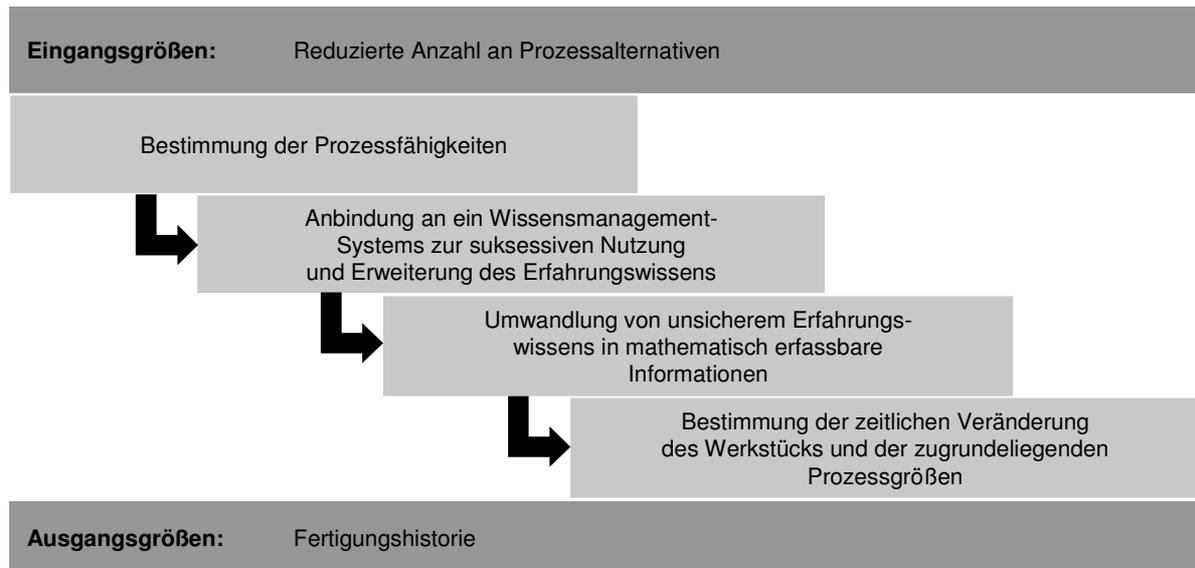


Bild 5.18: Ablaufdiagramm des Moduls „Ermitteln der Fertigungshistorie“

Figure 5.18: Description of the Module „Determination of Work Piece Intermediate States across the Manufacturing Chain“

Die meisten heute eingesetzten Methoden zum Wissensmanagement beschränken sich auf die Verwaltung und Organisation von Daten. Für das Rahmensystem ist aber vielmehr die nutzbringende Bereitstellung von Informationen und Wissen interessant. Zur Ermittlung der Fertigungshistorie ergeben sich folgende Anforderungen an ein sinnvolles Wissensmanagement:

- Erfassung von Wissen
 - langfristige Speicherung von Informationen und Wissen
 - strukturierte Erfassung
- Abbildung von Wissen
 - eindeutige Repräsentation der Einflussparameter und deren Werte
 - eindeutige Repräsentation der Ausgangsgrößen
 - eindeutige Repräsentation des Einflusses der Eingangs- auf die Ausgangsgrößen
 - modellhafte Repräsentation
 - Integration verschiedener Informations- und Wissensquellen
- Bereitstellung von Wissen
 - Identifikation von benötigten Informationen und Wissen
 - schnelle Bereitstellung von Informationen und Wissen
 - Adaption der Informationen und des Wissens auf die Fertigungshistorie und deren einzelne Fertigungsprozesse

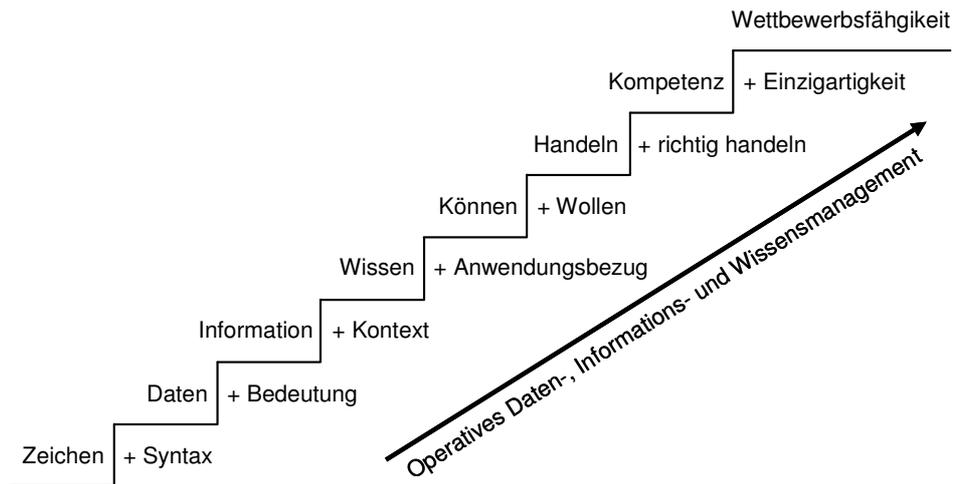


Bild 5.19: Ingenieurwissenschaftliches Wissensmodell (nach [NORT02])

Figure 5.19: Engineering-based Knowledge Model (according to [NORT02])

Die Fertigungshistorie wird innerhalb des Rahmensystems durch die Veränderung des Werkstückes (Werkstückzwischenzustände) und die Prozesseinstellungen (Prozessparameter) beschrieben. Eine strukturierte Erfassung von Wissen ermöglicht ein späteres Identifizieren und Auffinden der benötigten Informationen. Eine langfristige Speicherung von technologischen Informationen und Wissen ist sinnvoll, da Fertigungstechnologien üblicherweise einen Lebenszyklus von mindestens 30 Jahren aufweisen. Am Beginn des Technologielebenszyklus sind wenige Informationen und Wissen über die Fertigungstechnologie vorhanden. Die Anzahl an Informationen nimmt in den frühen Lebenszyklusphasen stark zu. Im Laufe des Lebenszyklus werden diese Informationen in Wissen umgewandelt und können, eine entsprechende Verwaltung und Speicherung vorausgesetzt, genutzt werden (Bild 5.20). Es ist somit zwar aufwendig, zunächst neue Informationen über eine Technologie mittels des entwickelten Moduls zu generieren, allerdings zahlt sich dies in der späteren Nutzung des zur Verfügung stehenden Wissens wieder aus.

Mit einer klaren und strukturierten Erfassung von Wissen ist gleichzeitig die Bereitstellung von Wissen verknüpft. Um eine schnelle Bereitstellung des Wissens für das entwickelte Modul „Generierung der Fertigungshistorie“ zu gewährleisten, ist eine datenbankbasierte EDV-technische Umsetzung erforderlich. Die erforderlichen Größen und deren Einflüsse müssen klar erkennbar und repräsentiert sein. Nur so ist eine Zuordnung zu spezifischen Prozessalternativen möglich. Eine modellhafte, genormte Repräsentation erlaubt die Integration verschiedener Informations- und Wissensquellen. Die wichtigsten Informationsquellen sind Praxisversuche, Simulationen und Erfahrungswissen. Ebenso finden aber auch andere Quellen Berücksichtigung (Bild 5.21).

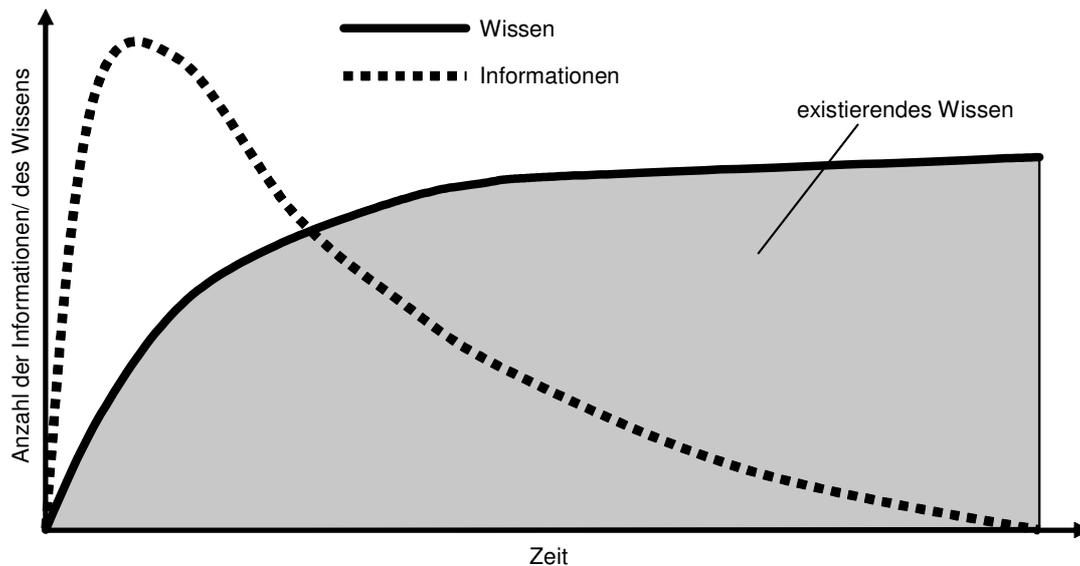


Bild 5.20: Informationen und Wissen anhand des Technologielebenszyklus

Figure 5.20: Information and Knowledge along the Technology Life Cycle

Die in *Bild 5.21* dargestellten Wissensquellen lassen sich alle zur Bestimmung der Fertigungshistorie innerhalb des Rahmensystems zur Auslegung von Fertigungsverkettungen verwenden. Detaillierte Einzellösungen, wie beispielsweise nach Kopner [KOPN02], Homering [HOME01], Kuhn [KUHN92], Jacobs [JACO02], Mansour [MANS06], Straube [STRA04], Clausing [CLAU98], Doukidis [DOUK94] oder Astakhov [ASTA95], befinden sich in der Anwendung und können für die Generierung der Fertigungshistorie angeknüpft werden. Eine Übersicht über verschiedene Modelle der Simulationstechnik gibt Klocke [KLOC05]. Ein gesamtheitlicher Ansatz zum Wissensmanagement in der Fertigungstechnik wurde von Wegner [WEGN07] entwickelt, welcher sich auch auf die Zerspanung mit geometrisch definierter Schneide applizieren lässt. Auch diese Ansätze sind mit dem entwickelten Modul an-koppelbar.

Wie in *Bild 5.12* dargestellt, besteht die Fertigungsverkettung aus einer Aneinanderreihung von verschiedenen variablen Verknüpfungssystemen - den Fertigungsprozessen. Für die einzelnen Verknüpfungssysteme sind lediglich die Stellgrößen und vereinzelt die Eingangs- und Ausgangsgrößen bekannt. Die zeitliche Veränderung des Werkstücks und die restlichen Eingangs- und Ausgangsgrößen - beim Übergang von einem Verknüpfungssystem in das nächste auch Werkstückzwischenzustand genannt - müssen noch bestimmt werden. Nach deren Berechnung kann dann die Fertigungshistorie, d.h. die zeitliche Veränderung des Werkstücks durch die Fertigungshistorie, ermittelt werden. Die Veränderung des Werkstücks durch die einzelnen Verknüpfungssysteme lässt sich durch Wissensmanagement, genauer durch die Wissensquellen in *Bild 5.21*, ermitteln. Konkret heißt dies, dass in der vorliegenden Arbeit die Veränderung des Werkstücks durch das Fertigungssystem anhand von Praxisversuchen, Simulationen, Erfahrungswissen etc. bestimmt wird. Der methodische Aufbau des Rahmensystems zur Auslegung von Fertigungsverkettungen führt den Benutzer hierbei durch die Ermittlung der notwendigen Parameter.

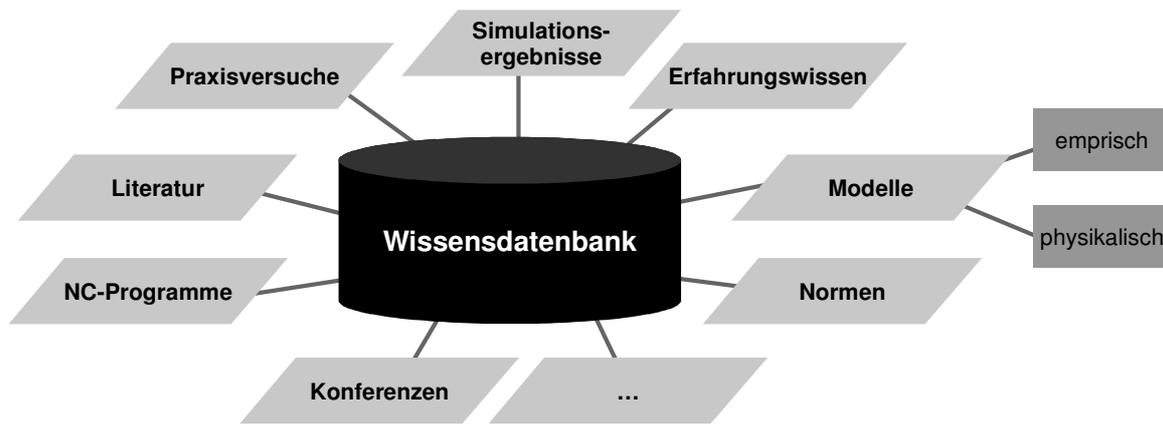


Bild 5.21: Wissensquellen

Figure 5.21: Sources of Knowledge

Je nach Einsatz der in *Bild 5.21* gezeigten Informationsquellen gilt es zu berücksichtigen, dass die zugrunde liegenden Informationen bzw. Daten eine Streuung aufweisen, z.B. Praxisversuche, oder nicht streuende Ergebnisse liefern, z.B. Simulationen. Bei den nicht streuenden Informationsquellen ist eine Betrachtung der Varianz gemäß Kapitel 5.4 nicht erforderlich und kann ausgelassen werden. Weiterhin ist eine gewisse Unschärfe bestimmter Informationen, z.B. Expertenwissen, zu beachten. Während die Streuung sich beispielsweise automatisch aus den Praxisversuchen ergibt und durch eine Prozessfähigkeitsmessung integriert werden kann [RINN99], muss die Umwandlung des Erfahrungswissens manuell erfolgen. Dies geschieht im entwickelten Rahmensystem erstmals durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung Φ der erfahrenen Werte:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Gleichung 5.31}$$

Es wird angenommen, dass das zugrunde liegende Erfahrungswissen normalverteilt streut. Andere Streuungsarten können ebenso von dem methodischen System verarbeitet werden - sie werden allerdings nicht weiter explizit betrachtet. Ihre Integration in das System erfolgt analog den normalverteilten Streuungen.

Als Mittelwert μ der Normalverteilung wird der erfahrene Wert angenommen. Die Streuung σ wird je nach vorliegender Erfahrungsqualität wie folgt festgelegt:

$\sigma = 1 \%$	exaktes Wissen des Wertes (z.B. „5“)
$\sigma = 25 \%$	ungefähres Wissen des Wertes (z.B. „ca. 5“)
$\sigma = 50 \%$	ungefähres Wissen des Wertebereiches (z.B. „ca. zwischen 4 und 6“)
$\sigma = 75 \%$	Abschätzung des Wertes (z.B. „schätzungsweise 5“)

Diese Einteilung setzt erstmals eine Umwandlung des Erfahrungswissens erfassbar um und eine Realisierung nach Gleichung 5.31 ermöglicht eine spätere Berücksichtigung von erfahrenem Wissen innerhalb des Benchmarking-Prozesses. Es gilt, je unsicherer die Einflussgrößen sind, desto weniger ist die Art des Einflusses bekannt.

Durch das vorgestellte Konzept lassen sich anhand von bestehenden Versuchsdaten, Simulationsmodellen und existierendem Expertenwissen die Veränderungen des Werkstückes durch die Prozessvariationen ermitteln. Durch die zeitliche Verknüpfung der Werkstückveränderungen lässt sich dann die Fertigungshistorie – also die zeitliche Veränderung des Werkstücks entlang der Fertigungsverkettung – beschreiben (Bild 5.22). Eine Interpolation auf die gesamten identifizierten Prozessalternativen erfolgt im Rahmensystem über Gleichung 5.24 und 5.25 bzw. anhand von Splines, so dass erstmals eine vollständige Abbildung der Fertigungshistorien vorliegt, ohne dass alle möglichen Prozessalternativen bestimmt werden mussten.

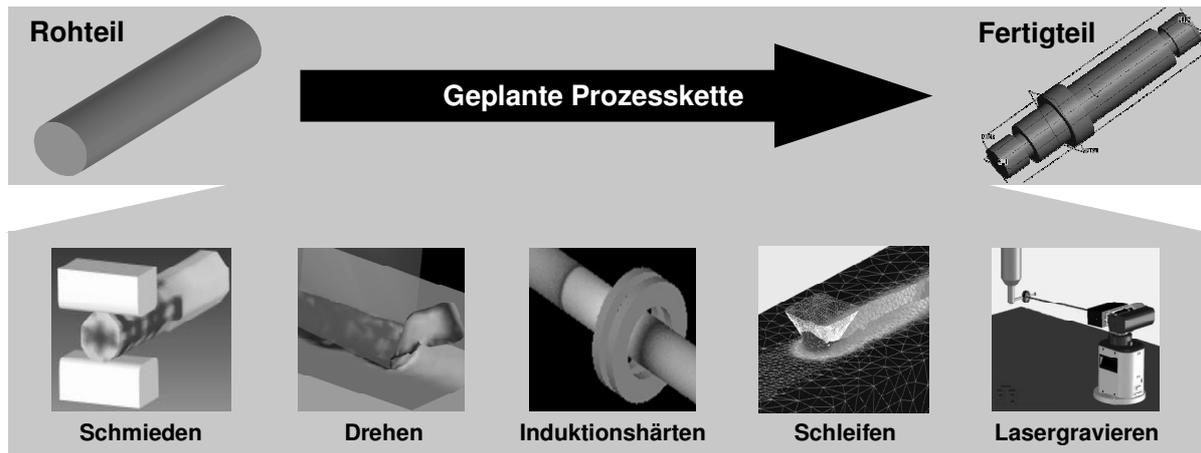


Bild 5.22: Exemplarische Fertigungshistorie: Rohteil zum Fertigteil

Figure 5.22: Exemplary Manufacturing History: Raw Part to Finished Work Piece

5.6 Modul 6 - Identifikation von Risikoprozessen

5.6 Module 6 - Identification of risky Processes

Um eine Aussage über die jeweiligen Prozessalternativen bezüglich ihrer Einsatztauglichkeit treffen zu können, ist es erforderlich, die einzelnen Fertigungsprozessvariationen hinsichtlich ihres Einsatzrisikos zu bewerten. Eine Anhäufung von Risikoprozessen innerhalb einer Prozessalternative kann zu deutlich erhöhtem Ausschuss führen oder sogar bedeuten, dass keine Gut-Teile gefertigt werden können. Das Risiko wird als Wechselwirkung des Auftretens einer Prozessinstabilität und der damit verbundenen Folgen für das Werkstück verstanden. Die mit einer Prozessstabilität verbundenen Folgen werden durch die Struktur aus Kapitel 5.1 bewertet. Zunächst gilt es, innerhalb des Rahmensystems das Auftreten einer Prozessinstabilität zu erkennen. Dies wird im Folgenden näher erläutert (Bild 5.23).

Die wichtigste Voraussetzung für eine sichere Produktion sind stabile Prozesse [PFEI02a]. Die Prozessfähigkeit ist ein Maß dafür, ob ein Prozess in der Lage ist, die an ihn bezüglich eines Produktionsmerkmals gestellten Forderungen zu erfüllen. Für eine umfassende und korrekte Qualifikation von Prozessen ist es erforderlich, mit Hilfe statistischer Verfahren den Sachverhalt ausreichend genau modellhaft zu beschreiben [PFEI02b]. Man unterscheidet zwischen der:

- Kurzzeitfähigkeit C_m und C_{mk} oder auch Maschinenfähigkeit,
- vorläufigen Prozessfähigkeit P_p und P_{pk} sowie
- der Langzeitprozessfähigkeit C_p und C_{pk} .

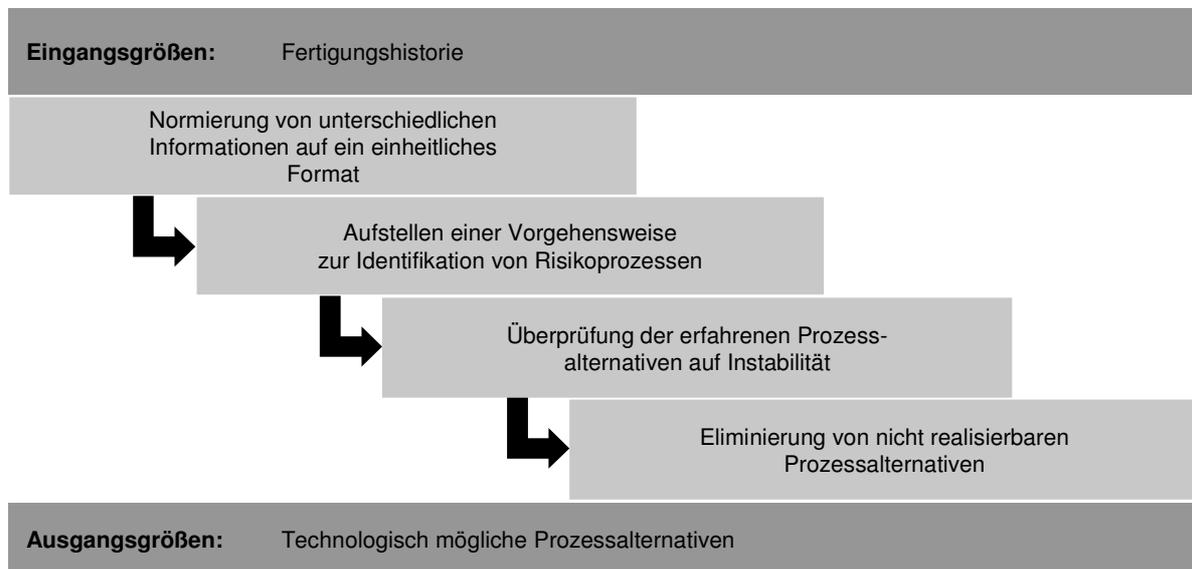


Bild 5.23: Ablaufdiagramm des Moduls „Identifikation von Risikoprozessen“

Figure 5.23: Description of the Module „Identification of risky Processes“

Für die Bestimmung der Kurzzeit-, Maschinen-, Langzeit- und Prozessfähigkeit wird die Festlegung einer Toleranzgrenze vorausgesetzt. Genau dies soll allerdings innerhalb des Rahmensystems an dieser Stelle nicht erfolgen, da so erneut zu hoch angesetzte Toleranzen Einzug in die Planung halten. Die bisherigen Standardansätze sind somit für die entwickelte Methode nicht verwendbar.

Aus Kapitel 5.5 liegen die Prozessalternativen, aufgrund der unterschiedlichen Wissensquellen, auf unterschiedliche Art und Weise vor. Generell werden im entwickelten Rahmensystem die einzelnen Prozessstreuungen der Prozessalternativen in die in *Bild 5.24* gezeigten Klassen unterteilt. Weitere Verteilungen sind möglich und werden analog in den weiteren Ausführungen untersucht. Deren mathematische Beschreibung ist den jeweiligen Gegebenheiten nach [BRON05] anzupassen.

Simulationsergebnisse, Modellergebnisse, Informationen aus NC-Programmen weisen typischerweise keine Streuung auf. Sie werden als Festverteilung bezeichnet. Erfahrungswissen wurde anhand der Gleichung 5.31 in eine Normalverteilung umgewandelt. Die Daten aus den Praxisversuchen wurden interpoliert und liegen zunächst noch als Punktwolke vor. Die Interpolation der Informationen ist eine Näherungslösung und kann zu einer geringen Abweichung von der tatsächlichen Größe führen. Diese Abweichung – oder Fehler - ist allerdings klein genug, um für eine Abschätzung in der Planungsphase ausreichend zu sein. Die Vorgehensweise bei der Bewertung des Prozesses variiert je nach vorliegender Datenklassifizierung. *Bild 5.25* gibt eine generelle Übersicht über die neu entwickelten Vorgehensweisen.

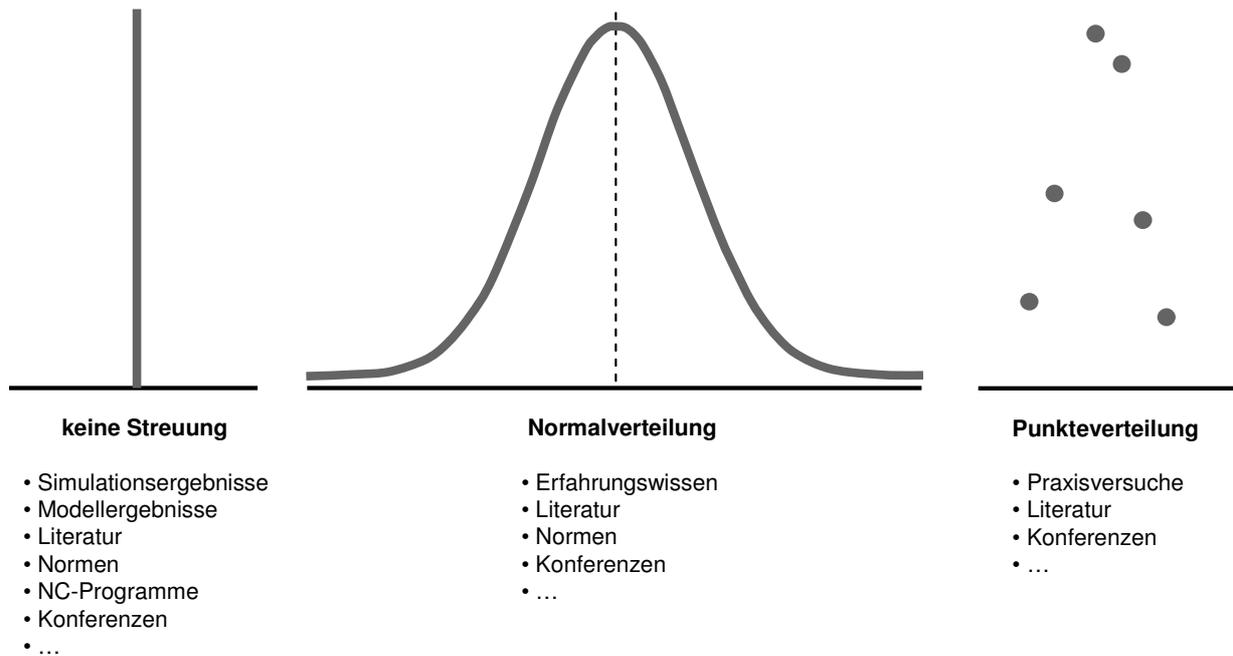


Bild 5.24: In dieser Arbeit verwendete Klassen von Prozessstreuungen

Figure 5.24: Within this thesis defined Classes of Process Variation

Bei einer Festverteilung ist eine Aussage über die Fertigungsprozessstabilität nur eingeschränkt möglich. Sie hängt lediglich von zwei Faktoren ab. Zum einen muss das erzielte Prozessergebnis innerhalb der erlaubten Bandbreite liegen. Dies bedeutet, dass z.B. ein zu hoher Materialabtrag beim Drehen dazu führt, dass der Werkstückdurchmesser zu gering ist und das Werkstückmerkmal „Wellendurchmesser“ nicht mehr gefertigt werden kann. Es handelt sich um die bereits in Kapitel 5.5 beschriebenen nicht erlaubten Prozessalternativen. Sie werden aussortiert und nicht weiter betrachtet. Zum anderen ist bei einer Festverteilung zu prüfen, ob es sich um den letzten Fertigungsprozess einer Fertigungsverkettung handelt bzw. ein bestimmtes Werkstückmerkmal als letztes beeinflusst wird. In diesem Fall müssen die Prozessergebnisse den Forderungen an die Werkstückmerkmale entsprechen. Ist dies nicht der Fall, kann der Fertigungsprozess den Anforderungen nicht genügen.

Die methodische Vorgehensweise des Rahmensystems bei einer Normalverteilung oder Punkteverteilung der Merkmalswerte unterscheidet sich nur minimal. Bei der Punkteverteilung ist es zunächst notwendig, diese in eine Normalverteilung umzuwandeln. Unter Berücksichtigung von Gleichung 5.31 sind somit der Mittelwert μ der Normalverteilung $\Phi(x)$ und die Streuung σ so zu bestimmen, dass der quadratische Fehler q der Abweichung zwischen Realdaten und normalverteilten Daten minimal wird:

$$q = \min \sum_{i=1}^k (y_i - \Phi(x_i))^2 \quad (\text{quadratischer Fehler}) \quad \text{Gleichung 5.32}$$

Mit k wird die Anzahl der Wertepaare definiert.

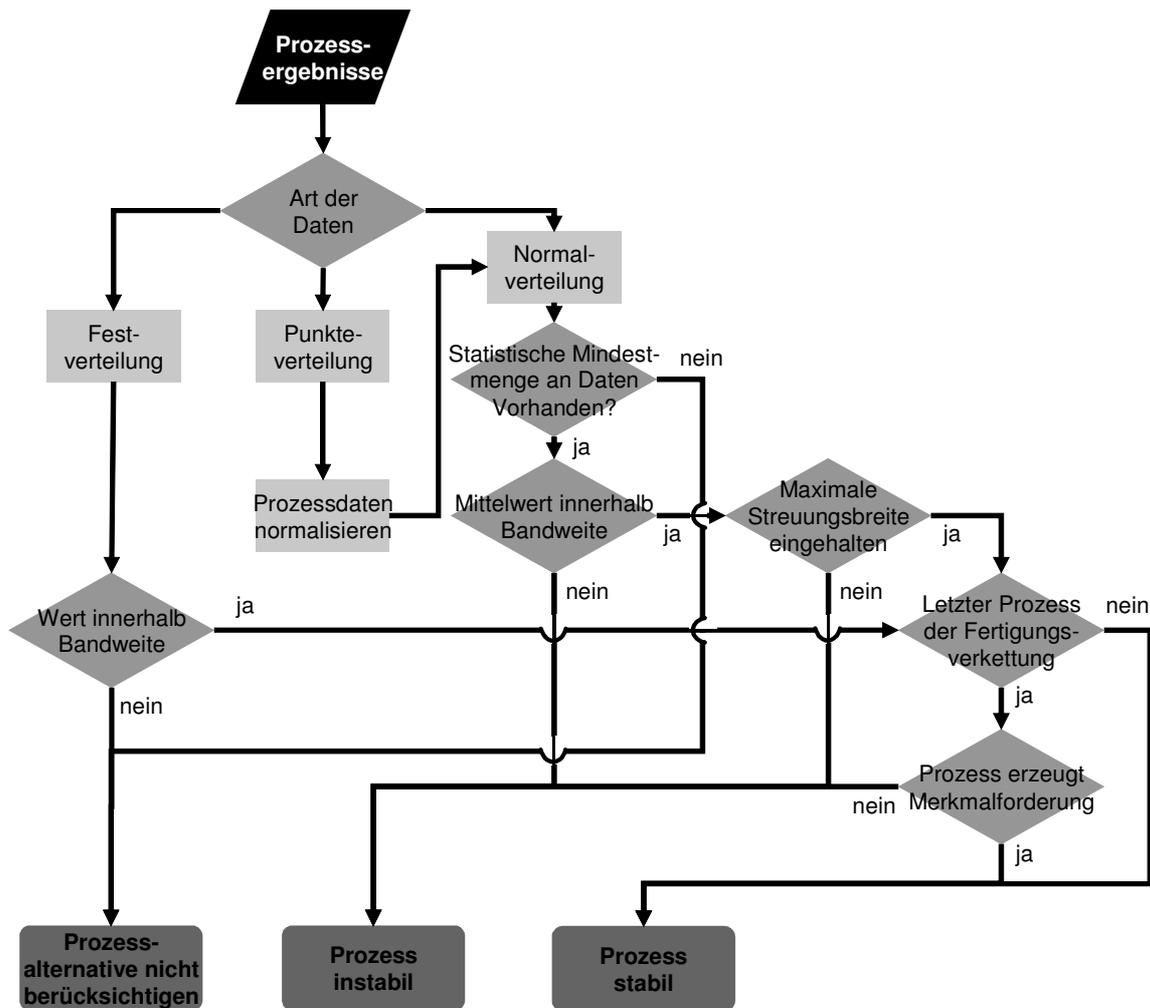


Bild 5.25: Entwickelte Vorgehensweise bei der Risikobewertung

Figure 5.25: Procedure for Risk Evaluation developed

Die Daten der Punkteverteilung liegen nun ebenso als Normalverteilung vor und können analog der normalverteilten Daten weiter behandelt werden. Hierzu wird zunächst überprüft, ob genügend empirische Daten vorgelegen haben, um die Normalverteilung statistisch angesichert bestimmen zu können. Anschließend wird eine Überprüfung der Bandbreite vollzogen. Dies geschieht analog den festverteilten Daten, wie oben beschrieben. Als Vergleichswert wird jedoch der Mittelwert μ der Normalverteilung herangezogen. Liegt dieser innerhalb der erlaubten Bandbreite, so wird im Folgenden die Prozessungenauigkeit der Prozessergebnisse ermittelt. Die Prozessungenauigkeit ist ein Maß für die Robustheit und Stabilität eines Fertigungsprozesses. Ist sie zu hoch, erzeugt der Fertigungsprozess nicht sicher das geforderte Merkmal. Die Stabilität ist ein Maß für die zeitliche Entwicklung der Prozessergebnisse. Verändert sie sich zu stark, so „driftet“ der Fertigungsprozess und es ist ebenso keine sichere Fertigung der Merkmale gewährleistet. Die Robustheit beschreibt die Reaktion eines Fertigungsprozesses auf Störungen. Führt eine Störung des Fertigungsprozesses zu starken Ergebnisabweichungen, so kann ebenso keine sichere Fertigung der Merkmale gewährleistet werden. Die Grundqualitätsforderung ist vorher zu definieren. Üblicherweise geht man heute als Grundlage von 3σ aus. Die Prozessstreuung ist in diesem Fall der Bereich, in dem 99,73% der

Ergebniswerte zu erwarten sind. Sie wird durch die Fläche der Normalverteilung definiert und ist durch die Grenzen u_p und o_p definiert (Bild 5.26).

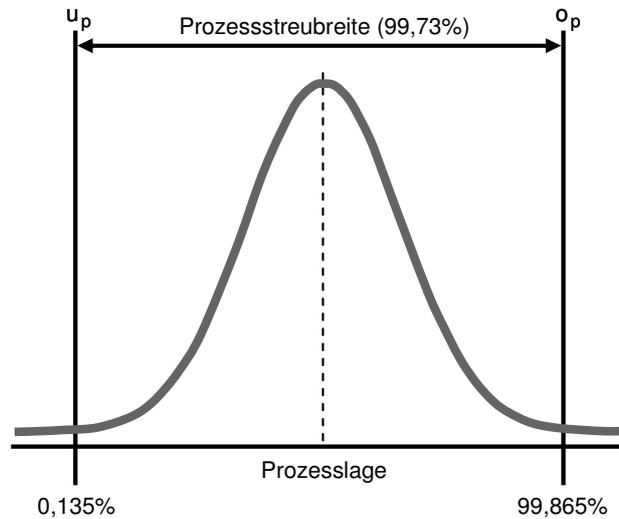


Bild 5.26: Prozessstreuung

Figure 5.26: Manufacturing Process Variation

Häufig findet man heute auch die Forderung nach 6σ . Dies würde einem Wertebereich von 99,99960% entsprechen. Die Vorgehensweise ist jedoch identisch. Toleranzen werden an dieser Stelle jedoch noch nicht fest definiert. Die Bestimmung der Grundqualitätsforderung erfolgt vielmehr auf der Basis unternehmenspolitischer Vorgaben (z.B. SixSigma) [PFEI01a]. Der Streuung überlagert ist die Abweichung. Die Summe aus Abweichung und Streuung ist die Prozessgenauigkeit. Für das Rahmensystem ist er der Bewertungsmaßstab zur Bestimmung eines Risikoprozesses.

Als Basis der Bewertung sind zunächst einige grundlegende Berechnungen und Überprüfungen notwendig. Die empirische Streuung s wird definiert als:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{k - 1}} \tag{Gleichung 5.33}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k} \tag{Gleichung 5.34}$$

Sie stellt eine vereinfachte Ausdrucksweise dar. Je kleiner die Streuung s ist, umso weniger streuen die Prozessergebnisse um den empirischen Mittelwert \bar{x} . Je nach Qualitätsforderung p ergeben sich entsprechende Irrtumswahrscheinlichkeiten α [BRON05]:

$$\alpha = 1 - p, \quad 0 < p \leq 1 \tag{Gleichung 5.35}$$

Zur Überprüfung der Robustheit des Prozesses wird zunächst überprüft, ob die Vereinfachungen nach Gleichung 5.33 und 5.34 zulässig sind, d.h. die Abweichung des empirischen Mittelwerts \bar{x} zum normalverteilten Mittelwert μ klein genug ist [BRON05]:

$$|\bar{x} - \mu| \leq \frac{s}{\sqrt{k}} t_{\alpha, n-1} \tag{Gleichung 5.36}$$

$t_{\alpha, n-1}$ ist der Irrtumswahrscheinlichkeitskoeffizient und wird anhand von *Bild 5.27* bestimmt. Hierbei ist n die Anzahl der unterschiedlichen Wertepaare (mehrfach vorkommende, gleiche Wertepaare bleiben unberücksichtigt) und k ist die Anzahl der Versuche.

α	$n-1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	∞
0,2700	$t_{\alpha, n-1}$	6,314	2,92	2,353	2,132	2,015	1,943	1,895	1,86	1,833	1,812	1,725	1,645
0,0006		636,6	31,6	12,922	8,61	6,869	5,959	5,408	5,041	4,781	4,587	3,849	3,291

Bild 5.27: Bestimmung von $t_{\alpha, n-1}$

Figure 5.27: Determination of $t_{\alpha, n-1}$

Wird unter den gegebenen Randbedingungen Gleichung 5.37 nicht erfüllt, so wird innerhalb des Rahmensystems zur Auslegung von Fertigungsverkettungen der betrachtete Fertigungsprozess bereits jetzt als nicht robust eingeschätzt, da seine Prozessergebnisse eher willkürlich als statistisch abgesichert erzeugt werden. Trifft die Annahme aus Gleichung 5.37 zu, wird im Folgenden überprüft, wie groß die Prozessstreuung tatsächlich ist:

$$s_{\text{normiert}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{k-1}}}{\bar{x}} * 100\% \tag{Gleichung 5.37}$$

s_{normiert} gibt die prozentuale empirische Streuung bezogen auf den Mittelwert an. Sie ist ein direktes Maß für die Stabilität eines Fertigungsprozesses. Als Einzelnes betrachtet, kann sie jedoch keinen Rückschluss auf die Auswirkungen innerhalb einer Prozessalternative geben. Sie muss vielmehr erst in den Kontext der Wichtigkeit des betrachteten Werkstückmerkmals gesetzt werden. Dies erfolgt im Rahmen des Benchmarkings in Kapitel 5.8. Zunächst wird daher erst ein grober Grenzwert angesetzt, welcher eine Vorselektion der Fertigungsprozesse erlaubt. Der Grenzwert sollte nicht zu klein gewählt werden, da an dieser Stelle noch keine exakte Aussage über die Wirkungen innerhalb der Fertigungsverkettung getroffen werden kann. Er dient nur dazu, sehr grob streuende Fertigungsprozesse bereits im Vorfeld auszusortieren. Dieser Grenzwert kann beispielsweise mit 10% angenommen werden.

Hat der betrachtete Fertigungsprozess den vorherigen Überprüfungen standgehalten, so gilt es innerhalb des entwickelten Moduls abschließend, analog den festverteilten Prozessen, zu überprüfen, ob der Fertigungsprozess als letzter Prozess der Fertigungsverkettung ein bestimmtes Werkstückmerkmal beeinflusst und dieses endgültig produzieren kann. Dies erfolgt durch

den Vergleich des Prozessergebnisses mit der Merkmalforderung. Die Grenzen der Prozessstreuung werden durch o_p und u_p festgelegt. Die Grenzen der Merkmaltoleranz ergeben sich zu $M_{\text{Obergrenze}}$ und $M_{\text{Untergrenze}}$:

$$o_p \leq M_{\text{Obergrenze}} \quad \text{Gleichung 5.38}$$

$$u_p \geq M_{\text{Untergrenze}} \quad \text{Gleichung 5.39}$$

Sind durch die vorangegangenen Überprüfungen bestimmte Fertigungsprozesse als instabil oder unmöglich identifiziert worden, so werden die gesamten zugehörigen Prozessalternativen aus den weiteren Betrachtungen durch das Rahmensystem ausgeschlossen.

Die vorangegangenen Entwicklungen und Überlegungen haben gezeigt, dass selbst unter Verwendung von unscharfen Informationen und Daten (z.B. Erfahrungswissen) risikobehaftete Fertigungsprozesse reproduzierbar identifiziert werden können. Ebenso wurde gezeigt, dass durch Verwendung eines sinnvollen Wissensmanagementsystems die Fertigungshistorie unter Berücksichtigung von Anomalien quantitativ in der Planungsphase bestimmt werden kann. Die Teilthese 2 „Die Bestimmung der zeitlichen Veränderung des Werkstücks unter Berücksichtigung von Anomalien (Streuungen und Abweichungen) ist bereits in der Planung quantitativ erfassbar“ und Teilthese 3 „Mit Unsicherheit behaftetes Erfahrungswissen über Fertigungsprozesse kann zu einem reproduzierbaren, stabilen Ergebnis führen“ sind somit nachgewiesen.

5.7 Modul 7 - Ermittlung der Herstellkosten

5.7 Module 7 - Determination of Manufacturing Cost

Die Stabilität und Robustheit der Fertigungsprozesse sind eine Notwendigkeit für eine reproduzierbare Produktion. Da jeder industrielle Betrieb gleichzeitig auch eine wirtschaftliche Fertigung realisieren muss, ist der Preis für ein Produkt von hoher Bedeutung für den Unternehmenserfolg [WEST02]. Die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit muss daher bei den Prozessen ansetzen, die die meiste Leistung verzehren [SCHO97b]. Die entstehenden Herstellkosten sind somit eines der wichtigsten Bewertungskriterien, da sie den Produktpreis maßgeblich beeinflussen. Für das entwickelte Rahmensystem sind sie daher das maßgebende Kriterium für die Bestimmung der Fertigungstoleranzen (*Bild 5.28*).

Der Begriff Herstellkosten ist ein Begriff aus dem deutschen Handelsgesetzbuch (§255, Abs. 2 HGB) [HGB07]. Die betriebliche Kostenkalkulation ergibt sich zu:

$$K_{\text{Selbstkosten}} = K_{\text{Herstellkosten}} + K_{\text{Entwicklungskosten}} + K_{\text{Verwaltungs-}/\text{Vertriebskosten}} \quad \text{Gleichung 5.40}$$

Diese Vorgehensweise ist für eine Bewertung von Prozessalternativen nicht praktikabel und auch nicht zwingend notwendig.

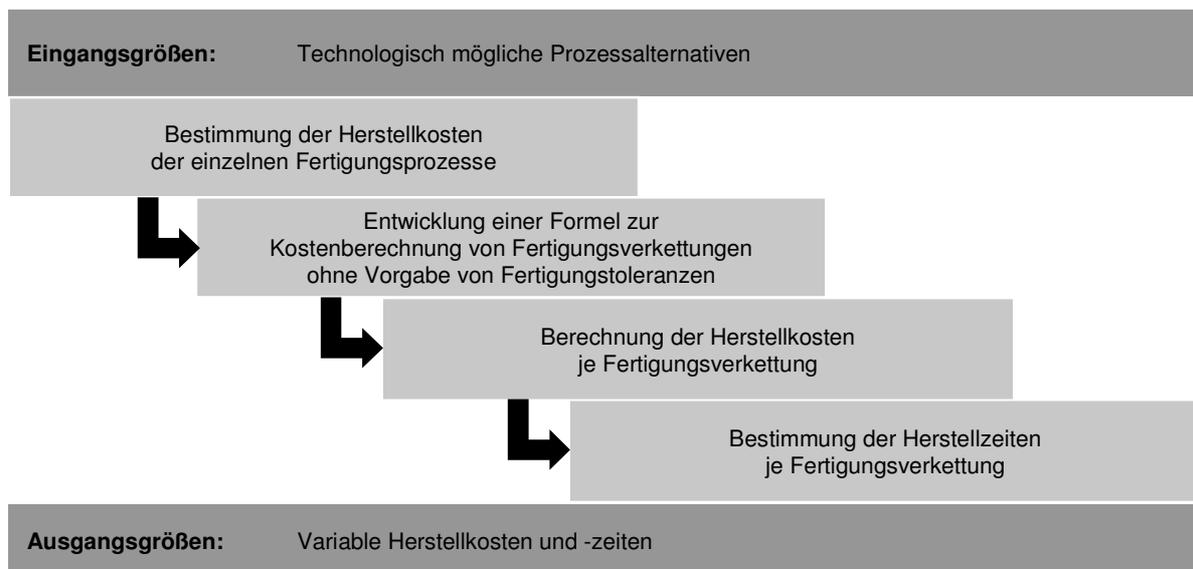


Bild 5.28: Ablaufdiagramm des Modules „Bestimmung der Herstellkosten“

Figure 5.28: Description of the Module „Determination of Manufacturing Cost“

Das neu entwickelte Modul zum Benchmarking von Prozessalternativen führt eine vergleichende Bewertung durch. Hierbei kürzen sich die Entwicklungs-, Verwaltungs- und Vertriebskosten heraus, da diese für jede Prozessalternative, aufgrund der identischen Produktkonstruktion, gleich sind und somit kein Unterscheidungsmerkmal darstellen. Für das Rahmensystem wird daher die folgende Kalkulation der Herstellkosten eingesetzt:

$$K_{\text{Herstellkosten}} = K_{\text{Material}} + K_{\text{Fertigungskosten}} \quad \text{Gleichung 5.41}$$

$$K_{\text{Material}} = K_{\text{Materialeinzelkosten}} + K_{\text{Materialgemeinkosten}} \quad \text{Gleichung 5.42}$$

$$K_{\text{Fertigungskosten}} = K_{\text{Fertigungseinzelkosten}} + K_{\text{Fertigungsgemeinkosten}} + K_{\text{Sondereinzelkosten}} \quad \text{Gleichung 5.43}$$

Zu bestimmen sind daher lediglich die folgenden 5 Kostenfaktoren (Bild 5.29):

- Materialeinzelkosten ($K_{\text{Materialeinzelkosten}}$),
- Materialgemeinkosten ($K_{\text{Materialgemeinkosten}}$),
- Fertigungseinzelkosten ($K_{\text{Fertigungseinzelkosten}}$),
- Fertigungsgemeinkosten ($K_{\text{Fertigungsgemeinkosten}}$) und
- Sondereinzelkosten ($K_{\text{Sondereinzelkosten}}$).

Diese werden im Folgenden näher erläutert und sind Bestandteil des entwickelten Moduls zur Berechnung der Herstellkosten einer Fertigungshistorie. Die Nebenkosten, wie beispielsweise die Kosten für Handhabung oder Lagerung bleiben unberücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass sich diese Kostenanteile zwischen den Prozessalternativen nicht verändern.

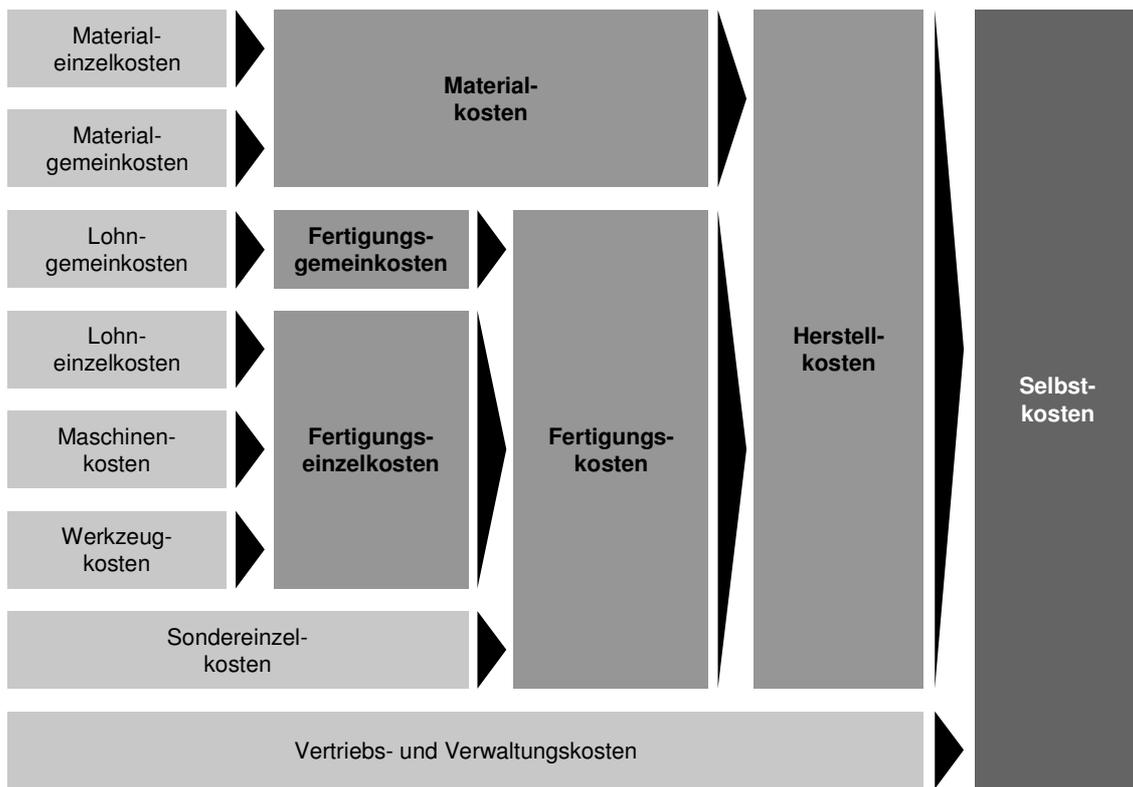


Bild 5.29: Herstellkosten (nach [ZAEH04])

Figure 5.29: Manufacturing Cost (according to [ZAEH04])

5.7.1 Materialeinzelkosten

5.7.1 Specific Material Cost

Die Materialeinzelkosten werden aus den Materialkosten pro Werkstück, den Zuschnittkosten und den eventuellen Verschnittkosten zusammengesetzt. Die Materialkosten pro Werkstück werden dabei anhand des Materialgewichtes bestimmt. Die Zuschnittkosten variieren je nach Materiallieferant. In der industriellen Praxis sind diese in den Materialkosten pro Werkstück bereits berücksichtigt. Gleiches gilt für die Verschnittkosten. Es tritt jedoch gelegentlich der Fall auf, dass der Zuschnitt anhand der Anzahl der notwendigen Trennschnitte und des Trennverfahrens in Rechnung gestellt wird. Die Verschnittkosten werden in seltenen Fällen durch einen Korrekturfaktor berücksichtigt. Sie umfassen das verbleibende Restmaterial, welches nach dem Zuschnitt des Rohmaterials nicht mehr verwendet werden kann, und die Späne. Häufig existieren in der industriellen Praxis Mindestabnahmemengen, welchen bei einer geringen zu fertigenden Anzahl von Werkstücken eine hohe Bedeutung zukommt. Die Materialeinzelkosten $K_{\text{Materialeinzelkosten}}$ werden daher erstmals wie folgt festgelegt:

$$K_{\text{Materialeinzelkosten}} = \frac{K_{\text{Rohmaterial}} + K_{\text{Zuschnitt}} + K_{\text{Verschnitt}}}{n} \tag{Gleichung 5.44}$$

$$K_{\text{Rohmaterial}} = V_{\text{Rohteil}} * \rho * k_{\text{Kilopreis}} \tag{Gleichung 5.45}$$

$$K_{Zuschnitt} = n_z * k_{Schnittpreis} * c_{Verfahren} \quad \text{Gleichung 5.46}$$

$$K_{Verschnitt} = (K_{Rohmaterial} + K_{Zuschnitt}) * c_{Verschnitt} = (V_{min} - V_{Rohteil}) * \rho * k_{Kilopreis} \quad \text{Gleichung 5.47}$$

In dieser Berechnung werden die Materialdichte ρ , die Anzahl der Werkstücke n , das Volumen des Rohteiles $V_{Rohteil}$, der Materialpreis pro Kilogramm $k_{Kilopreis}$, die Anzahl der Zuschnitte n_z , der Preis pro Zuschnitt $k_{Schnittpreis}$, der Korrekturfaktor $c_{Verfahren}$ abhängig vom eingesetzten Trennverfahren und das Mindestabnahmevolumen V_{min} sowie der Verschnittkorrekturfaktor $c_{Verschnitt}$ berücksichtigt.

5.7.2 Materialgemeinkosten

5.7.2 General Material Cost

Die Materialgemeinkosten werden über einen fixen Kostenaufschlag berücksichtigt. Sie betragen je nach Materiallieferant 10 - 80 % und beinhalten beispielsweise die Kosten für Lagerung, Transport, Verwaltung etc. Die Materialgemeinkosten werden wie folgt definiert:

$$K_{Materialgemeinkosten} = K_{Materialeinzelkosten} * c_{Gemein} + \frac{K_{Transport}}{n} \quad \text{Gleichung 5.48}$$

Hierbei sind c_{Gemein} der Gemeinkostenaufschlag und $K_{Transport}$ die Transportkosten.

5.7.3 Fertigungseinzelkosten

5.7.3 Manufacturing Cost

Die Fertigungseinzelkosten setzen sich aus den Lohn- und Lohnnebenkosten, den Maschinenkosten und den Werkzeugkosten zusammen:

$$K_{Fertigungseinzelkosten} = K_{Lohnkosten} + K_{Maschinenkosten} + K_{Werkzeugkosten} \quad \text{Gleichung 5.49}$$

Die Lohnkosten werden wie folgt berechnet und sind die Summe der Lohnkosten des eingesetzten Personals:

$$K_{Lohnkosten} = \sum_{i=1}^j K_{Stundenlohn,i} * (1 + K_{Lohnnebenkosten,i}) * t_{e,i} \quad \text{Gleichung 5.50}$$

Unter $t_{e,i}$ wird die geschätzte Einsatzdauer des Personals verstanden. Hierbei ist i eine Zählvariable zur Identifikation des Einzelpersonals und ist j die Personalanzahl.

Die Maschinenkosten werden analog berechnet:

$$K_{Maschinenkosten} = K_{Maschinenstundensatz} * t_{eM} + K_{Rüstkosten} \quad \text{Gleichung 5.51}$$

t_{eM} ist die geschätzte Belegungszeit.

Der Maschinenstundensatz wird nach Gleichung 5.52 berechnet. Je nach betrieblicher Situation können mehr oder weniger Positionen in die Berechnung des Maschinenstundensatzes mit einbezogen werden. Dies sind beispielsweise die Preisentwicklung der eingesetzten Maschine, variable Zinssätze etc. Die wichtigsten Faktoren werden im Verlauf dieses Kapitels erläutert.

$$K_{\text{Maschinenstundensatz}} = \frac{K_{\text{Abschreibung}} + K_{\text{Zinsen}} + K_{\text{Instandhaltung}} + K_{\text{Raum}} + K_{\text{Energie}}}{t_{\text{Nutzung}}} \quad \text{Gleichung 5.52}$$

t_{Nutzung} ist die jährliche Nutzungsdauer in Stunden.

Die kalkulatorische Abschreibung $K_{\text{Abschreibung}}$ ergibt sich aus dem Wiederbeschaffungswert einer Maschine und deren voraussichtlicher Nutzungsdauer. Der kalkulatorische Zins k_{Zinsen} sind Zinsen, die für das im Unternehmen vorhandene Fremdkapital gezahlt werden. Die Instandhaltungskosten $K_{\text{Instandhaltung}}$ beinhalten neben den Reparatur- und Wartungskosten auch die Kosten für z.B. Schmierstoffe. Die Raumkosten K_{Raum} sind abhängig von der durch die Maschine genutzten Grundfläche. Die Kosten durch den Verbrauch von Strom, Wasser etc. werden in den Energiekosten K_{Energie} zusammengefasst. Die einzelnen Kostenfaktoren werden in dem neu entwickelten Modul wie folgt berechnet:

$$k_{\text{Abschreibung}} = \frac{k_{\text{Anschaffung}} - k_{\text{Verkauf}}}{t_{\text{Abschreibung}}} \quad \text{Gleichung 5.53}$$

$$k_{\text{Zinsen}} = \frac{k_{\text{Anschaffung}} + k_{\text{Verkauf}}}{2} * i \quad \text{Gleichung 5.54}$$

$$\begin{aligned} k_{\text{Instandhaltung}} &= k_{\text{Reparatur}} + k_{\text{Wartung}} + k_{\text{Hilfsstoffe}} + k_{\text{Betriebsstoffe}} \\ &= k_{\text{Anschaffung}} * c_{\text{Instandhaltung}} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 5.55}$$

$$k_{\text{Raum}} = A_{\text{Grundfläche}} * k_{\text{Raum}} \quad \text{Gleichung 5.56}$$

$$k_{\text{Anschaffung}} = k_{\text{Kaufpreis}} + k_{\text{Zubehör}} + k_{\text{Aufstellungskosten}} \quad \text{Gleichung 5.57}$$

$$k_{\text{Energie}} = t_{\text{Nutzung}} * k_{\text{kWh}} * c_{\text{Anschlusswert}} * c_{\text{Einschaltdauer}} * c_{\text{Aufnahme}} \quad \text{Gleichung 5.58}$$

Neben den verschiedenen Kostenfaktoren K_i werden die Energiekosten pro Kilowattstunden als K_{kWh} , die Maschinenstellfläche als $A_{\text{Grundfläche}}$, die Abschreibungsdauer $t_{\text{Abschreibung}}$ und der jährliche Zinssatz als i definiert. $c_{\text{Anschlusswert}}$ bis c_{Aufnahme} sind die prozentualen Korrekturfaktoren.

Die Abschreibungsdauer richtet sich nach Art und Anschaffungswert der Maschine. Steuerrechtlich wird die Abschreibung als Wertminderung von Anlagevermögen bzw. Absetzung für Abnutzungen (AfA) bezeichnet. Entsprechende Abschreibungsdauern können in den AfA-Listen nachgeschlagen werden [KLOC07b]. Bei der Berechnung der Instandhaltungskosten ist es in der industriellen Praxis üblich, die Instandhaltungskosten über die gesamte Nut-

zungsdauer mit einem Korrekturfaktor zu berechnen. Dieser wird häufig mit 25 % des Maschinenanschaffungswertes angesetzt und auf die Nutzungsdauer verteilt.

Die Werkzeugkosten werden nach folgender Formel unter Berücksichtigung der Schnittzeit t_c , der Standzeit T und den Werkzeugkosten pro Standzeit K_{Werkzeug} berechnet [KLOC07b]:

$$K_{\text{Werkzeugkosten}} = \frac{t_c * k_{\text{Werkzeug}}}{T} \quad \text{Gleichung 5.59}$$

Je nach eingesetztem Werkzeug, kann dieses gewendet oder nachgeschliffen werden. Bei einmal verwendbaren Werkzeugen ergeben sich die Werkzeugkosten je Standzeit K_{Werkzeug} als Fixwert inklusive der Voreinstellkosten. Für nachschleifbare Werkzeuge ergibt sich:

$$k_{\text{Werkzeug}} = \frac{k_{\text{Beschaffung}} - k_{\text{Restwert}} + n_s * k_{\text{Nachschliff}}}{n_s + 1} + k_{\text{Voreinstellung}} + k_{\text{Voreinstellung, Maschine}} \quad \text{Gleichung 5.60}$$

Bei der Berechnung der Werkzeugkosten wird die Anzahl der Nachschliffe n_s berücksichtigt.

Bei Wendepplattenwerkzeugen kann das Werkzeug entsprechend der Anzahl der verwendbaren Schneidkeile mehrfach eingesetzt werden. Die Standzeit des gesamten Werkzeuges vervielfacht sich entsprechend der Anzahl der verwendbaren Schneidkeile.

5.7.4 Fertigungsgemeinkosten

5.7.4 General Manufacturing Cost

Die Fertigungsgemeinkosten werden pauschal über einen Korrekturwert c_{Rest} berücksichtigt und beinhalten z.B. die anteiligen Kosten eines Meisterbüros:

$$K_{\text{Fertigungsgemeinkosten}} = K_{\text{Fertigungseinzelkosten}} * c_{\text{Rest}} \quad \text{Gleichung 5.61}$$

5.7.5 Sondereinzelkosten

5.7.5 Special Costs

Die Sondereinzelkosten $K_{\text{Sondereinzelkosten}}$ sind auftragsbezogen und fallen individuell an. Ihre Verrechnung erfolgt auf das Los bezogen. Eine pauschale oder faktorielle Berücksichtigung erfolgt im Rahmensystem nicht.

5.7.6 Zeitliche Faktoren

5.7.6 Time-dependent Factors

In den zuvor genannten Definitionen und Entwicklungen sind folgende zeitliche Faktoren von essentieller Bedeutung:

- Einsatzdauer des Personals $t_{e,i}$,

- Belegungsdauer der Maschine t_{eM} ,
- Schnittzeit t_c ,
- Standzeit T und
- jährliche Maschinennutzungsdauer $t_{Nutzung}$.

Die Einsatzdauer des jeweiligen Personals $t_{e,i}$ und die jährliche Maschinennutzungsdauer $t_{Nutzung}$ sind Größen, welche in der Planung zunächst abgeschätzt werden müssen. Um eine gewissen Absicherung zu erreichen, erfolgt dies analog zu Kapitel 5.5 durch Erfahrungswissen.

Die Schnittzeit t_c und die Standzeit T ergibt sich aus der Bestimmung der Fertigungshistorie aus Kapitel 5.5 durch Interpolation und Extrapolation der entsprechenden Ergebnisse oder durch Angaben der Werkzeughersteller.

Komplizierter gestalten sich die Zusammenhänge bei der Belegungsdauer der Maschine t_{eM} . Sie ist eine Kombination aus geschätzten und berechneten bzw. ermittelten Zeiten. Sie ergibt sich aus der Summe der Grundzeit t_{Grund} , der Verteilzeit $t_{Verteil}$ und der Erholungszeit $t_{Erholung}$:

$$t_{eM} = t_{Grund} + t_{Verteil} + t_{Erholung} \tag{Gleichung 5.62}$$

Die Verteilzeit $t_{Verteil}$ und die Erholungszeit $t_{Erholung}$ sind Schätz- bzw. Erfahrungswerte. Sie können alternativ durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden:

$$t_{eM} = t_{Grund} * (1 + c_{Verteil} + c_{Erholung}) \tag{Gleichung 5.63}$$

Die Grundzeit t_{Grund} kann hingegen aus den ermittelten Ergebnissen der Prozessalternativen aus Kapitel 5.5 konkret berechnet werden:

$$t_{Grund} = t_h + t_n \tag{Gleichung 5.64}$$

$$t_h = n_{Schnitte} * (t_a + t_s + t_c + t_{ii}) = n_{Schnitte} * \frac{L}{v_f} \tag{Gleichung 5.65}$$

$$t_n = \frac{t_r}{n_{Los}} + \frac{t_w}{n_{Werkzeug}} + t_{Werkstück} + t_z + t_p \tag{Gleichung 5.66}$$

$$n_{Werkzeug} = \frac{T}{t_c} \tag{Gleichung 5.67}$$

Beeinflussende Größen sind die Hauptzeit t_h , die Nebenzeit t_n , die Anlaufzeit t_a , die Anschneidzeit t_s , die Schnittzeit t_c , die Überlaufzeit t_{ii} , die Rüstzeit t_r , die Werkzeugwechselzeit t_w , die Werkstückwechselzeit $t_{Werkstück}$, die Zustellzeit t_z , die Positionierungszeit t_p , der Vorschubweg L , die Vorschubgeschwindigkeit v_f , die Anzahl der Schnitte pro Werkstück und Werkzeug $n_{Schnitt}$, der Losgröße n_{Los} und der Anzahl der Werkzeugwechsel $n_{Werkzeug}$.

5.7.7 Berechnung der Herstellkosten einer Fertigungshistorie

5.7.7 Calculation of Manufacturing Cost for a Process Chain

Die Herstellkosten für eine Fertigungsverkettung werden in dem neu entwickelten Modul zur Berechnung der Herstellkosten einer Fertigungsverkettung aus der Summe der einzelnen Prozesskosten bestimmt:

$$K_{Fertigungswerkettung} = \sum_{j=1}^k \left[\left(\frac{V_{Min} * \rho * k_{Kilopreis} + n_z * k_{Schnitpreis} * c_{Verfahren}}{n} \right) * (c_{Gemein} + 1) + \frac{k_{Transport}}{n} + (c_{Rest} + 1) * (K_{Lohnkosten} + K_{Machinenkosten} + K_{Werkzeugkosten}) + K_{Sondereinzelkosten} \right] * (c_{Gewinn} + 1) \quad \text{Gleichung 5.68}$$

Eine Berücksichtigung der Toleranzen und des resultierenden Ausschusses erfolgt in Kapitel 5.8. Zur Berechnung der einzelnen Kostenfaktoren aus Gleichung 5.68 ist die Verrechnung der Fertigungstoleranzen und des dadurch erzeugten Ausschusses notwendig. Ziel des Rahmensystems ist die Kostenminimierung der Fertigungskette:

$$K_{optimale_Toleranzen} = \min | K_{Fertigungswerkettung} | \quad \text{Gleichung 5.69}$$

Zielgröße ist nicht die Minimierung der Toleranzen, sondern eine Minimierung der Herstellkosten. Große Toleranzen können durchaus auftreten, solange der erzeugte Ausschuss unter monetären und zeitlichen Gesichtspunkten akzeptabel ist. Ein bestimmtes Maß an Ausschuss kann unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten durchaus legitim sein, sofern hierdurch geringere Herstellkosten erzielt werden. Innerhalb dieser Arbeit wird in diesem Zusammenhang von einem **erlaubten Ausschuss** gesprochen. Da für die Toleranzen keine eindeutige Zielgröße (z.B. Minimum, Maximum) definiert werden kann, werden die Toleranzen zunächst als Variablen angenommen und in Kapitel 5.8 über die Berechnung des erlaubten Ausschusses und unter Berücksichtigung von Gleichung 5.69 berechnet.

5.8 Modul 8 - Benchmarking der Prozessalternativen

5.8 Module 8 - Benchmarking of Process Alternatives

Anhand der bisher entwickelten Methoden und Berechnungen liegen nun alle relevanten Parameter und Größen zur Bewertung einer Prozessalternative vor. Als Bewertungskriterien für das abschließende Benchmarking werden im Rahmensystem zur Auslegung von Fertigungsverkettungen

- der Ausschuss,
- die Herstellkosten und
- die Herstellzeiten

verwendet. Ein bestimmtes Maß an Ausschuss wird zugelassen, solange hierdurch ein ökonomischer Vorteil erreicht wird. Innerhalb dieser Arbeit wird in diesem Fall von **erlaubtem Ausschuss** gesprochen. Das Benchmarking beginnt mit dem Bestimmen des erlaubten Ausschusses gefolgt von der kostenoptimalen Bestimmung der Fertigungstoleranzen und dem eigentlichen Benchmarkingprozess. Abschließend wird die optimale Prozessalternative selektiert (Bild 5.30).

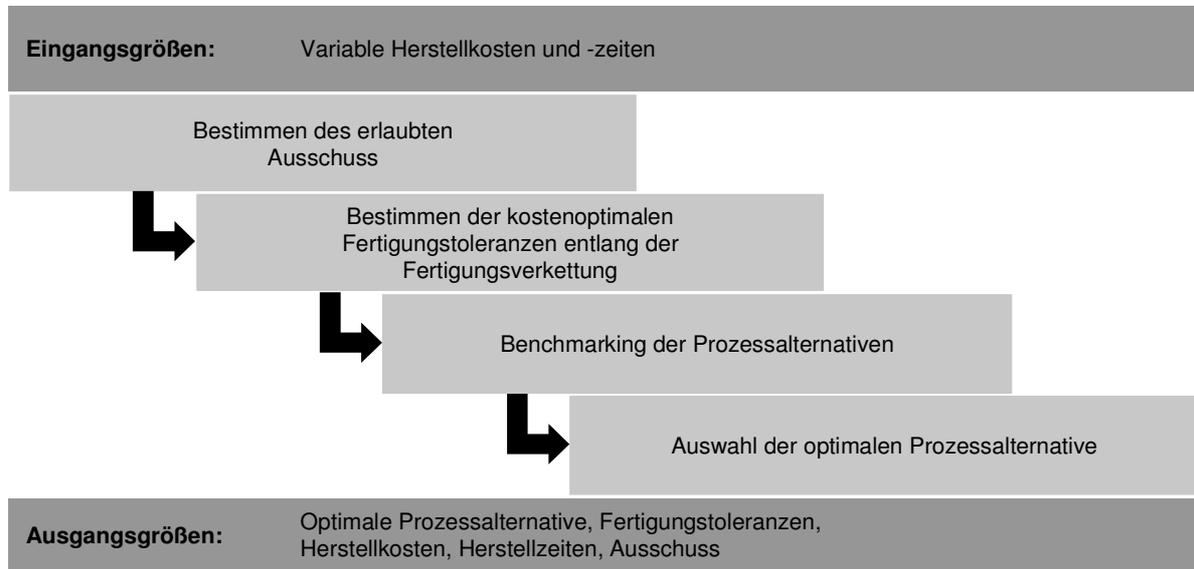


Bild 5.30: Ablaufdiagramm des Moduls „Benchmarking“

Figure 5.30: Description of the Module „Benchmarking“

5.8.1 Herstellkosten

5.8.1 Manufacturing Costs

Die Herstellkosten für die einzelnen Prozessalternativen ergeben sich aus der Summe der einzelnen Prozesskosten aus Kapitel 5.7:

$$K_{\text{Prozessalternative}, i} = K_{\text{Gesamtausschuss}} + \sum_{j=1}^k K_{\text{Herstellkosten}, j} \tag{Gleichung 5.70}$$

Da bisher aufgrund einer fehlenden Festlegung der Toleranzen noch kein Ausschuss berücksichtigt wurde, erfolgt dies nun im Folgenden. Als Ergebnis liegt je Prozessalternative eine quantifizierbare Größe, nämlich die Herstellkosten, vor.

5.8.2 Herstellzeiten

5.8.2 Manufacturing Times

Analog zu den Herstellkosten, ergeben sich aus der Summe der einzelnen Fertigungszeiten aus Kapitel 5.7.6 die Herstellzeiten je Prozessalternative unter Berücksichtigung der verlorenen Herstellzeiten durch die Produktion von Ausschuss $t_{\text{Gesamtausschuss}}$:

$$t_{\text{Prozessalternative},i} = t_{\text{Gesamtausschuss}} + \sum_{j=1}^k t_{eM,j} \tag{Gleichung 5.71}$$

Nicht berücksichtigt werden die notwendigen Zeiten für Handhabung, Transport, Vertrieb, Entwicklung und Lagerung. Im Rahmensystem liegen identische Fertigungsverkettungen vor. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich die genannten Zeiten zwischen den Prozessalternativen nicht verändern. Für eine vergleichende Bewertung der Prozessalternativen können diese Zeitanteile daher vernachlässigt werden, da sie kein Unterscheidungsmerkmal darstellen.

5.8.3 Ausschuss

5.8.3 Deficient Work Pieces

Es ist zu beachten, dass bisher noch keine Toleranzen entlang der Fertigungsverkettung für die einzelnen Prozessalternativen festgelegt wurden. Dies ist, wie in Kapitel 5.3 ausgeführt, bewusst erfolgt, um die Toleranzen in Abstimmung mit den Herstellkosten festzulegen. Im Folgenden wird eine neu entwickelte Methode vorgestellt, wie nun für die einzelnen Fertigungsprozesse die Toleranzbreite anhand des erlaubten Ausschusses berechnet wird. Hierbei gilt, dass die technische Forderung einen stabilen Fertigungsprozess zu erhalten, bei gleichzeitiger Auslegung der größtmöglichen Toleranzen, erfüllt sein muss. Anhand Gleichung 5.72 ergibt sich der prozentuale Ausschuss bei Betrachtung von normalverteilt streuenden Fertigungsprozessen als $P_{\text{Ausschuss}}$:

$$P_{\text{Ausschuss}} = 2 \left[1 - \Phi \left(\frac{F_{\text{Toleranz}}}{\sigma} \right) \right] = 2 \left[1 - \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{F_{\text{Toleranz}} - \mu}{\sigma} \right)^2}{2\sigma^2}} \right] \tag{Gleichung 5.72}$$

Hierbei ist F_{Toleranz} die Toleranzfeldbreite und Φ die Funktion der Normalverteilung. Löst man die Gleichung 5.72 nach der Toleranzfeldbreite F_{Toleranz} auf, so ergibt sich die mögliche Toleranzfeldbreite unter Vorgabe des erlaubten Ausschusses $P_{\text{Ausschuss}}$:

$$F_{\text{Toleranz}} = \left| -\sigma^2 \sqrt{2 \ln \left[\left(1 - \frac{P_{\text{Ausschuss}}}{2} \right) \sigma \sqrt{2\pi} \right]} - \sigma \mu \right| \tag{Gleichung 5.73}$$

Anhand des erlaubten Ausschusses ist somit eine Bestimmung der Toleranzen entlang der Prozessalternativen möglich. Dies wird im Folgenden erläutert.

Der erlaubte Ausschuss hängt insbesondere von 2 Faktoren ab:

- dem Einfluss des betrachteten Fertigungsprozesses auf die Produktzwecke und
- die bisher entstandene Wertschöpfung am Werkstück.

Ein Fertigungsprozess, welcher maßgeblich den Produktzweck bestimmt, wird in dem entwickelten Modul entsprechend enger toleriert als andere Prozesse. Genauso wird bei Fertigungsprozessen am Beginn der Fertigungsverkettung ein höherer Ausschuss zugelassen, da hier, im Gegensatz zu den letzten Prozessen einer Fertigungsverkettung, noch keine hohen Kosten durch die Wertschöpfung entstanden sind.

Die Wertschöpfung bis zum betrachteten Fertigungsprozess wird aus der Summe der Einzelprozesskosten und dem bisherigen Ausschuss berechnet:

$$K_{\text{Wertschöpfung},n} = \left(1 + \sum_{j=1}^n P_{\text{Ausschuss},j} \right) \sum_{j=1}^n K_{\text{Herstellkosten},j} \quad \text{Gleichung 5.74}$$

Beginnend mit dem ersten Prozess einer Fertigungsverkettung werden somit iterativ der erlaubte Ausschuss und die entstehenden Kosten je Fertigungsprozess n der Prozessalternativen berechnet. Beim letzten Prozess einer Prozessalternative gilt:

$$K_{\text{Wertschöpfung}} = K_{\text{Prozessalternative}} \quad \text{Gleichung 5.75}$$

Analog erfolgt dies für die Herstellzeiten.

Den Einfluss des Fertigungsprozesses auf die Produktzwecke wird durch die entwickelte Methode zur Gewichtung der Konstruktionsanforderungen unmittelbar berechnet. Quantitativ erfolgt dies mit Hilfe von Gleichung 5.15. Der daraus resultierende Gewichtungsfaktor $g_{pn,n}$ je Fertigungsprozess berücksichtigt einerseits den Einfluss des Fertigungsprozesses auf das Werkstück und andererseits die Wichtigkeit des bearbeiteten Werkstückmerkmals im Hinblick auf die Erfüllung des Produktzwecks. Zur Bestimmung des erlaubten Ausschusses je Fertigungsprozess stehen somit drei quantitative Bewertungskriterien zur Verfügung:

- Einfluss des Fertigungsprozesses auf den Produktzweck durch den Gewichtungsfaktor $g_{pn,n}$
- die bisher entstandene Wertschöpfung $K_{\text{Wertschöpfung},n}$
- die bisher verursachte Herstellzeit $t_{\text{Wertschöpfung},n}$

Im entwickelten Rahmensystem werden drei verschiedene Klassen von Fertigungsprozessen unterschieden: der Startprozess, die Fertigungsverkettungsprozesse und der Endprozess. Der Startprozess ist der erste Prozess einer Fertigungsverkettung. Hier ist bisher noch keine Wertschöpfung und Herstellzeit entstanden. Der Endprozess ist der letzte Prozess einer Fertigungsverkettung. Er erzeugt die finalen Werkstücktoleranzen, welche durch die Konstruktionsanforderungen fest vorgegeben sind. Ebenso werden durch ihn die endgültigen Wertschöpfungskosten und –zeiten festgelegt. Die Fertigungsverkettungsprozesse sind die restlichen Prozesse einer Fertigungsverkettung. Durch sie steigt die Wertschöpfung. Die Toleranzen sind jedoch – wie auch beim Startprozess – variabel.

Die neu entwickelte Methode zur Auslegung der Fertigungstoleranzen erfolgt je nach Prozessklasse auf eine andere Art und Weise:

Startprozess

Als einziges Bewertungskriterium kann die Gewichtung $g_{pn,n}$ herangezogen werden. Es gilt:

$$1 \geq g_{pn,n} > 0 \quad \text{Gleichung 5.76}$$

Je größer $g_{pn,n}$ ist, desto größer ist der Einfluss des Fertigungsprozesses auf den Produktzweck. Für den erlaubten Ausschuss $P_{\text{Ausschuß},n}$ wird festgelegt:

$$\text{sicherheitskritische Bauteile: } P_{\text{Ausschuss},n} = 0 \quad \text{Gleichung 5.77}$$

$$\text{nicht sicherheitskritische Bauteile: } P_{\text{Ausschuss},n} = 0,15 * [1 - g_{pn,n}] \quad \text{Gleichung 5.78}$$

Auf diese Weise wird ein maximaler Ausschuss von 15 Prozent zugelassen. Der Ausschuss könnte ebenso geringer oder höher angenommen werden. Durch das spätere Benchmarking kürzt sich dieser heraus.

Fertigungsverkettungsprozesse

Hier werden nun die Gewichtungen $g_{pn,n}$, die Wertschöpfungskosten $K_{\text{Wertschöpfung},n}$ und die Wertschöpfungszeit $t_{\text{Wertschöpfung},n}$ zur Bestimmung des erlaubten Ausschuss herangezogen. Gleichung 5.77 gilt auch in diesem Fall.

Der erlaubte Ausschuss $P_{\text{Ausschuß},n}$ wird wie folgt berechnet:

$$\text{sicherheitskritische Bauteile: } P_{\text{Ausschuss},n} = 0 \quad \text{Gleichung 5.77}$$

nicht sicherheitskritische Bauteile:

$$P_{\text{Ausschuss},n} = 0,15 * [1 - g_{pn,n}] * \frac{K_{\text{Wertschöpfung},n-1}}{K_{\text{Wertschöpfung},n}} * \frac{t_{\text{Wertschöpfung},n-1}}{t_{\text{Wertschöpfung},n}} \quad \text{Gleichung 5.79}$$

Eine hohe verursachte Wertschöpfung wird auf diese Weise bei der Toleranzfestlegung berücksichtigt und kompensiert. Je höher die erzeugte Wertschöpfung ist, desto geringer ist der erlaubte Ausschuss.

Endprozess

Das einzige Bewertungskriterium des Endprozesses sind die durch die Konstruktion festgelegten Produkttoleranzen. Der erlaubte Ausschuss wird entsprechend durch Gleichung 5.72 berechnet.

Die endgültigen Wertschöpfungskosten $K_{\text{Wertschöpfung}}$ und Wertschöpfungszeiten $t_{\text{Wertschöpfung}}$ ergeben sich nach Gleichung 5.77 und 5.79. Daraus wird nun der Gesamtausschuss je Prozessalternative $P_{\text{Prozessalternative},i}$ berechnet:

$$P_{\text{Prozessalternative},i} = \sum_{j=1}^k \prod_{m=1}^j P_{\text{Ausschuss},m} \tag{Gleichung 5.80}$$

Gleichung 5.80 summiert die Ausschüsse der einzelnen Fertigungsprozesse entlang der Fertigungsverkettung. Hierbei wird berücksichtigt, dass die erzeugten Ausschussteile bereits nach Identifikation als Ausschuss aussortiert werden und nicht die gesamte Fertigungsverkettung durchlaufen. Liegt somit nach einem Fertigungsprozess ein Ausschuss vor, gelangt dieser nicht in den nächsten Fertigungsprozess. Sofern keine 100%-Überprüfung der Werkstücke realisiert ist, muss dies in Gleichung 5.80 entsprechend berücksichtigt werden.

5.8.4 Benchmarking

5.8.4 Benchmarking

Die Fertigungstoleranzen sind somit bestimmt worden und alle relevanten Größen für ein Benchmarking der Prozessalternativen erzeugt worden. Das abschließende Benchmarking erfolgt in zwei Schritten:

Zunächst werden Schwellenwerte festgelegt. Dies sind z.B. maximale Herstellkosten oder maximale Herstellzeiten. Anhand dieser Werte erfolgt eine erste K.O.-Bewertung der Prozessalternativen. Alle Prozessalternativen, die die Schwellenwerte über- oder unterschreiten, werden aussortiert.

Alle verbleibenden Prozessalternativen genügen den definierten Anforderungen. Sie wären somit alle praktikabel und einsetzbar. Dennoch erfolgt durch das Rahmensystem eine weitere Selektion der Alternativen anhand von Rankings und Alternativenvergleichen, da bisher noch keine Bestimmung der optimalen Prozessalternative erfolgt ist. Es wurde lediglich die technische Machbarkeit bewertet. Es stehen insgesamt drei Rankings der Prozessalternativen zur Verfügung:

- Herstellkosten,
- Herstellzeiten und
- Gesamtausschuss.

Je nach Priorität kann wahlweise direkt eine Selektion der besten Prozessalternative anhand der vorliegenden Rankings erfolgen oder alle drei Größen werden normiert und die Prozessalternativen direkt durch Überlagerung miteinander verglichen (*Bild 5.31*).

Die Normierung erfolgt anhand der Maximalwerte:

$$K_{\text{Prozessalternative,normiert},i} = \frac{K_{\text{Prozessalternative},i}}{\max_j |K_{\text{Prozessalternative},j}|} * 100\% \tag{Gleichung 5.81}$$

$$t_{\text{Prozessalternative,normiert},i} = \frac{t_{\text{Prozessalternative},i}}{\max_j |t_{\text{Prozessalternative},j}|} * 100\% \tag{Gleichung 5.82}$$

$$P_{\text{Prozessalternative, normiert}, i} = \frac{P_{\text{Prozessalternative}, i}}{\max_j |P_{\text{Prozessalternative}, j}|} * 100\% \quad \text{Gleichung 5.83}$$

Eine Selektion ist dann manuell durch den Fertigungsplaner möglich.

Die vorherigen Entwicklungen und Überlegungen zeigen, dass eine quantifizierbare Korrelation zwischen Herstellkosten und Fertigungstoleranzen besteht. Ebenso zeigt die entwickelte Methode, dass die Fertigungstoleranzen erst in den späten Planungsphasen – nach Planung der Fertigungsverkettung – kostenoptimal festgelegt werden können. Die Teilthese 4 „Es besteht eine quantifizierbare Korrelation zwischen Herstellkosten und Fertigungstoleranzen“ und Teilthese 5 „Die Fertigungstoleranzen lassen sich auch erst nach abgeschlossener Untersuchung und Planung der Fertigungsverkettung kostenoptimal festlegen“ sind somit bewiesen.

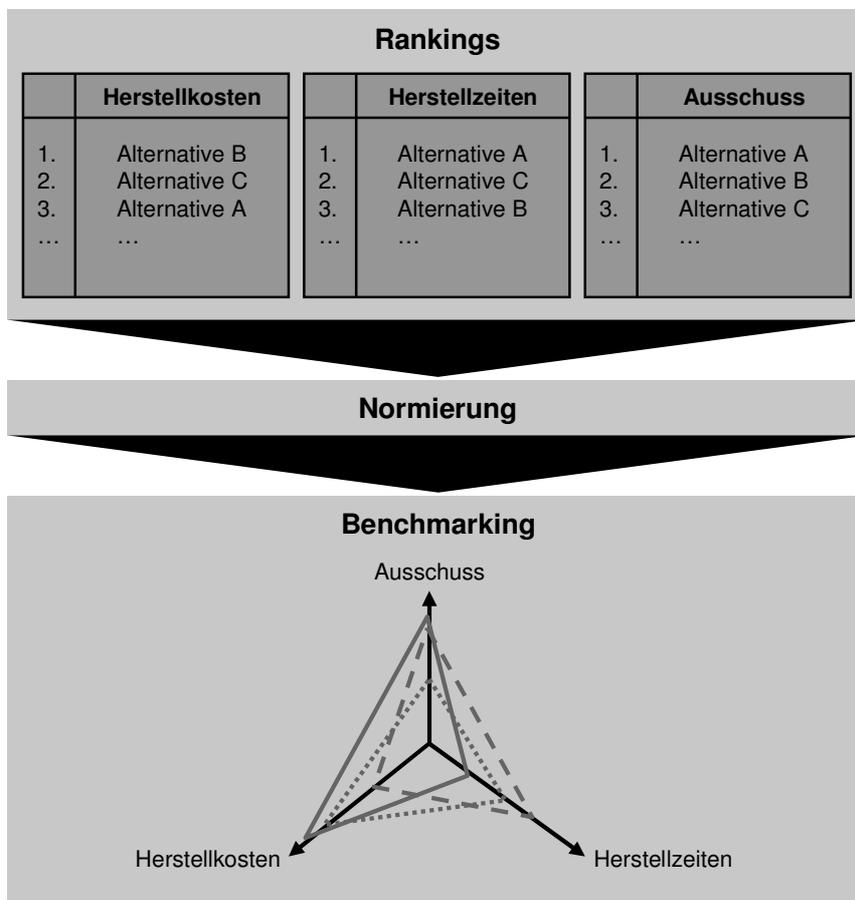


Bild 5.31: Benchmarking durch Ranking und Vergleich

Figure 5.31: Benchmarking by Ranking and Comparison

5.9 Zwischenfazit

5.9 Intermediate Results

In den vorherigen Kapiteln wurde aufgezeigt, dass ein unmittelbarer Einfluss zwischen Produktzwecken, eingesetzten Fertigungsprozessen, Fertigungstoleranzen, Herstellkosten, Herstellzeiten und Ausschuss besteht.

Beginnend mit der Verknüpfung von Fertigungsprozessen mit den durch die Konstruktion definierten Werkstückmerkmalen, Werkstückeigenschaften, Produktfunktionalitäten und Produktzwecken wurde der Grundstein für eine Toleranz- und Kostenbewertung von Prozessalternativen geschaffen. Im Folgenden wurden die Fertigungsverkettungen aufgebaut und anhand variierender Prozessparameter entsprechende Prozessalternativen hergeleitet. Durch eine Reduktion wurde die Anzahl der zu untersuchenden Prozessalternativen auf ein praktikables Maß gebracht, um anschließend durch eine gezielte Anbindung eines Wissensmanagementsystems Teile der Fertigungshistorie der einzelnen Prozessalternativen zu bestimmen. Die Fertigungshistorie wurde für die Identifikation von Risikoprozessen herangezogen, um selbige zu eliminieren. Die weitere Kostenberechnung diente als grundlegendes Bewertungskriterium für das abschließende Benchmarking der Prozessalternativen hinsichtlich Herstellkosten, Herstellzeiten und Ausschuss.

Die in Kapitel 3 aufgestellten Teilthesen wurden alle bewiesen, so dass daraus folgernd auch die Hauptthese

Eine kostenoptimale und prozessstabile Auslegung von Fertigungstoleranzen entlang der Fertigungsverkettung kann auch noch nach Festlegung der Fertigungsparameter in der Produktentwicklungsphase unter Berücksichtigung von Erfahrungswissen erfolgen.

nachgewiesen ist.

6 Entwicklung eines Software-Demonstrators

6 Development of a Software-Demonstrator

Zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit des entwickelten Rahmensystems zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen wurden die einzelnen Module in einer Statistik- und Simulationssoftware anhand von realen Versuchs-, Simulations- sowie Erfahrungsinformationen überprüft. Der Ansatz wurde in einem modularen Software-Konzept bestehend aus den Software-Plattformen Microsoft Excel, Minitab R14 und Elements Environment umgesetzt (*Bild 6.1*). Minitab R14 ist eine Software zur Versuchsplanerstellung, -auswertung und -simulation. Elements Environment ist eine regelbasierte Programmiersprache. Die Module „Charakterisierung“, „Generierung der Prozessalternativen“, „Bestimmung der Fertigungskosten“ und „Benchmarking der Prozessalternativen“ wurden in Microsoft Excel überprüft, während die Berechnungen innerhalb des Moduls „Reduktion der Prozessalternativen“ anhand der aus Modul 3 gewonnenen Daten mit Hilfe der Software Minitab simuliert wurden. Die Simulation der mathematischen Zusammenhänge in den Modulen „Ermittlung der Fertigungshistorie“ und „Identifikation von Risikoprozessen“ erfolgte mit Minitab. Das Modul „Generierung der Fertigungsverkettung“ ist Teil vorangegangener Entwicklungen von Fallböhrer [FALL00] und Trommer [TROM01].

1. Charakterisierung	Microsoft Excel
2. Generierung der Fertigungsverkettung	Elements Environment (existierende Lösung: INNOTECH, ProChain)
3. Generierung der Prozessalternativen	Microsoft Excel
4. Reduktion der Prozessalternativen	Minitab R14
5. Ermittlung der Fertigungshistorie	Minitab R14, Microsoft Excel
6. Identifikation von Risikoprozessen	Minitab R14, Microsoft Excel
7. Bestimmung der Fertigungskosten	Microsoft Excel
8. Benchmarking der Prozessalternativen	Microsoft Excel

Bild 6.1: Umsetzung der Konzeptmodule in einem Software-Demonstrator

Figure 6.1: Realisation of the Concept Modules in a Software-Demonstrator

Im Folgenden wird exemplarisch für ein Lager die Funktionsweise aufgezeigt. Als Werkstück wird die Welle mit eingebrachtem inneren Lagersitz aus *Bild 6.2* verwendet. Die Welle besteht aus einem Wälzlagerstahl 1.3505, was der früheren Bezeichnung 100Cr6 entspricht. Neben mehreren geometrischen Anforderungen sowie geometrischen Toleranzen werden eine

maximale Rauigkeit des Lagersitzes von $R_z = 0,15 \mu\text{m}$ und eine minimale Oberflächenhärte von 59 HRC gefordert.

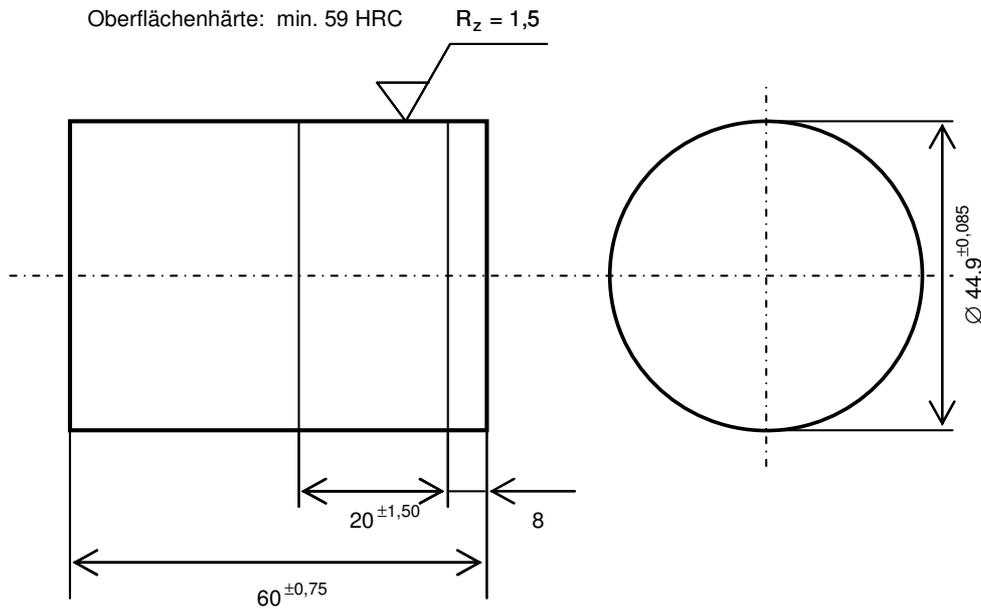


Bild 6.2: Beispielbauteil

Figure 6.2: Case Study

Als Basis für die weiteren Betrachtungen wurden zunächst analog Kapitel 5.1 die Produktzwecke, -funktionalitäten, Werkstückeigenschaften und -merkmale sowie die zu berücksichtigenden Fertigungsverfahren festgelegt und in den Software-Demonstrator eingegeben (Bild 6.3). Die Wirkungszusammenhänge dieser Größen wurden ebenso definiert (Bild 6.4).

1. Charakterisierung von Produkt und Fertigungsprozessen

Produktname: Lager

Produktzwecke: Rotatorische Bewegung, Fixierung

Produktfunktionalitäten: Verschleißreduktion, Geräuschreduktion, Kraftminimierung

Eigenschaften: Minimaler Rollwiderstand, geringe Unwucht, -

Fertigungsprozesse: Härten, Sägen, Drehen, Glattwalzen

Name	Wert	Einheit
Durchmesser D	44,9	mm
D_Toleranz	0,085	mm
Länge L	60	mm
L_Toleranz	0,75	mm
Rauigkeit Rz	1,5	μm
Oberflächenhärte	59	HRC
-		

Wirkmatrix:

	Härten	Sägen	Drehen	Glattwalzen
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

OK

Bild 6.3: Produktklassifizierung

Figure 6.3: Product Classification

Bei den restlichen drei Prozessen werden folgende Prozessparameter angesetzt (Bild 6.6):

- *Sägen*: Schnittgeschwindigkeit $v_c = 125$ m/min, Vorschub $f = 0,5$ mm
- *Drehen*: Schnittgeschwindigkeit $v_c = 140$ m/min, Vorschub $f = 0,08 - 0,16$ mm, Schnitttiefe $a_p = 0,15$ mm, Werkzeug: Seco DNMG160412 CBN 10
- *Hartglattwalzen*: Kugeldurchmesser $d = 3 - 6$ mm, Mediumdruck $p = 100 - 400$ bar

Stellgrößen	Bezeichnung	Einheit	Startwert	Endwert	Intervalle	Intervallgröße
Härten	Temperatur	°	840	840	1	0,0000
	Härtedauer	min	20	23	2	1,5000
			0	0	1	0,0000
Sägen	Schnittgeschwindigkeit	m/min	95	95	1	0,0000
	Vorschub	mm	0,5	0,5	1	0,0000
			0	0	1	0,0000
Drehen	Schnittgeschwindigkeit	m/min	130	140	2	5,0000
	Vorschub	mm	0,08	0,16	6	0,0133
	Schnitttiefe	mm	0,15	0,15	1	0,0000
Glattwalzen	Kugeldurchmesser	mm	3	6	2	1,5000
	Druck	bar	100	400	3	100,0000
			0	0	1	0,0000

Bild 6.6: Definition der Prozessstellgrößen

Figure 6.6: Definition of the Process Actuating Values

Der daraus abgeleitete vollfaktorielle Variantenplan würde unter Berücksichtigung einer statistischen Absicherung und den durch den Software-Demonstrator berechneten Intervallgrößen 720 Alternativen ergeben, um die resultierenden Veränderungen der Werkstückmerkmale durch die Fertigungsprozesse zu ermitteln. Gemäß der beschriebenen Methode aus Kapitel 5.4 erfolgt daher zunächst eine Reduktion der Varianten auf einen teilfaktoriellen Variantenplan und die Ermittlung der restlichen Variantenwerte durch eine Regressionsanalyse. Im vorliegenden Fall erfolgte eine Reduktion auf 17 Varianten. Eingesetzt wird hierzu die Software Minitab R14 zur Erstellung und Auswertung von Variantenplänen. Hierbei wurden folgende Daten und Informationen herangezogen:

- *Härten*: Drei verschiedene Werkstückoberflächenhärten von 56,5, 59 und 61,5 HRC
- *Sägen*: Anhand von Erfahrungswerten wurde die Längenabweichung mit ungefähr 0,5 mm bestimmt.
- *Drehen*: Die resultierende Oberflächenrauigkeit und Durchmesserschwankungen (Δd_{Passiv} , $\Delta d_{\text{Schnitt}}$, $\Delta d_{\text{Vorschub}}$) wurden durch ein analytisches Simulationsmodell ermittelt (Bild 6.7) [BREC06]. Das Modell basiert auf der mechanischen Festigkeitslehre und berechnet die Werkstückdurchbiegungen anhand eines Spannungstensors \overline{G} .

- *Hartglattwalzen*: Überprüfung anhand experimenteller Versuche, welche durch die in Kapitel 5.4 vorgestellte Methode reduziert und anschließend einer Regressionsanalyse unterzogen wurden (Kapitel 9.3 und 9.4) [MADE07].

Bild 6.7 zeigt das analytische Modell zur Berechnung der Werkstückbiegung und der Oberflächenrauigkeit beim Drehprozess. Das analytische Modell basiert auf den Grundlagenberechnungen eines mechanischen Biegebalkens.

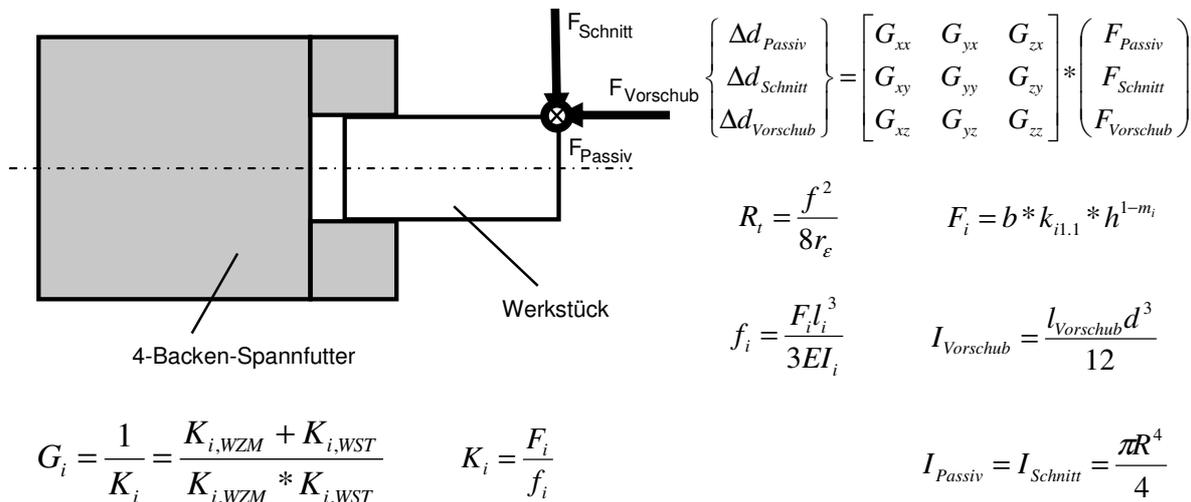


Bild 6.7: Analytisches Modell zur Berechnung der Werkstückbiegung und Oberflächenrauigkeit beim Drehprozess (nach [BREC06])

Figure 6.7: Analytical Model for the Calculation of Work Piece Deformation and Surface Roughness during Turning (according to [BREC06])

Die vorliegenden Versuchswerte zum Hartglattwalzen wurden einer DoE-Analyse unterzogen. Betrachtet wurden hierbei die Einflüsse des Werkzeugdurchmessers, der Werkstückhärte, der Werkstückrauigkeit, der Werkstückdurchmesserabweichung und des Walzdruckes auf die Werkstückrautiefe R_z . Weiterhin wurden die Einflüsse aus Wechselwirkungen zwischen den genannten Einflussgrößen analysiert. Es zeigte sich, dass in dem vorliegenden Versuchsfall der Werkzeugdurchmesser den größten Einfluss auf die Rauigkeit R_z hat.

Mit den nun vorliegenden Erkenntnissen und anhand der Ergebnisse aus den Praxisversuchen und Simulationen sowie unter Berücksichtigung von Erfahrungswissen wird analog zu Kapitel 5.5 die Fertigungshistorie bestimmt und die Prozessalternativen mit ihren Prozessgrößen festgelegt.

Als Risikoprozesse werden einige Prozessvarianten des Härten, des Drehens und des Hartglattwalzens identifiziert:

- *Härten*: Die erreichte Härte von 56,5 HRC genügt nicht der Produkthanforderung, so dass diese Variante aussortiert werden kann.
- *Drehen*: Anhand des analytischen Modells in Bild 6.7 ergibt sich bei einem Vorschub $f = 0,16$ mm eine maximale Durchmesserabweichung von 0,085 mm aufgrund von

Werkstück- und Maschinenverformung. Diese Variante kann ebenso aussortiert werden.

- *Hartglattwalzen*: Aufgrund der Praxisversuche kommen nur einige Varianten für die weiteren Betrachtungen in Frage, da die benötigte gemittelte Rauhtiefe $R_z = 1,5 \mu\text{m}$ sonst nicht erreicht wird. Eine detaillierte Auflistung ist in Kapitel 9.3 dargestellt.

Es verbleiben lediglich folgende vier Prozessalternativen, welche alle in der Lage sind, die geforderten Werkstückmerkmale zu fertigen:

- Alternative A:
 - *Härten*: **59 HRC**
 - *Sägen*: $v_c = 125 \text{ m/min}$; $f = 0,5 \text{ mm}$
 - *Drehen*: $v_c = 140 \text{ m/min}$; $f = 0,08 \text{ mm}$; $a_p = 0,15 \text{ mm}$
 - *Hartglattwalzen*: $d = 3 \text{ mm}$; **$p = 100 \text{ bar}$**
- Alternative B:
 - *Härten*: **61,5 HRC**
 - *Sägen*: $v_c = 125 \text{ m/min}$; $f = 0,5 \text{ mm}$
 - *Drehen*: $v_c = 140 \text{ m/min}$; $f = 0,08 \text{ mm}$; $a_p = 0,15 \text{ mm}$
 - *Hartglattwalzen*: $d = 3 \text{ mm}$; **$p = 100 \text{ bar}$**
- Alternative C:
 - *Härten*: **59 HRC**
 - *Sägen*: $v_c = 125 \text{ m/min}$; $f = 0,5 \text{ mm}$
 - *Drehen*: $v_c = 140 \text{ m/min}$; $f = 0,08 \text{ mm}$; $a_p = 0,15 \text{ mm}$
 - *Hartglattwalzen*: $d = 3 \text{ mm}$; **$p = 400 \text{ bar}$**
- Alternative D:
 - *Härten*: **61,5 HRC**
 - *Sägen*: $v_c = 125 \text{ m/min}$; $f = 0,5 \text{ mm}$
 - *Drehen*: $v_c = 140 \text{ m/min}$; $f = 0,08 \text{ mm}$; $a_p = 0,15 \text{ mm}$
 - *Hartglattwalzen*: $d = 3 \text{ mm}$; **$p = 400 \text{ bar}$**

Für diese Alternativen gilt es, analog zu Kapitel 5.7 die Herstellkosten zu berechnen. Anhand der aus den Simulationen und Versuchen gewonnenen Daten berechnen sich die Herstellkosten und Fertigungstoleranzen entlang der Prozesskette bei einer Losgröße von 200 Stück wie folgt:

- Alternative A: $K_{\text{Los}} = \text{€ } 4.332,57,-$; $t_{\text{Werkstück}} = 14,04 \text{ min}$; $P_{\text{Ausschuss}} = 0,75 \%$
 - *Härten*: $59,5^{\pm 0,5} \text{ HRC}$
 - *Sägen*: $l = 60^{\pm 0,7} \text{ mm}$
 - *Drehen*: $d = 44,95^{\pm 0,8} \text{ mm}$
 - *Hartglattwalzen*: $R_z = 1,5^{-0,08} \mu\text{m}$
- Alternative B: $K_{\text{Los}} = \text{€ } 4.906,49,-$; $t_{\text{Werkstück}} = 15,21 \text{ min}$; $P_{\text{Ausschuss}} = 0,01 \%$
 - *Härten*: $61,5^{\pm 2,5} \text{ HRC}$
 - *Sägen*: $l = 60^{\pm 0,7} \text{ mm}$
 - *Drehen*: $d = 44,95^{\pm 0,8} \text{ mm}$
 - *Hartglattwalzen*: $R_z = 1,5^{-0,08} \mu\text{m}$

- Alternative C: $K_{Los} = € 4.332,57.-$; $t_{Werkstück} = 14,04 \text{ min}$; $P_{Ausschuss} = 0,75 \%$
 - Härten: $59,5^{\pm 0,5} \text{ HRC}$
 - Sägen: $l = 60^{\pm 0,7} \text{ mm}$
 - Drehen: $d = 44,95^{\pm 0,8} \text{ mm}$
 - Hartglattwalzen: $R_z = 1,5^{-0,08} \mu\text{m}$
- Alternative D: $K_{Los} = € 4.906,49.-$; $t_{Werkstück} = 15,21 \text{ min}$; $P_{Ausschuss} = 0,01 \%$
 - Härten: $61,5^{\pm 2,5} \text{ HRC}$
 - Sägen: $l = 60^{\pm 0,7} \text{ mm}$
 - Drehen: $d = 44,95^{\pm 0,8} \text{ mm}$
 - Hartglattwalzen: $R_z = 1,5^{-0,08} \mu\text{m}$

Dabei unberücksichtigt blieben erhöhte Stromkosten bei der Erzeugung von 400 bar Walzdruck im Vergleich zu 100 bar Walzdruck. Die Alternativen A und C sowie B und D führen daher zu einem gleichen Ergebnis. Die abschließende Benchmarkingprozess ergibt folgende Resultate (Bild 6.8):

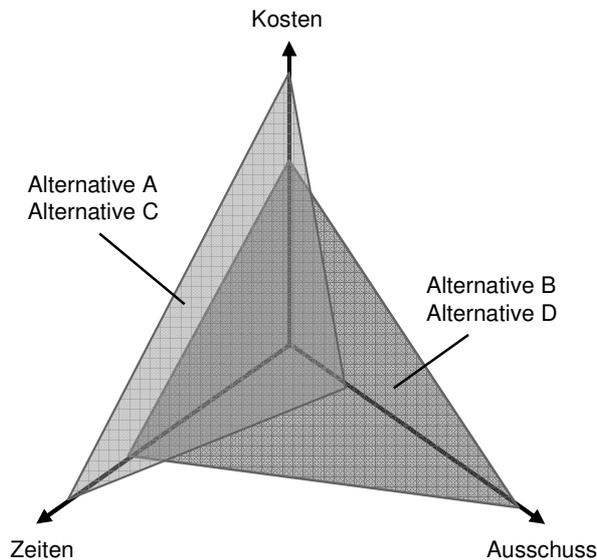


Bild 6.8: Benchmarking der Prozessalternativen

Figure 6.8: Benchmarking of Process Alternatives

Die Funktionsweise des methodischen Systems zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen ist somit anhand des Fallbeispiels (Bild 6.2) mit positivem Ergebnis überprüft worden. Die Auswahl der besten Alternative anhand der Benchmarkingergebnisse richtet sich nun nach den unternehmensspezifischen Randbedingungen. Aus kosten- und zeitoptimaler Sicht sind die Alternative A und C zu bevorzugen. Handelt es sich um ein sicherheitskritisches Bauteil kommen lediglich die Alternativen B und D in die Auswahl. Wird weiterhin angenommen, dass die Alternativen C und D zu einem erhöhten Stromverbrauch aufgrund des höheren Walzdruckes beim Hartglattwalzen führen, so können diese beiden Alternativen ausgeschlossen werden. Die endgültige Entscheidung ist vom Anwender zu treffen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es nachzuweisen, dass eine optimale Festlegung der Fertigungstoleranzen entlang der Fertigungsverkettung durch eine gezielte frühzeitige, kostenoptimale und prozessstabile Fertigungsplanung erreicht werden kann. Dies erfolgte durch die Entwicklung eines Rahmensystems zur kostenoptimalen und prozessstabilen Auslegung von Fertigungsverkettungen ohne vorherige Festlegung der Fertigungstoleranzen entlang der Fertigungshistorie.

Das Rahmensystem beginnt mit der Verknüpfung von konstruktiven Vorgaben mit konkreten Fertigungsprozessen. Es wurde ein neues Modell entwickelt, welches die ausgewählten Fertigungsprozesse und deren Einfluss explizit über die Definition von Produktfunktionalitäten, Werkstückeigenschaften und Werkstückmerkmalen mit den vorgegebenen Produktzwecken verbindet und anhand ihrer Wichtigkeit für die Erfüllung des Produktzweckes gewichtet.

Aufbauend auf den Methoden nach Fallböhrer [FALL00] und Trommer [TROM01] wurde anhand der ausgewählten Fertigungsprozesse eine grundlegende Fertigungsverkettung generiert. Diese Fertigungsverkettung diente in den nachfolgenden Systemmodulen als Grundlage für die Erzeugung von Prozessalternativen.

Die Prozessalternativen bestehen aus denselben Fertigungsprozessen, welche sich allerdings anhand ihrer Prozessparameter bzw. Stellgrößen unterscheiden. Da die Variation der Stellgrößen in den erlaubten Bandweiten zu einer sehr großen Anzahl an Prozessalternativen führt, wurde zunächst ein neues Modell zur Alternativenreduktion aufgezeigt. Dieses Modell basiert auf der Methode des „Design of Experiments“ und reduziert die vorliegenden Versuchspläne.

Anhand dieser Pläne werden im Folgenden die Einflüsse der Fertigungsprozesse und deren Stellgrößen auf die Werkstückmerkmale ermittelt. Hierzu wurde erstmals eine Schnittstelle zu einem umfassenden fertigungsorientierten Technologie-Wissensmanagement-System geschaffen. Auf diese Weise können die benötigten Größen aufbauend auf bereits bestehendem Technologiewissen ermittelt werden. Dies kann anhand von Praxisversuchen, Simulationen, Expertenwissen etc. erfolgen.

Da die ermittelten Größen teilweise eine Streuung aufweisen, welche einen direkten Einfluss auf die entstehenden Kosten hat, wurde diese in den weiteren Schritten erstmals explizit berücksichtigt. Anhand der resultierenden Streuungen und Werkstückzwischenzustände ist im Folgenden eine Methode zur Identifikation von Risikoprozessen vorgestellt worden. Hierunter fallen solche Fertigungsprozesse bzw. Prozessalternativen, welche anhand keiner nachvollziehbaren Gesetzmäßigkeit streuen. In diesen Fällen ist davon auszugehen, dass der Fertigungsprozess instabil läuft und keine reproduzierbaren Prozessergebnisse erzielt werden können. Ebenso fallen hierunter solche Prozessalternativen, welche zu einem nicht mehr weiter bearbeitbarem Werkstückzwischenzustand (Ausschuss) innerhalb der Fertigungshistorie führen.

Die restlichen Prozessalternativen sind somit durchführbar und erzielen die konstruktiv vorgegebenen Produkthanforderungen. Sie unterscheiden sich lediglich durch die entstehenden Kosten und Fertigungszeiten, weswegen im Folgenden quantitativ, anhand des Technologie-

wissens aus der Ermittlung der Werkstückzwischenzustände, die einzelnen Herstellkosten und Fertigungszeiten berechnet werden. Wesentlichen Einfluss auf die Kosten und Zeiten hat der erlaubte Ausschuss. Durch Festlegung einer Maximalgrenze – alternativ für den Ausschuss, die Kosten und/ oder die Fertigungszeit – erfolgt dann eine Berechnung bzw. Ermittlung der einzelnen erlaubten Toleranzen entlang der Fertigungshistorie.

Das abschließende, neu entwickelte Benchmarking der Prozessalternativen erlaubt eine quantifizierte Gegenüberstellung der Alternativen unter den drei wichtigsten Auswahlkriterien Kosten, Zeiten und Ausschuss. Als Hilfsmittel wird der Einfluss der Fertigungsprozesse auf die geforderten Produktzwecke und –funktionalitäten herangezogen.

Aufbauend auf dem entwickelten Rahmensystem können im Weiteren ergänzende Fertigungsverfahren eingebunden werden. Dies umfasst die restlichen Verfahrensgruppen nach DIN 8580 [DIN8580]. Da in der Zukunft verstärkt auch der schonende Einsatz von Ressourcen in den Vordergrund tritt, ist eine Einbindung von weiteren Bewertungskriterien, wie beispielsweise Energie- und Materialverbrauch sowie dem Menschen als Ressource, denkbar und viel versprechend. Als wesentliches Kernelement des entwickelten Rahmensystems kristallisiert sich die Schnittstelle zu einem Technologie-Wissensmanagement-System heraus. Ein entsprechendes System existiert bisher nicht. Grundlegende Arbeiten, wie z.B. nach Wegner [WEGN07], greifen jedoch diese Thematik auf und können an die zur Verfügung gestellte Schnittstelle angepasst werden.

Sofern vorhanden, wurde in den Modulen teilweise auf bereits existierende Modelle zurückgegriffen. Einen Einfluss auf die Entwicklung des Rahmensystems zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen hat dies nicht. Die Entwicklung von detaillierteren Modellen würde die Genauigkeit der berechneten Ergebnisse weiter steigern.

Die Überprüfung des entwickelten Konzeptes erfolgte abschließend durch Realisierung in einem Software-Demonstrator und der Testung anhand eines Fallbeispiels. Der Nachweis der in Kapitel 3 aufgestellten Hauptthese ist somit erbracht.

7 Summery and Prospects

Intention of this task has been to verify that an optimal definition of manufacturing tolerances along the process chain can be achieved by a selective precocious, cost-optimal and stable manufacturing planning. This was carried out by a development of a framework system for the cost-optimal and stable design of manufacturing chains without prior definition of manufacturing tolerances along the process chain.

The system starts with the assignment of design specifications with concrete manufacturing processes. A new model was developed, weighting the selected manufacturing processes on basis of their influence on product functionality, work piece characteristics and product purposes.

Based on the methods of Fallböhrer [FALL00] and Trommer [TROM01] a manufacturing chain was generated using the selected manufacturing processes. In the following system modules, this manufacturing chain was used as basis for the creation of process alternatives.

The process alternatives insist of the same manufacturing processes, which however differ in their parameters and actuating variables. Since the variation of the actuating variables within the allowed spread results in a huge quantity of process alternatives, initially a new model for the alternative reduction was developed. This model is based on the methodology for design of experiments and reduces the existing testing plans.

By means of the testing plans, the influences of the manufacturing processes and their parameters on the work piece characteristics were determined. Therefore, an interface to a comprehensive manufacturing-orientated technology knowledgemanagement system was created by the first time. In this manner, the required criteria can be calculated on basis of existing technology knowledge. This can be achieved by practical tests, simulations and expert knowledge.

As the determined criteria partially show variances which have direct influence on the resulting cost, the variances were considered in the next steps for the first time. Based on the resulting variances and work piece intermediate conditions, in the following a method for the identification of risky processes was presented. Hereunder those manufacturing processes are meant, which disperse without any mathematical law. In that case, an instable process can be assumed and reproducible process results can not be achieved. Similarly, processes resulting in work piece scrap are rejected.

The remaining process alternatives are realisable and achieve the given design specifications. They merely differ in their cost and manufacturing times. For this reason, the manufacturing cost and times are being calculated on basis of technology knowledge and the work piece intermediate conditions. The allowed scrap has an essential influence on the cost and times. By defining a limit – alternatively for the scrap, the cost and/ or the times – a calculation of the allowed manufacturing tolerances along the process chain is performed.

Finally, the new developed benchmarking of the process alternatives allows a quantitative comparison of the alternatives regarding the criteria cost, time and scrap. As support, the influence of the manufacturing process on the required product objectives and functionalities is being used.

Based upon the developed system further manufacturing processes can be integrated. This includes the remaining techniques with reference to DIN 8580 [DIN 8580]. Due to the fact that in the near future the economic deployment of resources is going to gain more and more importance, the integration of further assessment criteria, e.g. the consumption of energy and material as well as human resources, seems to be both possible and auspicious. The interface to a Technology-Knowledge-Management-System further turns out to act as a significant element of the newly designed concept. An adequate system is not available by now. Fundamental works, as for example presented by Wegner [WEGN07], deal with this topic though and could be adapted to the provided interface.

Where exists, sometimes already existing methods were used in the modules. This did not affect the development of the framework system for cost-optimal and stable design of process chains. The design of better methods would result in an increased accuracy of the calculated results.

Concluding the review of the developed concept has been carried out by implementation within a software-demonstrator and tested by means of a case study. The verification that manufacturing tolerances along the manufacturing-technological process chain and its strategy can be designed reproducible therefore is presented.

8 Literaturverzeichnis

8 References

- [AMEN02] Ament, C.: Eine Einführung in die statistische Versuchsplanung. Skript Universität Bremen, 2002
- [ANDE99] Ander, R.; Claassen, E.: Systemübergreifende Features unterstützen Prozessketten. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 94 (1999), Nr. 3, S. 115 – 118
- [ANGH93] Anghel, C.: Nomogramme für Betragsverteilungen erster und zweiter Art. In: QZ 38 (1993) 9, S. 523 – 524, 1993
- [ANSA97] Al-Ansary, M.D.; Deiab, I.M.: Concurrent Optimization of Design and Machining Tolerances using the Genetic Algorithms Method. In: International Journal for Machine Tools Manufacturing, Vol. 37, No. 12, S. 1721 – 1731, 1997
- [ASTA95] Astakhov, V.P.; Osman, M.O.M.: Correlations amongst process parameters in metal cutting and their use for establishing the optimum cutting speed. In: Journal of Materials Processing Technology 62 (1996), S. 175 – 179, 1996
- [BAER03] Baer, T.; Ströhle, H.; Bölster, N.; Haasis, S.: Integriertes Technologiemanagement für die Digitale Fabrik. In: CAD-CAM Report, No. 3, S. 42 – 50, 2003
- [BAUE91] Bauer, E.: Toleranzfähigkeit – Praxisgerechte Erweiterung der klassischen SPC-Lehre. In: QZ 36 (1991) 6, S. 340 – 342, 1991
- [BAUM96] Baumgarten, H.; Wiegand, A.: Optimale Logistik durch Prozesskettenmanagement. Industrie Management 12 (1996), Nr. 3, S. 53 – 56
- [BLAE02] Bläsing, J.P.: Workbook DoE – Design of Experiments nach G. Taguchi. Produkte und Prozesse robust auslegen. TQU Arbeitsbuch, 2002
- [BREC06] Brecher, C.; Witt, S.: Simulation of machine process interaction with flexible multi-body simulation. In: Proceedings of the 9th CIRP International Workshop on Modelling of Machining Operations, Bled, Slowenien, 2006
- [BREI97] Breiing, A.; Ryszard, K.: Bewerten technischer Systeme – Theorie und methodische Grundlagen bewertungstechnischer Entscheidungshilfen. Springer Verlag, Berlin, 1997
- [BRON05] Bronstein, I.N.; Semendjajew, K.A.: Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2005

- [BUER98] Bürgel, H.D.: Wissensmanagement. Springer Verlag, Berlin, 1998
- [CHAS88] Chase, K.W.; Greenwood, W.H.: Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis. In: Manufacturing Review, Vol. 1, No. 1, 03/1988, S. 50 – 59, 1988
- [CHEN94] Chen, R.; Scheer, A.: Modellierung von Prozessketten mittels Petri-Netz-Theorie. Publikation des Instituts für Wirtschaftsinformatik IWI, Heft 107, Universität Saarbrücken, 1994
- [CLAU98] Clausing, D.: Total Quality Development – A Step-by-Step Guide to World-Class Concurrent Engineering. ASME Press, New York, 1998
- [CZIC04] Czichos, H.; Hennecke, M.: Hütte. Das Ingenieurwesen. Springer Verlag, 32. Aufl., Berlin, 2004
- [DAVE98] Davenport, T.; Prusak, L.: Das Praxisbuch zum Wissensmanagement – Aus Informationen Gewinne machen. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 1998
- [DIET96] Dietrich, E.; Schulze, A.: Statistische Verfahren zur Qualifikation von Messmitteln, Maschinen und Prozessen. Hanser Verlag, 3. Auflage, München, 1996
- [DIN8580] N.N.: DIN 8580, Fertigungsverfahren – Begriffe. Deutsche Industrienorm, 2003
- [DONG90] Dong, Z.; Soom, A.: Automatic optimal tolerance design for related dimension chains. In: Manufacturing Review, Vol. 3, No. 4, 12/1990, S. 262 – 271, 1990
- [DONG94] Dong, Z.; Hu, W.; Xue, D.: New Production Cost-Tolerance Models for Tolerance Synthesis. In: Journal of Engineering for Industry, Vol. 5/1994, S. 199 – 206, 1994
- [DOUK94] Doukidis, G.I.; Karakoulas, G.I.: Feasibility study and impact assessment for a knowledge based information-technology planning system. In: Knowledge-Based Systems, Vol. 7, Number 1, Butterworth-Heinemann Verlag, 1994
- [DREY79] Dreyer, H.; Sauer, W.: Optimales Zusammenwirken von technologischen Prozessen und Prüfplänen. In: Fertigungstechnik und Betrieb 29 (1979) 1, S. 9 – 13, 1979
- [EN9000] N.N.: DIN EN ISO 9000:2005 Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Beuth Verlag GmbH, 2005

- [ENGE93] Engeln-Müllges, G.; Reutter, F.: Numerik-Algorithmen mit ANSI C-Programmen. Wissenschaftsverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 1993
- [EVER97] Eversheim, W.; Moron, O.: Strategic Design of Process Chains. In: Production Engineering, Vol. IV/1 (1997), S. 99 – 104
- [EVER99] Eversheim, W.; Feyerabend, H.; et. al.: Werkzeugbau mit Zukunft – Vom Dienstleister der Produktion zum Partner in der Prozesskette. In: Eversheim, Klocke, Pfeifer, Weck (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik, Tagungsband zum Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, Aachen, 1999
- [FALL00] Fallböhrmer, M.: Generierung alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Diss. RWTH Aachen, 2000
- [FELD95] Feldmann, D.; Jörgensen, S.: Ortsanalyse – Ein Werkzeug zur erweiterten Schließmaßberechnung unter Berücksichtigung von Form- und Richtungsabweichungen in Maßketten. Konstruktion 47 (1995), S. 111 – 117
- [FISC95] Fischer, A.: Objektorientierte Modellierung von Prozessketten. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1995
- [GEIG00] Geiger, M.; Ehrenstein, G.: Robuste verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile. Tagungsband zum 1. Berichtskolloquiums des SFB 396, 24. – 25. Mai 2000, Meisenbach, Bamberg 2000
- [GEIG76] Geiger, W.: Gefaltete und Betragsverteilungen. In: QZ 21 (1976) 7, S. 156 – 160, 1976
- [GEIG99] Geiger, M.; Otto, A.; Hofmann, A.: Prozesskettenverkürzung für flächige Leichtbauteile. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 94 (1999), Nr. 6, S. 341 – 344
- [GERD00] Gerdes, I.; Klawonn, F.; Kruse, R.: Evolutionäre Algorithmen. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2000
- [GLAT02] Glatz, H.: Prozesse, die nicht gezielt gestaltet wurden, haben 15 bis 30 % Verbesserungs-Potenzial. In: Planung + Produktion 50 (2002) 2, 02/2002, S. 3, 2002
- [GROT05] Grote, K.-H.: Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer Verlag, 20. Aufl., Berlin, 2005
- [HABE02] Haberfellner; Nagel; Becker; Büchel; von Massow: Systems Engineering – Methodik und Praxis. Verlag Industrielle Organisation, 11. Auflage, Zürich, 2002

- [HANR03] Hanrath, W.: Blätter zur Vorlesung Numerik. Vorlesungsskript Numerik, RWTH Aachen, 2003
- [HERI03] Hering, E.; Triemel, J.; Blank, H.-P.: Qualitätsmanagement für Ingenieure. Springer Verlag, Berlin, 2003
- [HESS97] Hessenberger, M.; Bruns, R.: Gestaltung gesamthafter Logistik-Prozessketten aus Sicht der Praxis. *Industrie Management* 13 (1997), Nr. 2, S. 13 – 17
- [HGB07] N.N.: Handelsgesetzbuch (HGB). DTV-Beck Verlag, 45. Auflage, 2007
- [HOFF96] Hoffmeister, H.; Michel, S.: Qualitätsorientierte Prozesskettenorientierung. In: *Feinbearbeitungsprozesse im Zentrum der Wertschöpfung*. Tagungsband zum 8. internationalen Feinbearbeitungskolloquium, 24. – 26. April 1996, S. 11.1 – 11.37, Vulkan Verlag, Essen, 1996
- [HOLL94] Holland, M.: Prozessgerechte Toleranzfestlegung – Bereitstellung von Prozessgenauigkeitsinformationen für die Konstruktion. Dissertation, TU Clausthal, 1994
- [HOME01] Homering, J.: Kontinuierliche Qualitätsverbesserung in projektorientierten Organisationen. Dissertation, RWTH Aachen, 2001
- [HUTC89] Hutchison Clark, C.: *Brainstorming: How to Create Successful Ideas*. Wils-hire Book Company, 1989
- [JACO02] Jacobs, H.-J.; Dürr, H.: Entwicklung und Gestaltung von Fertigungsprozessen – Planung und Steuerung der spanenden Teilefertigung. Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, 2002
- [JESC96] Jeschke, K.: Bilanz eines dreijährigen Forschungsprojektes – Null-Fehler-Produktion in der Prozesskette. *wt – Produktion und Management* 86 (1996), S. 349
- [JURK04] Jurklies, I.: Generierung und Bewertung von Prozessketten für den Werkzeug- und Formenbau. Dissertation, TU Chemnitz, 2004
- [KAMI95] Kamiske, G.F.; Brauer, J.-P.: Qualitätsmanagement von A – Z. Hanser Verlag, München, 2001
- [KLEP98] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren. Hanser Verlag, München, 1998
- [KLOC00] Klocke, F.; Bergs, T.; Knodt, S.: Automatisierte Prozessketten im Werkzeug- und Formenbau. *VDI-Z Spezial Werkzeug-/ Formenbau*, 11/2000, S. 19 – 22

- [KLOC02a] Klocke, F.; Willms, H.; Caesar, C.; et. al.: Gestalten und Optimieren von Prozessketten – Umsetzung von Fertigungsalternativen heute und morgen. In: Weck, M.; et. al. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven. Aachen: Shaker Verlag, ISBN 3-8265-9858-X, S. 191-216, 2002
- [KLOC02b] Klocke, F.; Willms, H.; Fallböhrer, M.; Trommer, G.: Hilfsmittel für die konstruktionsbegleitende Gestaltung von Prozessketten. *Industrie Management*, Jg. 18, Ausgabe 1/2002, ISSN 1434-1980, S. 31-34, 2002
- [KLOC02c] Klocke, F.; Willms, H.: Hilfsmittel zur Gestaltung von Prozessketten – Einbindung von innovativen Technologien in den Produktionsablauf. *RWTH Themen*, Ausgabe 1/2002, ISSN 0179-079X, S. 31-33, 2002
- [KLOC03a] Klocke, F.; Willms, H.: Knowledge Based Technology Planning Approaches. In: Bley, H. (Hrsg.): *Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*. Saarbrücken: Saarland University, Schriftenreihe Produktionstechnik Bd. 29, ISBN 3-930429-58-6, S. 323-326, 2003
- [KLOC03b] Klocke, F.; Willms, H.; Wegner, H.: Strategien der integrierten Technologieplanung. *Industrie Management*, Jg. 19, Ausgabe 4/2003, ISSN 1434-1980, S. 62-65, 2003
- [KLOC04] Klocke, F.; Schuh, G.; Eversheim, W.; Willms, H.; Knoche, K.: Einsatzplanung von Fertigungstechnologien. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): *Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, ISBN 3-540-21175-6, S. 170-190, 2004
- [KLOC05] Klocke, F.; Broichhausen, K.D.; Willms, H.; et. al.: Integrierte Simulation von Prozess, Werkstück und Maschine. In: Schuh, G.; et. al. (Hrsg.): *Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven*. Aachen: Shaker Verlag, ISBN 3-8322-3988-X, S. 307-350, 2005
- [KLOC06] Klocke, F.; Schuh, G.: *Marktspiegel – Software-Lösungen für die Werkzeugkalkulation*. RWTH Aachen, Fraunhofer IPT, 2006
- [KLOC07a] Klocke, F.; Willms, H.: Methodology to Describe the Influence of Manufacturing Processes on the Part Functionality. *WGP-Annalen Production Engineering*, Volume XIV/1, 2007
- [KLOC07b] Klocke, F.; König, W.; et. al.: *Fertigungsverfahren 1 – Drehen, Fräsen, Bohren*. 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [KLOC96] Klocke, F.: In *Prozessketten denken und handeln*. *wt – Produktion und Management* 86 (1996), S. 289

- [KLOC97] Klocke, F.; Saxler, W.: Die Schleiftechnik in der Prozesskette der Zukunft. In: Schleiftechnik im Wettbewerb, Tagungsband, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1997
- [KLOC99a] Klocke, F.; Weck, M.; Trommer, G.; Brömsen, O.: Vom Bauteilentwurf zur Fertigungsfolge. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 94 (1999), Nr. 9, S. 493 – 497
- [KLOC99b] Klocke, F.; Fallböhrer, M.; Kopner, A.; Trommer, G.: Modulare Fertigungsplanung – Methoden und Hilfsmittel für eine konstruktionsbegleitende Prozessgestaltung unterstützen auch Bohr- und Fräsprozesse. VDI-Z Spezial Werkzeuge, 8/1999, S. 58 – 61
- [KLUM97] Klumpp, S.; Kaiser, J.; Gansauge, L.: Prozesskette zur Fertigung von Stanzteilen optimieren. VDI-Z Spezial Werkzeug-/ Formenbau, 11/1997, S. 42 – 45
- [KNOC04] Knoche, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Dissertation, RWTH Aachen, 2004
- [KOLL98] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte mit Beispielen. Springer Verlag, 4. Aufl., Berlin, 1998
- [KOPN02] Kopner, A.: Prozessmodellbasiertes Technologieplanungssystem für autonome Produktionszellen. Dissertation RWTH Aachen, 2002
- [KRZE93] Krzepinski, A.: Ein Beitrag zur methodischen Modellierung betrieblicher Informationsverarbeitungsprozesse. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1993
- [KUHN92] Kuhn, R.: Technologieplanungssystem Fräsen – Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992
- [KUHN95] Kuhn, A.: Prozessketten in der Logistik: Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien. Verlag Praxiswissen, Dortmund, 1995
- [LEE89] Lee, W.-J.; Woo, T.C.: Optimum Selection of Discrete Tolerances. In: Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol. 111, 06/1989, S. 242 – 251, 1989
- [MADE07] Mader, S.: Festwalzen von Fan- und Verdichterschaufeln. Dissertation, RWTH Aachen, 2007
- [MAND00] Mandl, H.: Multiple Ansätze für das Wissensmanagement im Unternehmen. Vortragsskript Wissensmanagement in Unternehmen, DIHT, Bonn, 2000

- [MANS06] Mansour, M.: Informations- und Wissensbereitstellung für die lebenszyklusorientierte Produktentwicklung. Dissertation, TU Braunschweig, 2006
- [MARC07] Marczinski, G.; Laqua, I.: Integrierstes Prozessmanagement – Kolpmex Fertigungsprozesse stabilisieren. In: CIM Aktuell 02/2007, CIM GmbH Informations- und Produktionsmanagement (Hrsg.), Aachen, S. 11, 2007
- [MASI99] Masing, W.; Bruhn, M.: Handbuch Qualitätsmanagement. 4. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1999
- [MERZ97] Merz, P.: Analyse der Prozesskette Pulverspritzgießen. Dissertation, Universität Berlin, 1997
- [MICH81] Michael, W.; Siddall, J. N.: The Optimization Problem With Optimal Tolerance Assignment and Full Acceptance. In: Journal of Mechanical Design, Vol. 103, 10/1981, S. 842 – 848, 1981
- [MOLI97] Molitor, M.: Prozesskettenorientierte Qualitätstechnik – dargelegt am Beispiel der Getriebe-Serienfertigung. Habilitation, RWTH Aachen, 1997
- [MUNK99] MUNK, M.: Durchgängige Prozesskette für die Biegetechnik. WB Werkstatt und Betrieb 132 (1999), Nr. 10, S. 30 – 31
- [NAGA94] Nagarwala, M.Y.; Pulat, P.S.; Raman, S.R.: Process Selection and Tolerance Allocation for Minimum Cost Assembly. In: Manufacturing Science and Engineering, Vol. 68-1, S. 47 – 55, 1994
- [NORT02] North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung. Gabler Verlag, 2002
- [OSTW77] Ostwald, P.F.; Huang, J.: A Method for Optimal Tolerance Selection. In: Journal of Engineering for Industry, 08/1977, S. 558 – 565, 1977
- [PAHL07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.: Konstruktionslehre. Springer Verlag, 5. Aufl., Berlin, 2007
- [PETE70] Peters, J.: Tolerancing the Components of an Assembly for Minimum Cost. In: Journal of Engineering for Industry, Vol. 8/1970, S. 677 – 682, 1970
- [PFEI01a] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement – Strategien, Methoden, Techniken. Hanser Verlag, München, 2001
- [PFEI01b] Pfeifer, T.: Praxisbuch Qualitätsmanagement. Hanser Verlag, München, 2001
- [RAMM93] Rammelmüller, B.: Ein neues Maß für die Prozessfähigkeit. In: QZ 38 (1993) 9, S. 525 – 527, 1993

- [RINN04] Rinne, M.: Technology roadmaps: Infrastructure for innovation. In: Technological Forecasting & Social Change 71 (2004), S. 67 – 80, 2004
- [RINN99] Rinne, H.; Mittag, H.-J.: Prozessfähigkeitsmessung. Carl Hanser Verlag, München, 1999
- [ROY01] Roy, R.K.: Design of Experiments using the Taguchi Approach. 16 Steps to Product and Process Improvement. Wiley&Sons, 2001
- [SACH06] Sachs, L.: Angewandte Statistik. Statistische Methoden und ihre Anwendungen. Springer Verlag, Berlin, 2006
- [SCHA03] Schäfer, L.: Analyse und Gestaltung fertigungstechnischer Prozessketten – Konzept zur datenbasierten Ermittlung qualitätswirksamer Einfluss-Ursache-Wirkzusammenhänge und zur Ableitung von Maßnahmen zur Prozesssicherheit, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2003
- [SCHN02] Schneeweiß, C.: Einführung in die Produktionswirtschaft. Springer Verlag, 8. Aufl., Berlin, 2002
- [SCHO00] Schoenberg, M.: Zuverlässiger Fertigungsprozess bei Transferstraßen durch präventive Maßnahmen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2000
- [SCHO06] Schöning, S.: Potentialbasierte Bewertung neuer Technologien. Dissertation, RWTH Aachen, 2006
- [SCHO94] Schöneburg, E.: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien: Eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution. Addison-Wesley Verlag, Bonn, 1994
- [SCHO97a] Schönheit, M.: Wirtschaftliche Prozessgestaltung. Entwicklung, Fertigung, Auftragsabwicklung. Springer Verlag, Berlin, 1997
- [SCHO97b] Schönheit, M.; Lackner, U.; Jüch, M.: Prozesskennzahlen zur branchenunabhängigen Prozessbewertung. In: VDI-Berichte, Band 1316, S. 23 – 49, 1997
- [SCHR03] Schröder, J.: Technologie Benchmarking – Technologische Einzigartigkeiten identifizieren und hebeln. Seminarunterlagen Technology Due Diligence, Fraunhofer IPT, Aachen, 2003
- [SCHU07] Schuh, G.; Klocke, F.; Brecher, C.; Schmitt, R.: Excellence in Production – Festschrift für Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Dr. techn. h.c. Dr. oec. h.c. Walter Eversheim. Apprimus-Verlag, Aachen, 2007
- [SCHU77] Schütte, K.: Proof Theory. Springer Verlag, Berlin, 1977

- [SHEA06] Shea, K.: Computer Aided Product Development. Vorlesungsskript, TU München, 2006
- [SPAT01] Spath, D.; Dill, C.; Scharer, M.: Vom Markt zum Markt. Logis Verlag, Stuttgart, 2001
- [SPAT99] Spat, D.; Barrho, T.: Flexible Methodenunterstützung der Prozesskette „Vom Markt zum Produkt“. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 94 (1999), Nr. 9, S. 517 – 520
- [SPEC72] Speckhart, F.H.: Calculation of Tolerance Based on a Minimum Cost Approach. In: Journal of Engineering for Industry, Vol. 5/1972, S. 447 – 453, 1972
- [SPOT73] Spotts, M.F.: Allocation of Tolerances to Minimize Cost of Assembly. In: Journal of Engineering for Industry. Vol. 8/1973, S. 762 – 764, 1973
- [STAT07] N.N.: Engineering Statistics Handbook. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, Stand 01.04.2007
- [STÖC99] Stöcker, H.: Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, Thun, 1999
- [STRA04] Straube, A.M.: Modularer Ansatz zur Simulation verfahrenübergreifender fertigungstechnischer Prozessketten. Dissertation, RWTH Aachen, 2004
- [STRE92] Streinz, W.; Hausberger, H.; Anghel, C.: Unsymmetrie Größen erster und zweiter Art richtig auswerten – Teil 1. In: QZ 37 (1992) 12, S. 755 – 758, 1992
- [STRE93] Streinz, W.; Hausberger, H.; Anghel, C.: Unsymmetrie Größen erster und zweiter Art richtig auswerten – Teil 2. In: QZ 38 (1993) 1, S. 37 - 40, 1993
- [SUTH75] Sutherland, G.H.; Roth, B.: Mechanism Design: Accounting for Manufacturing Tolerances and Costs in Function Generating Problems. In: Journal of Engineering for Industry, 02/1975, S. 283 – 286, 1975
- [TÖNS97] Tönshoff, K.; Braun, W.: Technische Elemente zur Integration von CAD und CAP. In: Features verbessern die Produktentwicklung, Integration von Prozessketten, VDI-Berichte 1322, 1997, S. 179-194
- [TROM01] Trommer, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Dissertation, RWTH Aachen, 2001

- [TROX93] Troxler, J.W.; Schillings, P.L.: Another Look at Uncertainty and Risk Management when Evaluating Manufacturing Technology. In: Computer Integrated Manufacturing System, Vol. 6, No. 4, 1993
- [VDI2221] N.N.: VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag, Berlin, 1993
- [VECC97] Del Vecchio, R.J.: Understanding Design of Experiments: A Primer for Technologists. Hanser Gardner Publications, 1997
- [VLIE01] van Vliet, J.W.: Design for Manufacture: Development and Application of a Process-based Design Support Methodology. Dissertation, TU Delft, 2001
- [WARN98] Warnecke, G.; Zitt, U.; et. al.: Modellbildung und Simulationsmethoden in der spanenden Fertigungstechnik. In: Tagungsband zum 12. ASIM Symposium Simulationstechnik, Zürich, Schweiz, 9/1998, S. 123 – 134
- [WARN99] Warnecke, G.; Eichgruen, K.; Kluge, R.; Zitt, U.: Improvement of Process Reliability within Process Chains by Comprehensive Control Strategies. In: Annals of the German Academic Society for Production Engineering Vol. VI/1 1999, S. 1 – 6
- [WASC03] Waschatz, U.: Statistische Versuchsplanung – zuverlässiger und schneller zu Ergebnissen. Anwendungsbeispiel der Volkswagen AG, 2003
- [WEGN07] Wegner, H.: Entwicklung eines Systems zum technologischen Wissensmanagement am Beispiel der Hartfeinbearbeitung. Dissertation, RWTH Aachen, 2007
- [WENG95] Wengler, M.: Leitfaden – Methode zur Qualitätssicherung und Prozessbeherrschung in der Keramik. Leitfaden des Fraunhofer Instituts für Produktionstechnologie und der Hoechst CeramTec AG, Aachen, 1995
- [WEST02] Westkemper, M.: Methodik zur Angebotspreisbildung am Beispiel des Werkzeug- und Formenbaus. Dissertation, RWTH Aachen, 2002
- [WEST96] Westkämper, E.: Null-Fehler-Produktion in Prozessketten. Springer Verlag, Heidelberg, 1996
- [WHEE85] Wheelwright, S.C.; Hayes, R.H.: Fertigung als Wettbewerbsfaktor. In: Harvard Manager Produktion – Band 1, S. 111 – 117, 1985
- [WILD75] Wilde, D.; Prentice, E.: Minimum Exponential Cost Allocation of Sure-Fit Tolerances. In: Journal of Engineering for Industry, Vol. 11/1975, S. 1395 – 1398, 1975

- [WU88] Wu, Z.; Eimaraghy, W.H.; Eimaraghy, H.A.: Evaluation of Cost-Tolerance Algorithms for Design Tolerance Analysis and Synthesis. In: *Manufacturing Review*, Vol. 1, No. 3, 10/1988, S. 168 – 179, 1988
- [YEO95] Yeo, K.T.: Strategy for Risk Management through Problem Framing in Technology Acquisition. In: *International Journal of Project Management*, Vol. 13, No. 4, S. 219 – 224, 1995
- [ZAEH04] Zäh, M.: *Methoden der Unternehmensführung. Vorlesungsskript*, IWB München, 2004
- [ZAHN94] Zahng, H.-C.: *Advanced Tolerancing Techniques*. Wiley-Interscience Publication, New York, 1994
- [ZANG76] Zangemeister, C.: *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik - Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. 4. Auflage, Wittemann Verlag, 1976
- [ZAPP98] Zapp, M.: *Ultraschallunterstütztes Schleifen von Hochleistungskeramik – Ein Beitrag zur gezielten Beeinflussung der Eigenschaften von Bauteilen durch eine ganzheitliche Prozesskettenbetrachtung*. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1998
- [ZHAN93] Zhang, C.; Wang, H.-P.: Optimal process sequence selection and manufacturing tolerance allocation. In: *Journal of Design and Manufacturing* (1993) 3, S. 135 – 146, 1993
- [ZIMM91] Zimmermann, H.-J.; Gutsche, M.O.R.: *Multi-Criteria Analyse*. Springer Verlag, Berlin, 1991

9 Anhang

9 Annex

9.1 Interpolation von Versuchswerten

9.1 Interpolation of Test Results

Der Interpolation von Versuchsergebnissen liegt die Craig-Interpolation zugrunde. Die Craig-Interpolation ist ein Ausdruck der Logik. Der zugrunde liegende Satz (Craig's Lemma, Interpolationstheorem) lautet folgendermaßen [SCHU77]:

Wenn die implikative Formel $A \rightarrow C$ ableitbar ist, dann gibt es eine Interpolante B mit der Eigenschaft, dass auch die Formeln $A \rightarrow B$ und $B \rightarrow C$ ableitbar sind.

Grundsätzlich ist zu bemerken, dass die Interpolation durch Polynome stark an Bedeutung verloren hat seit es interpolierende Splines und Subsplines gibt, die nicht das bei Polynomen so unangenehme Oszillationsverhalten zeigen und sich besser an die vorgegebenen Wertemenge anpassen lassen [ENGE93].

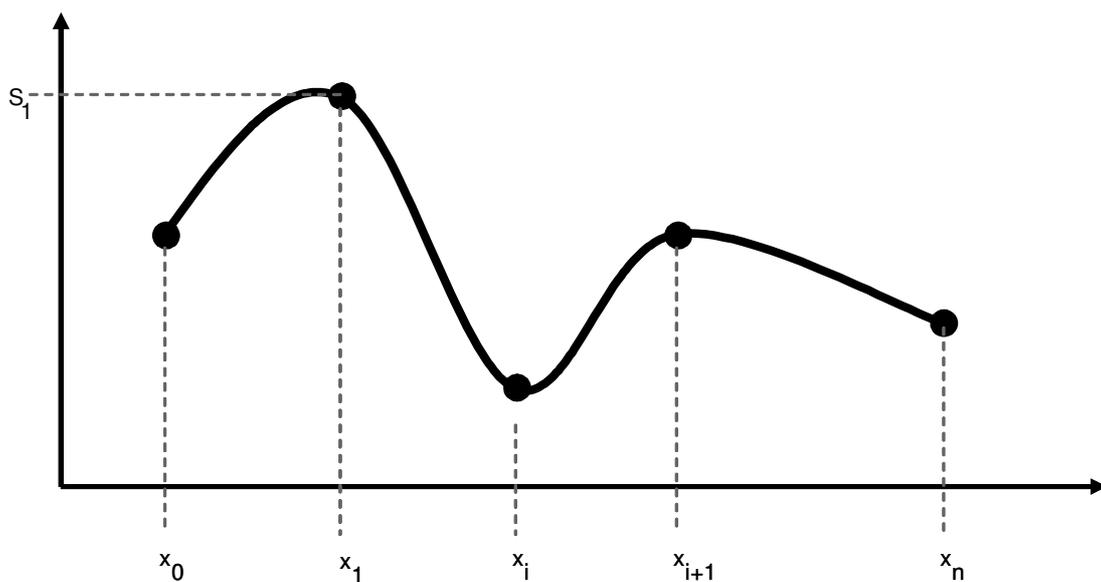


Bild 9.1: Spline-Funktion

Figure 9.1: Spline-Function

Splines sind segmentierte Kurven, wobei jedes Segment jeweils durch ein Polynom vom Grad n , $(n-1)$ -mal stetig differenzierbar ist, angepasst wird. Subsplines sind segmentierte Kurven mit Polynomen vom Grad n , die weniger oft, aber mindestens einmal differenzierbar sind. Meist werden kubische Splines verwendet. Ein kubisches Spline ist ein Satz von Polynomen dritten Grades, die jeweils zwischen zwei benachbarten Stützstellen x_j und $x_{j+1}=x_j+h$ verlaufen und deren erste und zweite Ableitung an den Endpunkten jedes Intervalls stetig aneinander anschließen [STOC99].

Die Stützstellen müssen nicht gleichweit (äquidistant) auseinander liegen. Es muss gelten $x_0 < x_1 < x_2 < x_i < \dots < x_n$. Durch die Funktionswerte und die ersten Ableitungen an den Randpunkten ist ein Polynom dritten Grades vollständig bestimmt.

Die Spline-Funktion $S(x)$ ist gegeben durch [HANR03]:

$$S(x) \equiv S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad \text{Gleichung 8.1}$$

$$\text{für } x \in [x_i, x_{i+1}], \quad i = 0(1)n - 1 \quad \text{Gleichung 8.2}$$

a, b, c, d : *Stützpunkte der Splinefunktion $S(x)$*
 i, n : *Zählvariablen aus den natürlichen Zahlen*

Da die Spline-Funktion eine segmentierte Kurve darstellt, ergeben sich an den Übergangspunkten der Segmente folgende Bedingungen:

$$S \in C^2[x_0, x_n] \quad \text{Gleichung 8.3}$$

$$S(x_i) = y_i, \quad i = 0(1)n \quad \text{Gleichung 8.4}$$

$$S''(x_0) = y''_0, \quad S''(x_n) = y''_n \quad \text{Gleichung 8.5}$$

$$S'(x_n) = y'_n \quad \text{Gleichung 8.6}$$

9.2 Variable Stellgrößen der Verfahren der Untergruppen 3.1, 3.2 und 3.3 nach DIN 8580

9.2 Variable Actuating Parameters of the Manufacturing Processes according to the Subgroups 3.1, 3.2 and 3.3 of DIN 8580

Einteilung DIN 8580	Prozessname	Stellgrößen	Abkürzung	Einheit
3.1.1	Scherschneiden	Stempelkraft Ringzackenkraft Gegenkraft Schneidspalt Abstand Ringzacke-Stempel Kühlung/ Schmierung	F_S F_R F_G X A -	[N] [N] [N] [mm] [mm] -
3.1.2	Messerschneiden	Schnittkraft Kühlung/ Schmierung	F_S -	[N] -
3.1.3	Beißschneiden	Schnittkraft Kühlung/ Schmierung	F_S -	[N] -
3.1.4	Reißen	Zugkraft	F_Z	[N]

		Zuggeschwindigkeit	v_Z	[m/min]
3.1.5	Brechen	Brechkraft	F_B	[N]
3.2.1	Drehen	Schnittgeschwindigkeit Vorschub Schnitttiefe Einstellwinkel Kühlung/ Schmierung Werkzeug	v_c f a_p χ - -	[m/min] [mm] [mm] [°] - -
3.2.2	Bohren, Senken, Reiben	Schnittgeschwindigkeit Vorschub Spitzenwinkel Kühlung/ Schmierung Werkzeug	v_c f σ - -	[m/min] [mm] [°] - -
3.2.3	Fräsen	Schnittgeschwindigkeit Vorschub je Zahn Einstellwinkel Schnitttiefe Eingriffsgröße Kühlung/ Schmierung Werkzeug	v_c f_z κ_r a_p a_e - -	[m/min] [mm] [°] [mm] [mm] - -
3.2.4	Hobeln, Stoßen	Schnittgeschwindigkeit Rückhub Vorschub Schnitttiefe Werkzeug	v_c v_R f a_p -	[m/min] [m/min] [mm] [mm] -
3.2.5	Räumen	Zugkraft Zuggeschwindigkeit Kühlung/ Schmierung Werkzeug	F_Z v_Z - -	[N] [m/min] - -
3.2.6	Sägen	Schnittgeschwindigkeit Zahnvorschub Kühlung/ Schmierung Werkzeug	v_c f_z - -	[m/min] [mm] - -
3.2.7	Feilen, Raspeln	(manuelle Bearbeitung)		
3.2.8	Bürstenspanen	Werkzeugdrehzahl Vorschubgeschwindigkeit Schnitttiefe	n v_f a_p	[1/min] [m/min] [mm]

		Werkzeug	-	-
3.3.1	Schleifen mit rotierendem Werkzeug	Schnittgeschwindigkeit Schnitttiefe Werkstückgeschwindigkeit Kühlung/ Schmierung Werkzeug	v_c a_e v_w - -	[m/s] [μm] [m/min] - -
3.3.2	Bandschleifen	Schnittgeschwindigkeit Schnitttiefe Vorschubgeschwindigkeit Kühlung/ Schmierung Werkzeug	v_c a_e v_f - -	[m/s] [μm] [m/min] - -
3.3.3	Hubschleifen	Schnittgeschwindigkeit Schnitttiefe Werkstückgeschwindigkeit Zustellweite Kühlung/ Schmierung Werkzeug	v_c a_e v_w x - -	[m/s] [μm] [m/min] [mm] - -
3.3.4	Honen	Anpresskraft Axialgeschwindigkeit Radialgeschwindigkeit Kühlung/ Schmierstoff Werkzeug	F v_a v_t - -	[N] [m/s] [m/s] - -
3.3.5	Läppen	Anpresskraft Winkelgeschwindigkeit Kühlung/ Schmierstoff Werkzeug	F ω - -	[N] [1/s] - -
3.3.6	Strahlspanen	Strahlwinkel Strahldruck Strahldüse Strahlmittel	α P - -	[$^\circ$] [bar] - -
3.3.7	Gleitspanen	Anpresskraft Vorschubgeschwindigkeit Kühlung/ Schmierstoff Werkzeug	F v_f - -	[N] [m/s] - -

9.3 DoE-Versuchsplan und -ergebnisse Hartglattwalzen

9.3 DoE Test Sheet and Results for Roller Burnishing

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Nr.	Std Order	Run Order	Center Pt	Blocks	Härte [HRC]	Rauhigkeit [mm]	Durchmesser-abweichung [mm]
1	1	8	1	1	59,00	0,00057	0,071
2	2	1	1	1	61,50	0,00057	0,071
3	3	14	1	1	59,00	0,00077	0,071
4	4	2	1	1	61,50	0,00077	0,071
5	5	10	1	1	59,00	0,00057	0,083
6	6	5	1	1	61,50	0,00057	0,083
7	7	11	1	1	59,00	0,00077	0,083
8	8	16	1	1	61,50	0,00077	0,083
9	9	6	1	1	59,00	0,00057	0,071
10	10	4	1	1	61,50	0,00057	0,071
11	11	9	1	1	59,00	0,00077	0,071
12	12	7	1	1	61,50	0,00077	0,071
13	13	3	1	1	59,00	0,00057	0,083
14	14	17	1	1	61,50	0,00057	0,083
15	15	12	1	1	59,00	0,00077	0,083
16	16	15	1	1	61,50	0,00077	0,083
17	17	13	0	1	60,25	0,00067	0,077

	C8	C9	C10
Nr.	Werkzeugdurchmesser [mm]	Walzdruck [bar]	Rauhigkeit_nachher [mm]
1	3,0	400	0,000070
2	3,0	100	0,000135
3	3,0	100	0,000140
4	3,0	400	0,000095
5	3,0	100	0,000100
6	3,0	400	0,000080
7	3,0	400	0,000100
8	3,0	100	0,000160
9	6,0	100	0,000400
10	6,0	400	0,000410
11	6,0	400	0,000420
12	6,0	100	0,000660
13	6,0	400	0,000390
14	6,0	100	0,000600
15	6,0	100	0,000490
16	6,0	400	0,000510
17	4,5	250	0,000630

9.4 Koeffizienten der Regressionsanalyse für das Hartglattwalzen

9.4 Coefficients of Regressions Analysis for Roller Burnishing

Term	Effect	Coefficient
Constant		0,000298
Härte [HRC]	0,000068	0,000034

Rauhigkeit [mm]	0,000049	0,000024
Durchmesserabweichung [mm]	0,000012	0,000006
Werkzeugsdurchmesser [mm]	0,000375	0,000188
Walzdruck [bar]	-0,000076	-0,000038
Härte * Rauhigkeit [HRC*mm]	0,000001	0,000001
Härte * Durchmesserabweichung [HRC*mm]	0,000000	0,000000
Härte * Werkzeugsdurchmesser [HRC*mm]	0,000053	0,000026
Härte * Walzdruck [HRC*bar]	-0,000039	-0,000019
Rauhigkeit * Durchmesserabweichung [mm ²]	-0,000026	-0,000013
Rauhigkeit * Werkzeugdurchmesser [mm ²]	0,000021	0,000011
Rauhigkeit * Walzdruck [mm*bar]	-0,000005	-0,000002
Durchmesserabweichung * Werkzeugdurchmesser [mm ²]	0,000012	0,000006
Durchmesserabweichung * Walzdruck [mm*bar]	0,000009	0,000004
Werkzeugdurchmesser * Walzdruck [mm*bar]	-0,000029	-0,000014
Center Point		0,000333

9.5 Mathematische Grundlagen zur Stichprobenverteilung

9.5 Mathematical Basics for Spot Test Distribution

Die Probleme der mathematischen Statistik bestehen darin, aufgrund von Kenntnissen über gewisse Eigenschaften einer Teilmenge von Elementen, die einer gewissen Gesamtmenge entnommen sind, etwas über die entsprechenden Eigenschaften der Gesamtmenge auszusagen. Diese Gesamtmenge heißt die Grundgesamtheit [BRON05]. An der Grundgesamtheit interessiert ein gewisses Merkmal, welches quantitativer und qualitativer Natur sein kann. Unter der Stichprobenentnahme vom Umfang n versteht man eine zufällige Auswahl von n Objekten aus der Grundgesamtheit, wobei die Auswahl der einzelnen Objekte unabhängig voneinander geschieht. Das Ergebnis der Stichprobenentnahmen, die Stichprobe vom Umfang n , ist dann ein n -tupel (x_1, \dots, x_n) von Merkmalswerten. Die Tatsache, dass man viele Stichproben vom Umfang n machen kann und in Abhängigkeit vom Zufall verschiedene n -tupel von Merkmalswerten bekommt, führt zu folgender, für das theoretische Verständnis der mathematischen Statistik grundlegenden, abstrakten Definition des Begriffs „Stichprobe“:

Es liege eine Grundgesamtheit vor, in der das interessierende Merkmal X die Verteilung $F(x)$ habe. Ein n -dimensionaler Zufallsvektor (X_1, \dots, X_n) , in dem die X_i unabhängig voneinander sind und alle die gleiche Verteilung $F(x)$ haben, heißt eine mathematische Stichprobe vom Umfang n . Jede Realisierung (x_1, \dots, x_n) von (X_1, \dots, X_n) ist eine konkrete Stichprobe [BRON05].

Die Verteilung von X ist in der Regel nicht bekannt. Um eine erste Vorstellung dieser Verteilung zu erhalten, konstruiert man das so genannte Histogramm (Bild 9.2). Hierbei führt man eine Zerlegung der reellen Achse in endlich viele aneinander grenzende Intervalle $\Delta_1, \dots, \Delta_k$ durch. Diese Intervalle werden in der mathematischen Statistik Klassen genannt. Im hier vorliegenden Anwendungsfall sollten die Intervalle gleich groß gewählt werden [BRON05].

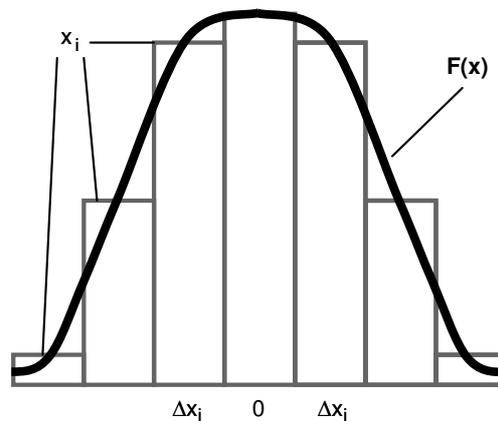


Bild 9.2: Histogramm der Verteilung $F(x)$

Figure 9.2: Bar chart of Distribution $F(x)$

Dann werden die Anzahlen der Stichproben in Δ_j ermittelt mit $1 \leq j \leq k$. Diese Anzahlen seien M_j . Sie heißen Klassenhäufigkeiten. Die resultierende Treppenfunktion der Stichproben ist eine Annäherung an die wahre Verteilung $F(x)$.

Bildungsgang des Verfassers

Persönliche Daten

Name: Holger Willms
Geburtsdatum/ -ort: 13.05.1976, Aachen

Beruflicher Werdegang

10/2007 – jetzt ThyssenKrupp Technologies AG Essen,
Zentralabteilung für Technik Investitionen & TK best

- Referent Investitionen (seit 10/2007)

02/2001 – 09/2007 Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen,
Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren

- Leiter der Gruppe „Technologieplanung und Simulation“ (06/2006 – 09/2007)
- Leiter der Gruppe „Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide“ (05/2005 – 05/2006)
- Projektleiter (02/2001 – 04/2005)

Ausbildung

11/1998 – 01/2001 Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen
Tätigkeit als studentische Hilfskraft im Bereich Zerspantechnik

10/1996 – 01/2001 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen
Studium des Maschinenbaus, Vertiefungsrichtung Fertigungstechnik
Abschluss: Diplomingenieur

09/1998 – 09/1995 Diverse Industriepraktika, insgesamt 26 Wochen

10/1995 – 07/1996 Technische Schule des Heeres und Fachschule des Heeres für Technik (TSH/FSHT) in Aachen
Wehrdienst

08/1986 – 06/1995 Einhard-Gymnasium in Aachen
Abschluss: Abitur

Aachen, den 22.07.08

