

# **Bayes-Netzwerke für die Kostenprognose in der frühen Phase der Produktentwicklung**

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

vorgelegt von  
Frank Dehen

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen  
Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Sabina Jeschke

Tag der mündlichen Prüfung: 18. April 2012

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.



Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionsmethodik

Band 13

**Frank Dehen**

**Bayes-Netzwerke für die Kostenprognose  
in der frühen Phase der Produktentwicklung**

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2012)

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1086-2

ISSN 1438-4930

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

*Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus an der RWTH Aachen – ikt.*

*An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen und mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.*

*Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Professor Feldhusen, für das entgegengebrachte Vertrauen und Interesse an meiner Arbeit.*

*Professorin Jeschke danke ich für die Übernahme des Koreferats sowie Professor Corves für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.*

*Besonders bedanken möchte ich mich auch bei meinem Bürokollegen Johannes Lemburg und bei meinem Kollegen Frederik Bungert. Durch zahlreiche Anregungen und konstruktive Diskussionen haben sie die Arbeit inspiriert und maßgeblich beeinflusst.*

*Weiter will ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des ikt für die Unterstützung und Zusammenarbeit bedanken. Dank gebührt ebenso der Werkstatt, dem Rechnerteam und dem Sekretariat.*

*Schließlich will ich besonders meiner Lebensgefährtin Tanja und meinen Kindern Camilla, Lena und Johanna für die Unterstützung und Motivation während all der Zeit danken.*

*Aachen im April 2012*



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	2
1.2	Zielsetzung .....	3
1.3	Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2</b>	<b>Die frühe Phase in der Produktentwicklung .....</b>	<b>5</b>
2.1	Konzept – Darstellung und Eingrenzung .....	6
2.2	Produktplanung und Entscheidungsprozess in der frühen Phase der Produktentwicklung .....	9
2.3	Einflussparameter auf die Herstellkosten .....	12
<b>3</b>	<b>Methoden und Hilfen für die Kostenprognose .....</b>	<b>15</b>
3.1	Grundlagen der Kostenprognose .....	16
3.2	Allgemeine Methoden .....	17
3.3	Rechnerunterstützte Methoden .....	19
3.4	Resümee und Handlungsbedarf .....	22
<b>4</b>	<b>Bayes-Netzwerke .....</b>	<b>25</b>
4.1	Einführung .....	26
4.1.1	Entwicklung .....	26
4.1.2	Das grafische Modell .....	27
4.2	Informationsverarbeitung in Bayes-Netzwerken .....	29
4.2.1	Kausale Verbindungen und Unabhängigkeit .....	29
4.2.2	Informationsaustausch .....	32
4.2.3	Analyse-Methoden .....	34
4.3	Anwendungsbereiche .....	40
4.4	Erstellen eines Bayes-Netzwerks .....	42
4.4.1	Eignungsprüfung .....	43
4.4.2	Schritt 1: Identifikation .....	45
4.4.3	Schritt 2: Strukturierung .....	51
4.4.4	Schritt 3: Quantifizierung .....	56
4.5	Zusammenfassung .....	63
<b>5</b>	<b>Kostenprognose mit Bayes-Netzwerken .....</b>	<b>67</b>
5.1	Eingrenzung .....	68
5.2	Einführung .....	71

5.3	Netzstruktur einer Kostenprognose .....	75
5.3.1	Ein objektorientiertes Bayes-Netzwerkmodell für die Kostenprognose .....	77
5.3.2	Anforderungen im Bayes-Netzwerk .....	83
5.3.3	Funktionen im Bayes-Netzwerk .....	87
5.3.4	Gestaltelemente im Bayes-Netzwerk .....	91
5.3.5	Ermittlung der Herstellkosten im Bayes-Netzwerk .....	94
5.3.6	Datenbasis für ein Bayes Netz zur Kostenprognose .....	95
5.4	Praxisbeispiel .....	97
5.4.1	Einführung .....	97
5.4.2	Praxisbeispiel – Identifikation .....	98
5.4.3	Praxisbeispiel – Strukturierung .....	101
5.4.4	Praxisbeispiel – Quantifizierung .....	104
5.4.5	Anwendung und Analyse .....	107
5.5	Prognose von Unentdecktem, Unvorhersehbarem und Neuem .....	110
5.6	Integration der Kostenprognose in den Arbeitsablauf der Produktentwicklung .....	111
5.6.1	Import der Konzeptdaten in das Bayes-Netzwerk und Ergebnispräsentation .....	113
5.6.2	Verarbeitung der Konzeptdaten im Bayes-Netzwerk .....	113
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>115</b>
6.1	Zusammenfassung .....	115
6.2	Ausblick .....	117
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>119</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eingrenzung der frühen Phase der Produktentwicklung im Konstruktionsprozess nach VDI 2221.....	6
Abbildung 2: Möglichkeit der Kostenbeeinflussung im Vergleich zu den zur Verfügung stehenden Daten nach Ehrlenspiel und Koller.....	10
Abbildung 3: Modelle von Dosierspritzen [THON08] in der frühen Phase der Produktentwicklung.....	12
Abbildung 4: Beispiele für Einflussparameter auf die Herstellkosten in frühen Phasen der Produktentwicklung.....	13
Abbildung 5: Kostenanalyse während der Konstruktion [VDI2235].....	15
Abbildung 6: Methoden und Hilfsmittel, den Konstruktionsphasen zur Kostenanalyse zugeordnet [VDI2235].....	18
Abbildung 7: Generelle Struktur bei der Integration eines rechnergestützten Kosteninformationssystems.....	20
Abbildung 8: Auswahl bekannter Systeme für die konstruktionsbegleitende Kalkulation.....	20
Abbildung 9: Übersicht Kapitel 4.....	25
Abbildung 10: Bayes-Netzwerk für die Beschreibung des „Leckageproblems“.....	28
Abbildung 11: Serielle Verknüpfung ohne harte Evidenz, nach [KJAE08].....	30
Abbildung 12: Serielle Verknüpfung mit harter Evidenz für „Leckage“, nach [KJAE08].....	30
Abbildung 13: Divergente Verknüpfung ohne harte Evidenz, nach [KJAE08].....	30
Abbildung 14: Divergente Verknüpfung mit harter Evidenz für „Regenunwetter“, nach [KJAE08].....	31
Abbildung 15: Konvergente Verknüpfung ohne harte Evidenz, nach [KJAE08].....	31
Abbildung 16: Konvergente Verknüpfung mit harter Evidenz für „Leckage“, nach [KJAE08].....	31
Abbildung 17: Message-Passing Algorithmus von Pearl, nach [BORT04].....	33
Abbildung 18: Bayes-Netzwerk „Lungenklinik“, nach [LAUR88].....	34
Abbildung 19: Bayes-Netzwerk „Lungenklinik“ mit Stadien und Wahrscheinlichkeiten I, nach [LAUR88].....	36
Abbildung 20: Bayes-Netzwerk „Lungenklinik“ mit Stadien und Wahrscheinlichkeiten II, nach [LAUR88].....	37
Abbildung 21: Inferenz im Bayes-Netzwerk „Lungenklinik“ I, nach [LAUR88].....	37
Abbildung 22: Inferenz im Bayes-Netzwerk „Lungenklinik“ II, nach [LAUR88].....	38

Abbildung 23: Bayes-Netzwerk „Lungenklinik“ mit neuem Einfluss auf Tuberkulose, nach [LAUR88] .....	40
Abbildung 24: Übersicht.....	41
Abbildung 25: Erstellen eines Bayes-Netzwerks .....	42
Abbildung 26: Bayes-Netzwerk - Prüfentscheidung in der Qualitätssicherung .....	45
Abbildung 27: Übersicht.....	51
Abbildung 28: Von der Ursache zur Wirkung .....	51
Abbildung 29: Diagnose Modell zu Abbildung 28 .....	52
Abbildung 30: Idiom 1 - Definition und Synthese.....	52
Abbildung 31: Idiom 2 - Ursache-Wirkung.....	53
Abbildung 32: Idiom 3 – Messen.....	53
Abbildung 33: Idiom 4 – Induktion.....	54
Abbildung 34: Idiom 5 - Abstimmen .....	54
Abbildung 35: Verwendung von Klassen in OOBN.....	55
Abbildung 36: Überblick.....	56
Abbildung 37: Methodik des paarweisen Vergleichs – nach [CHIN09] .....	58
Abbildung 38: Auswahl der Projektmitarbeiter.....	58
Abbildung 39: Mögliche Kennzeichen der Produktqualität.....	59
Abbildung 40: Mögliche Kennzeichen der Produktqualität - gebündelt.....	60
Abbildung 41: Skala für linguistische Terme zur Beschreibung der Lautstärke nach [BREI97].....	60
Abbildung 42: Skala für linguistische Wahrscheinlichkeitsterme nach [KJAER08].....	61
Abbildung 43: Torten- und Balkendiagramm als Hilfestellung zum Finden der Wahrscheinlichkeiten .....	62
Abbildung 44: Gesamtverteilung mit Wahrscheinlichkeitsprofil.....	62
Abbildung 45: Überblick.....	63
Abbildung 46: Überblick Kapitel 5 .....	68
Abbildung 47: Umsatzanteile mit Produktneuheiten im Maschinenbau 2000 bis 2009 [ZEW11].....	70
Abbildung 48: Allgemeines Bayes-Netzwerk für die Kostenprognose technischer Produkte .....	72
Abbildung 49: Vorgabe – ein Produkt in geringer Stückzahl und anspruchsvollen Materialeigenschaften soll nicht mehr als üblich kosten. ....	74
Abbildung 50: Gestaltungsvarianten einer Prinzipdarstellung nach Koller [KOLL98] .....	75

Abbildung 51: Größen im Bayes-Netzwerk für die Kostenprognose .....	76
Abbildung 52: Top-Down-Prozess eines objektorientierten Bayes-Netzwerks in Anlehnung an [FELD10].....	78
Abbildung 53: Elemente eines Bayes-Netzwerks zur Kostenprognose in der Strukturebene .....	79
Abbildung 54: Einsatz von Klassen in einem Bayes-Netzwerk für die Kostenprognose von Konzepten.....	80
Abbildung 55: Erster Konzeptentwurf für ein neuartiges Starkstromschütz [KVMG05] .....	81
Abbildung 56: Ausgearbeitetes Konzept für ein neuartiges Starkstromschütz [KVMG05].....	81
Abbildung 57: Übergeordnetes Bayes-Netzwerk zur Einschätzung der Vollständigkeit des vorliegenden Konzepts.....	82
Abbildung 58: Anforderungsfeld „Kinematik“, gebündelt in einer Kenngröße.....	87
Abbildung 59: Vernetzung im Bayes-Netzwerk mit und ohne Kenngrößen.....	87
Abbildung 60: Vernetzung von Funktionen im Bayes-Netzwerk .....	88
Abbildung 61: Funktionen in einer Prinziplösung – Papierlocher.....	89
Abbildung 62: Funktionen in einer Prinziplösung – Siloanlage .....	90
Abbildung 63: Abgleich der Prognosen zwischen den Klassen .....	91
Abbildung 64: Beispiele für Prinzipdarstellungen in technischen Disziplinen.....	93
Abbildung 65: Vernetzung der Gestaltmerkmale im Bayes-Netzwerk.....	94
Abbildung 66: Ermittlung der Herstellkosten mit einem Bayes-Netzwerk .....	95
Abbildung 67: Produktdaten für die Kostenprognose im frühen Konzeptstadium .....	96
Abbildung 68: Übersicht.....	97
Abbildung 69: Beispiele für Transportvorrichtungen (basierend auf Abschlussprüfungen für Industriemechaniker).....	97
Abbildung 70: Identifikation von Funktionen und Anforderungen aus einer technischer Zeichnung (nach [BUND96]) .....	99
Abbildung 71: Konzeptskizze und finale Ausprägung (nach [BUND96]).....	100
Abbildung 72: Übersicht.....	101
Abbildung 73: Verknüpfung der Parameter im Anwendungsbeispiel .....	102
Abbildung 74: Netzwerkstruktur des Anwendungsbeispiels .....	103
Abbildung 75: Allgemeine Struktur einer Bauelementklasse im Anwendungsbeispiel .....	104
Abbildung 76: Übersicht.....	104
Abbildung 77: Wahrscheinlichkeitsverteilung des Produktgewichts.....	105

---

Abbildung 78: Bedingte Wahrscheinlichkeiten der Materialauswahl für ein Bauelement .....	105
Abbildung 79: Beispiel für die Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten.....	105
Abbildung 80: Beispiel für die Berechnung bedingter Wahrscheinlichkeiten.....	106
Abbildung 81: Übersicht.....	107
Abbildung 82: Konzept für eine neue Transportvorrichtung.....	108
Abbildung 83: Instantiierung der Konzeptinformationen in die Bauelementklasse „Schieber“.....	109
Abbildung 84: Prognose der Fertigungskosten (li.) und der Materialkosten (re.) für das Bauelement Schieber .....	109
Abbildung 85: Instantiierung der Konzeptinformationen in das Bayes-Netzwerk zur Prognose der Montagekosten .....	110
Abbildung 86: Komponenten wissensbasierter Systeme nach [DOER04] .....	114

## Abkürzungen

CAE	–	Computer Aided Engineering
CAM	–	Computer Aided Manufacturing
DMU	–	Digital Mock-Up
FEM	–	Finite-Elemente-Methode
FMEA	–	Failure Methods and Effect Analysis
FTA	–	Fault Tree Analysis
MKS	–	Mehrkörpersimulation
PPS	–	Produktions-Planungssystem
QFD	–	Quality Function Deployment
REFA	–	Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.
WHO	–	World Health Organization