

**Entwicklung eines ganzheitlichen Prognosemodells zur Kompensation von
Varianzen in Prozessfolgen mittels Support Vektor Maschinen**

Von der Fakultät Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Markus Decker
aus Bad Friedrichshall

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.
Engelbert Westkämper

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath

Tag der Einreichung: 11.07.2007

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2007

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart
2007

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Markus Decker

Entwicklung eines ganzheit-
lichen Prognosemodells zur
Kompensation von Varianzen
in Prozessfolgen mittels
Support Vektor Maschinen

Nr. 469

Dr.-Ing. Markus Decker

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN (10) 3-939890-27-8, ISBN (13) 978-3-939890-27-0

Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2007.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart und am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Engelbert Westkämper, dem Direktor des IFF und des IPA für die Anregung zu dieser Arbeit und ihrer Förderung. Vor allem danke ich ihm für die vertrauensvolle Zusammenarbeit als sein Assistent und für die vielfältigen Erfahrungen, die ich bei ihm sammeln durfte.

Herrn Prof. Spath danke ich für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Durch ihren persönlichen Einsatz und Mithilfe bei der Durchführung der Versuche und Simulationsläufe haben Herr Fabio Formichella, Wissam El Hakimi, Enver Yildiz und Frank Herbrig wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Dafür danke ich ihnen besonders.

Nicht zuletzt möchte ich Herrn Dr.-Ing. Andreas Scheibe für seine ständige Diskussionsbereitschaft und die konstruktiven Anregungen während der Erstellung dieser Arbeit danken.

Stuttgart, Dezember 2007

Markus Decker

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Inhaltsverzeichnis	9
Abbildungen und Tabellen	12
Abkürzungen und Formelzeichen	15
1 Wissenschaftliche Fragestellung und Zielsetzung	18
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	18
1.2 Ziel und Vorgehensweise	22
2 Simulationstechnik im fertigungstechnischen Umfeld	25
2.1 Simulation technischer Prozesse	25
2.2 Simulation betriebsorganisatorischer Prozesse	28
2.3 Simulation von Fertigungssystemen	32
3 Ganzheitliche Betrachtung von Fertigungssystemen	36
3.1 Elemente eines Fertigungssystems	36
3.2 Betrachtete Systeme im industriellen Umfeld	40
3.2.1 Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	40
3.2.2 Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme	43
4 Mathematischer Hintergrund zur gekoppelten Modellierung – Support Vektor Maschinen (SVM)	46
4.1 Methodische Grundlagen	47
4.1.1 Einführung in die Klassifizierungsverfahren	47
4.1.1.1 Automatische Verfahren	47
4.1.1.2 Numerische und nicht-numerische Verfahren	48
4.1.1.3 Statistische und verteilungsfreie Verfahren	48
4.1.1.4 Überwachte und nicht überwachte Verfahren.....	48
4.1.1.5 Fest dimensionierte und lernende Verfahren	48
4.1.1.6 Parametrische und nicht-parametrische Verfahren	49
4.1.2 Die Lernmethodologie.....	49
4.1.2.1 Überwachtes Lernen	49
4.1.2.2 Lernen und Generalisieren.....	50
4.1.2.3 Optimierung der Generalisierungsfähigkeit.....	51
4.2 Mathematische Grundlagen der SVM	52
4.2.1 Einführung in die SVM	52
4.2.2 Lineare Lernalgorithmen.....	54

4.2.3	Lineare Klassifikation	54
4.2.3.1	Rosenblatt Perzeptron	56
4.2.3.2	Lineare Regression.....	59
4.2.3.3	Vapnik-Chervonenkis-Theorie	60
4.2.4	Lineare Support Vector Machines.....	61
4.2.4.1	Optimierungsproblem bei der Klassifikation.....	61
4.2.4.2	Linear nicht trennbare Daten	62
4.2.5	Kernfunktionen.....	63
4.2.5.1	Theorem von Mercer.....	67
4.2.5.2	Kernfunktionen und nicht lineare Separierung.....	67
4.2.6	Multi-Klassifikationsverfahren	70
4.2.6.1	One-Against-All-Klassifikation.....	70
4.2.6.2	One-Against-One-Klassifikation	72
4.2.6.3	Decision Directed Acyclic Graph	73
4.2.6.4	Fuzzy Support Vector Machines.....	74
4.2.6.5	Error-Correcting Output Codes.....	75
4.2.6.6	Direktes Klassifizieren.....	75
4.2.7	Zusammenfassung.....	76
4.3	Datengrundlage und Merkmalsauswahl.....	76
4.3.1	Allgemeiner Ablauf bei der Klassifikation	77
4.3.2	Kern- und Parameterwahl.....	78
4.4	Bisherige Einsatzgebiete und Anwendungsbeispiele von SVM-Modellen.....	80
4.5	Softwarelösungen	83
4.5.1	MATLAB SVM Toolbox.....	83
4.5.2	MATLAB Fuzzy Logic Toolbox	84
4.5.3	YALE	85
5	Betrachtete Prozess- und Messtechnik zur Verifikation	87
5.1	Betrachtete Prozesstechnik	87
5.1.1	Der Lasersinterprozess und seine Einflussgrößen.....	87
5.1.1.1	Technische Kenngrößen des Lasersinterprozesses	88
5.1.2	Der Strahlprozess und seine Einflussgrößen.....	91
5.1.2.1	Technische Kenngrößen des Kugelstrahlprozesses	92
5.2	Betrachtete Messtechnik zur Verifikation des Modells.....	94
6	Methodischer Ansatz zur gekoppelten Modellierung technischer und betriebsorganisatorischer Kennzahlen.....	96
7	Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge.....	101
7.1	Technische Zielgrößen.....	101
7.2	Betriebsorganisatorische Zielgrößen	101
7.3	Zielkonflikt - Wirkzusammenhänge	102
8	Das gekoppelte Prognosemodell.....	104
8.1	Grundstruktur des Modells	104
8.2	Methodischer Ansatz zur monetären Betrachtung.....	106
8.3	Aufbau und Struktur des Gesamtmodells	111

8.4	Umsetzung und Anwendung des Konzepts anhand einer beispielhaften Prozessfolge aus dem Rapid Manufacturing	115
8.4.1	Betrachtete technische Kenngrößen	115
8.4.1.1	Modellbasis - technische Kenngrößen	116
8.4.2	Betrachtete betriebsorganisatorische Kenngrößen	121
8.4.2.1	Modellbasis - betriebsorganisatorische Kenngrößen	122
8.4.3	Der Gesamtaufbau.....	123
8.4.3.1	Das SVM - Modell.....	124
8.4.4	Das Gesamtmodell in „Witness“ – die virtuelle Prozessfolge	129
8.4.5	Verifikation des Gesamtmodells	131
9	Zusammenfassung und Ausblick	138
10	Summary	140
Literatur	142
Anhang	159

Abbildungen und Tabellen

Abb. 1- 2 Ursachen für Varianz und deren Auswirkungen auf die Produktion	20
Abb. 1- 3 Ganzheitliche Betrachtungsweise: Verzahnung von betriebsorganisatorischen und fertigungstechnischen Zielgrößen	22
Abb. 2- 1 Ganzheitliche Simulation von Fertigungssystemen	28
Abb. 2- 2 Funktionsprinzip diskreter ereignisorientierter Simulation	29
Abb. 2- 3 Prioritätenmechanismus zur Sequentialisierung paralleler Ereignisse	30
Abb. 2- 4 Klassifizierung der Simulationswerkzeuge	31
Abb. 3- 1 Einordnung der gekoppelten Betrachtung innerhalb der Fabrikstruktur	39
Abb. 3- 2 Zusammenspiel der CIM Komponenten	42
Abb. 4- 1 Modell einer lernenden Maschine	53
Abb. 4- 2 Eine trennende Hyperebene (w , b) für ein 2-dimensionales Trainingset	55
Abb. 4- 3 Vereinfachte Darstellung eines mehrlagigen Perzeptrons	57
Abb. 4- 4 Der geometrische <i>Margin</i> von zwei Punkten	58
Abb. 4- 5 <i>Margin</i> eines Trainingssets	58
Abb. 4- 6 Ein-dimensionale Regressionsfunktion	59
Abb. 4- 7 Vereinfachung des Klassifikationsprozesses durch eine Featureabbildung	65
Abb. 4- 8 Unklassifizierbare Regionen bei der One-Against-All-Klassifikation für $k=3$	71
Abb. 4- 9 Prinzip beim Decision-Directed-Acyclic-Graph-Verfahren	73
Abb. 4- 10 Trennebenen bei der OAA-Fuzzy-Klassifikation	75
Abb. 4- 11 Prinzipieller Ablauf bei der Klassifikation	77
Abb. 4- 12 Darstellung der Trefferquoten für vier verschiedene Datensätze in Abhängigkeit der Parameter γ und C bei Einsatz des Radialbasis-Kerns	80
Abb. 4- 13 Vorverarbeitung und Merkmalsgewinnung bei der Texterkennung	81
Abb. 4- 14 Nutzung der Grünfläche der Legehennen	81
Abb. 4- 15 Zuordnung ob männlich oder weiblich	82
Abb. 4- 16 Beispiel Anfis-Editor	84
Abb. 4- 17 Clustering von Datenstrukturen	85
Abb. 4- 18 YALE Benutzeroberfläche bei Multiklassifikation	86
Abb. 5- 1 Physikalische Zusammenhänge beim Lasersintern	87
Abb. 5- 2 Prinzipieller Aufbau einer Lasersinteranlage	88
Abb. 5- 3 Prozessparameter und ihr Einfluss	88
Abb. 5- 4 Abhängigkeit der Bauteildichte von der Scangeschwindigkeit	89
Abb. 5- 5 Lasersinterprozess mit Einfluss- und Kenngrößen	90
Abb. 5- 6 Beispiel: Strahlspanen real und virtuell	92
Abb. 5- 7 Zusammenhang zwischen Dauerfestigkeit und Kugelgeschwindigkeit sowie Überdeckung und Strahlzeit	93

Abb. 5- 8 Kugelstrahlen mit Einfluss- und Kenngrößen.....	94
Abb. 5- 9 Mittenrauwert Ra	95
Abb. 5- 10 Rauheitsprofil nach DIN 4168	95
Abb. 6- 1 Nutzen einer gekoppelten Abbildung technischer und betriebsorganisatorischer Kennzahlen.....	98
Abb. 6- 2 Nutzen einer gekoppelten Modellierung am Beispiel der Prozessfolge Lasersintern - Kugelstrahlen	100
Abb. 8- 1 Einsatz und Nutzen der gekoppelten Betrachtung	105
Abb. 8- 2 Grundlogik des gekoppelten Modells	106
Abb. 8- 3 Gedankenskizze Kreisläufe im Fertigungssystem	109
Abb. 8- 4 Grundlogik des Gesamtmodells	111
Abb. 8- 5 Modellstruktur für eine Prozessfolge	112
Abb. 8- 6 Detaillierter Modellaufbau in der Arbeits- und Prozessplanung	113
Abb. 8- 7 Detaillierter Modellaufbau für den operativen Einsatz.....	114
Abb. 8- 8 Vorgehensweise bei der Ermittlung der technischen Kenngrößen	116
Abb. 8- 9 Lasersinteranlage EOSINT M 250 am IFF	117
Abb. 8- 10 Tastschnittgerät: Hommel Tester 8000 am Fraunhofer IPA	117
Abb. 8- 11 Messung der Oberflächenrauheit mittels Einkufentastsystem	118
Abb. 8- 12 Schematische Darstellung der Versuchsprobe	118
Abb. 8- 13 Varianz der Rauigkeit R_a [μm] der lasergesinterten Proben.....	119
Abb. 8- 14 Kugelstrahlanlage MJ/S am IFF	119
Abb. 8- 15 Beispiele für Versuchsproben	120
Abb. 8- 16 Schematische Darstellung der Prozessfolge mit den zeitlichen Kenngrößen	121
Abb. 8- 17 Kostensätze der einzelnen Strahlkombinationen	123
Abb. 8- 18 Gesamtmodell für die Prozessfolge Lasersintern – Kugelstrahlen	124
Abb. 8- 19 Schematischer Aufbau des SVM-Modells	125
Abb. 8- 20 Darstellung der Trefferquoten in Abhängigkeit der Parameter γ und C	126
Abb. 8- 21 Visualisierung der Trennebenen und der Klassentrennung	127
Abb. 8- 22 Klassenausprägungen der trainierten SVM: Rauheit - Zeit	128
Abb. 8- 23 Klassenausprägungen der trainierten SVM: Rauheit – Kosten.....	128
Abb. 8- 24 Klassenausprägungen der trainierten SVM: Zeit - Kosten	129
Abb. 8- 25 Darstellung der Kernelemente des Witness-Modells.....	129
Abb. 8- 26 Gesamtaufbau zur Verifikation - Ermittlung Testdatenvektoren.....	132
Abb. 8- 27 Beispielhafte Vektorklassifikation und Maßnahmenzuordnung.....	132
Abb. 8- 28 Stückkosten mit bzw. ohne SVM-Modell.....	135
Abb. 8- 29 Gesamtdurchlaufzeiten mit bzw. ohne SVM-Modell	135
Abb. 8- 30 Vergleich der Oberflächenrauigkeiten vor und nach dem Kugelstrahlen.....	136

Tab. 2- 1 Übersicht der verschiedenen Simulationsansätze und beispielhafte Einsatzgebiete.....	35
--	----

Tab. 3- 1 Komponentenausschnitt von SAP R/3	45
---	----

Tab. 4- 1 Bekannte Kernfunktionen im Überblick	69
Tab. 8- 1 Tabellarische Übersicht der Testvektoren und Maßnahmenzuordnung	134

Abkürzungen und Formelzeichen

AC	Accounting
AF	Auftragsfolge
ANFIS	Adaptive Neuro Fuzzy Interferenz System
AP	Advanced Planning
$\arg \max$	Argument des Maximums (Funktion)
BC	Basic Components
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAP	Computer Aided Planning
CAQ	Computer Aided Quality
CFD	Computer Fluid Dynamics
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CONWIP	Constant Work in Process
DES	Discrete Event Simulation
DAG	Directed Acyclic Graph
ECOC	Error Correcting Output Coding
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ERP	Enterprise Resource Planning
FEM	Finite-Elemente-Methode
FGK	Fertigungsgemeinkosten
FS	Fertigungssystem
FVM	Finite-Volumen-Methode
HR	human Resource
ISIS	Information Signal Images Systems
IT	Information Technology
KS	Kugelstrahlen
LDA	Lineare Diskriminanzanalyse
LIBSVM	Library for Support Vector Machines

LG	Lager
LO	Logistics
LS	Lasersintern
MES	Manufacturing Execution System
MLP	Multi-Layer-Perzeptron
MRP	Material Requirements Planning
MRP2	Manufacturing Resource Planning
NC	Numerical Control
OAA	One-Against-All
OAo	One-Against-One
PDA	Personal Digital Assistant
PDES	Parallel Discrete Event Simulation
Poly	Polynomiell
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PS	Produktionssystem
RBF	Radialbasis-Funktion
SAP	Systemanalyse und Programmentwicklung
SOM	Self Organizing Maps
SVM	Support Vektor Maschine
TT	Termintreue
VC	Vapnik-Chervonenkis-Dimension
VOF	Volume of Fluid Methode
YALE	Yet Another Learning Environment

α	Codewörter
x	Input-Daten
y	Output-Daten
x_i	n-dimensionaler Eingabevektor
w	Normalenvektor
γ	Kernparameter Radialbasis Funktion
C	Güteparameter
ξ	Schlupfvariable

l	Anzahl der Beobachtungen
n	Anzahl der Vektoren
Φ	Bildvektor
d	Dimension
m_{xy}	Membershipwert
b	Biasterm
DLZ	Durchlaufzeit
K	Kosten
ΔK	Kostendifferenz
$K(x,y,z)$	Kernfunktion
K_A	kalkulatorische Abschreibungen
K_Z	kalkulatorische Zinsen
K_I	Instandhaltungskosten
K_R	Raumkosten
K_E	Energiekosten
MSS	Maschinenstundensatz
R_a	Oberflächenrauigkeit
R_{min}	kleinstgemessene Rauigkeit
R_{max}	größte gemessene Rauigkeit
ΔR	Rauigkeitsdifferenz
TQ	Trefferquote
$T(l)$	Anzahl richtig klassifizierter Daten
t	Zeit
ΔT	Zeitdifferenz
T_T	Transportzeit
T_L	Einlagerungszeit
T_B	Bearbeitungszeit
T_N	Nebenzeit
T_R	Rüstzeit

1 Wissenschaftliche Fragestellung und Zielsetzung

Das Verstehen von Wirkzusammenhängen zwischen Prozessparametern, sich hieraus ergebenden Produkteigenschaften und den betriebsorganisatorischen Abhängigkeiten in der Fertigung, sind Basis für eine effektive Planung, Steuerung und Optimierung. Die kundenorientierte Ausrichtung einer Fertigungslinie mit den Zielgrößen Produktkosten, -qualität und Lieferzeit kann prinzipiell mittels Klassifikationsverfahren erreicht werden. Dabei kann jede relevante Stellgröße der Fertigungslinie, sowohl auf technischer als auch organisatorischer Ebene abgebildet und klassifiziert werden. Dadurch wird eine gekoppelte Betrachtung der Wirkzusammenhänge im Hinblick auf das Resultat am Ende der Prozessfolge und eine Zuordnung von Maßnahmen ermöglicht. Ein derartiges ganzheitliches Prognosemodell soll in dieser Arbeit durch den Einsatz von Support Vektor Maschinen geschaffen werden.

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt, gepaart mit einem steigenden Druck durch internationale Wettbewerber, verlangt heute von produzierenden Unternehmen eine durchgängige strategische Ausrichtung, um am Markt wirtschaftlich erfolgreich zu sein [Adam 1998, Bleicher 2004]. Je nach Marktsituation und aktuellen Rahmenbedingungen sind unterschiedliche Strategien Ziel führend und ermöglichen es den Unternehmen, sich in den Leistungszielen Zeit, Kosten und Qualität von konkurrierenden Unternehmen abzuheben [Braczyk 1997, Sauerwein 1998, Lukas 2001]. Speziell in Deutschland hat sich hierbei die Entwicklung und Implementierung von neuen Technologien (Technologieführerschaft) sowie kundenspezifischen Produktlösungen zu einem relevanten Marktsegment der Wirtschaft entwickelt [Westkämper/Verl 2007]. Variantenreiche Einzel- und Kleinserienfertiger, die durch hohe Kunden- und Technologieanforderungen geprägt sind, bilden mit einem Marktvolumen von 8,3 Milliarden Euro einen der wichtigsten Maschinenbauzweige [VDW 2006]. Um entsprechende Produkte wirtschaftlich anbieten zu können und somit dem internationalen Preisdruck gewachsen zu sein, müssen alle Potentiale der Wertschöpfungskette in der Produktion ausgeschöpft werden [Verl 2006]. Gleichzeitig muss auf Grund der kundenspezifischen Produkt-

vielfalt ein hohes Maß an Flexibilität erreicht werden [Westkämper 2004]. Die Arbeits- und Prozessplanung muss schnell und effizient auf neue Kundenwünsche und geänderte Rahmenbedingungen, wie z.B. neue technologische Entwicklungen, reagieren können. Neben dem Personal sind hierfür alle für den Fertigungsprozess relevanten Ressourcen wie Arbeitsplatz, Werkzeuge, Vorrichtungen, Materiallogistiksysteme, Energie und Information betroffen [Westkämper 2006_3, Westkämper/Verl 2007]. Neue Werkstoffe und Produktionsverfahren, wie z.B. das Hochleistungszerspanen und generative Fertigungsverfahren sowie innovative Beschichtungstechnologien, eröffnen hier neue Möglichkeiten, erhöhen aber auch die zu handhabende Komplexität in den Planungsabteilungen [Brecher 2005, Weinert 2005, Westkämper 2006_3]. Trotz des variantenreichen Produktportfolios fordert der Kunde weiterhin qualitativ hochwertige, also seinen Anforderungen angepasste Lösungen in kurzen Lieferzeiten zu marktüblichen Preisen. Diesem Anspruch können produzierende Unternehmen nur durch weitere Flexibilisierung der Produktionsressourcen und optimierte Planungs- und Steuerungsprozesse erfolgreich begegnen [Spath 2002, Wildemann 2003, Pritschow/Klemm et al. 2003, Wiendahl 2006].

Nicht nur im Ingenieurbereich haben sich daher die Modellierung und Simulation von Systemen immer mehr durchgesetzt [Verl et al. 2006]. In vielen Unternehmen sind sie als Planungs- und Optimierungsinstrument sowohl für logistische als auch technische Prozesse nicht mehr wegzudenken. Hierbei ist allerdings der Einsatz der Simulationstechnik stark segmentiert und abgegrenzt, so dass besonders bei der Abbildung von Prozessfolgen eine Durchgängigkeit der Informationen nicht gegeben ist [Klemm et al. 2006]. Während für viele Fertigungsverfahren die einzelnen Teilprozesse bereits simuliert werden können, ist die Betrachtung und Optimierung des Gesamtsystems oft nur durch Abschätzungen möglich und kann nicht im eigentlichen Sinne simuliert werden. Da nicht automatisch die Summe der optimierten Einzelprozesse zu einer Optimierung des Fertigungssystems führt, müssen hierfür vielmehr die Abhängigkeiten und Wirkzusammenhänge der Einzelprozesse sowie der Informations-, Material- und Werkzeugfluss des Gesamtsystems betrachtet werden. Weiter unterliegen die am Wertschöpfungsprozess beteiligten Prozesse einer Varianz. Diese ist die Summe aus technischer und organisatorischer Varianz sowie den entsprechenden Wirkzusammenhängen und wirkt sich direkt auf die Zielgrößen eines Fertigungssystems aus [Gebser et al. 2004]. Abbildung 1-1 zeigt einige Ursachen für Varianzen im Produktionsprozess und deren Auswirkungen auf die Produktion.

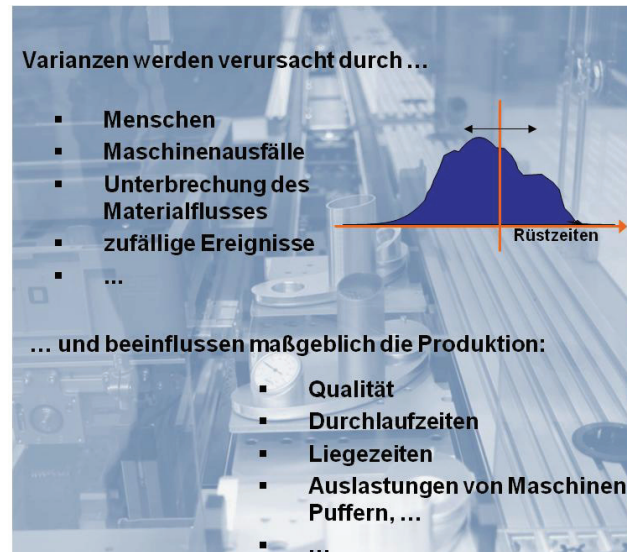


Abb. 1- 1 Ursachen für Varianz und deren Auswirkungen auf die Produktion

Um dieser Varianz zu begegnen werden in der Planung der Prozesse und Prozessketten Sicherheiten in Kauf genommen, welche sich negativ auf die Gesamteffizienz des Systems auswirken. Aus diesem Grund ist es für eine ganzheitliche Optimierung der gesamten Produktionsstätte mittels Prognosemodellen notwendig, die verschiedenen technischen Toleranzen und organisatorischen Kenngrößen möglichst nahtlos miteinander zu verknüpfen. Ein häufiger Grund für Schwierigkeiten hinsichtlich der Einhaltung der Gesamtzielgrößen in der Fertigung sind fehlende oder falsche Informationen. Beispiele hierfür sind:

Fehlmengen und Fehlaufwendungen:

- Fehlerhafte Lieferung von Betriebsmitteln und Material an die Fertigung
- Hohe Durchlaufzeiten
- Falsche Auftragsfolgen
- Mindere technische Qualität
- Unzureichende Kundenzufriedenheit

Auftragsverzögerungen:

- Falsche Fertigungsparameter
- Hohe Suchzeiten
- Lange Liegezeiten
- Fehlproduktion und Nacharbeit

Erhöhte Kosten:

- Hohe Variantenvielfalt
- Hohe Bestände
- Hohe Bedarfe auf Grund von kleinen Losgrößen.

Zukünftige Bemühungen sollten deshalb nicht nur ihren Schwerpunkt auf die Optimierung einzelner Prozesse legen, sondern die gesamtheitliche Verbesserung der Qualität und somit der Kundenzufriedenheit anstreben. Diese durchgängige und ganzheitliche Modellierung hat nicht nur die Vorzüge, eine Vielzahl von Planungsoptionen im Vorfeld miteinander in Einklang zu bringen um so die Reaktionsfähigkeit und Flexibilität zu erhöhen, sondern ermöglicht eine schnelle Bewertung von Maßnahmen sowie eine ganzheitliche monetäre Betrachtung [Westkämper 2006]. Der zu erbringende Aufwand, z.B. bei der Inbetriebnahme von neuen oder veränderten Produktionsstätten, könnte somit durch vorherige virtuelle Abnahmen und Probeläufen erheblich reduziert werden. Maßnahmen können im Vorfeld im Hinblick auf ihre Effizienz sowie monetär bewertet, Schwachstellen vorab erkannt und behoben werden. Im operativen Einsatz könnte eine ganzheitliche Prognose direkt mit entsprechenden Maßnahmen auf Varianzen in der Linie reagieren und somit im Hinblick auf die Zielgrößen des Gesamtsystems hin optimieren.

Zur Verwirklichung dieser Idee bedarf es neuer Modelle und Prognoseansätze in der Fertigung, die eine Betrachtung über die Prozessgrenzen hinweg zulassen. Zur ganzheitlichen Betrachtung eines Fertigungssystems und dessen Abbildung in einem Systemmodell müssen neben den technischen Prozessen auch die Organisationsstruktur sowie die Flüsse innerhalb des Fertigungssystems mit Berücksichtigung aller relevanten Schnittstellen abgebildet werden.

Hauptschwierigkeit bei der ganzheitlichen Betrachtung ist die Kopplung organisatorischer und fertigungstechnischer Kenngrößen für eine integrierte Lösung von Planungs-, Steuerungs- und Optimierungsaufgaben (Abb. 1-2). Bisher basieren die verfügbaren Arbeits- und Geschäftsprozesssimulationen auf den im Unternehmen vorliegenden Planungsdaten (z.B. Arbeitspläne, Ausfallstatistiken, Programmzahlprognosen usw.) und unterliegen zeitdiskreten oder ereignisorientierten Ansätzen. Die involvierten technischen Prozesse werden als „Black Box“ betrachtet und nicht simuliert. Somit werden in der Regel bei der Simulation nur Veränderungen im Informations- und Materialfluss, nicht aber technische Wirkzusammenhänge betrachtet. Der Einsatz neuer Technologien (z.B. Werkzeuge, Fertigungsverfahren usw.), ver-

änderte Prozessparameter sowie Varianzen können, basierend auf neuen Planungsdaten, nur abgeschätzt, nicht aber simuliert und systematisch analysiert werden. Daher ist dieses bisherige Vorgehen sehr langwierig und die Ergebnisse stark vom Expertenwissen der Planer abhängig. Die Kompensation von Varianzen beruht heute meist auf stochastischen Methoden wie z.B. der Statistical Process Control, bei der aber „rückwärts“ nachgeregelt und nicht „vorausschauend“ (Prognose) gesteuert wird. Eine direkte Bewertung von Maßnahmen zur Modifikation des Fertigungssystems oder der direkte Eingriff zur Steuerung des Gesamtsystems zur Einhaltung der geforderten technischen Toleranzen und Managementkenngrößen sind somit nicht oder nur unzureichend möglich. Eine gekoppelte Betrachtung der Wirkzusammenhänge der technischen Einzelprozesse mit der der Arbeits- und Geschäftsprozesse würde hier für eine deutliche Zeitersparnis und Verbesserung der Ergebnisse führen.



Abb. 1- 2 Ganzheitliche Betrachtungsweise: Verzahnung von betriebsorganisatorischen und fertigungstechnischen Zielgrößen

1.2 Ziel und Vorgehensweise

Das Ziel dieser Arbeit ist die gekoppelte Modellierung von technischen und betriebsorganisatorischen Zielgrößen einer Prozessfolge zur Zuordnung und Bewertung von Maßnahmen. Es sollen die bisher isoliert in Einzelsimulationen auf technischer Ebene (Prozesse auf den Maschinen und Anlagen) sowie innerhalb der Organisationsstruktur und Logistik betrachteten Kenngrößen miteinander vernetzt und ganzheitlich durch den Einsatz eines Klassifikationsverfahrens abgebildet werden. Hierzu müssen die prinzipiell unterschiedlichen Simulationsansätze (diskret und kontinuierlich) miteinander in Bezug gesetzt werden. Erst die über meh-

re Skalierungsebenen hinweg reichende verknüpfte Betrachtung der Zielgrößen ermöglicht ein ganzheitliches Prognosemodell und die Aufzeigung der Wirkzusammenhänge. Hierbei soll nicht nur eine Schnittstelle zwischen den Teilmodellen auf Prozessebene und den Logistikmodellen geschaffen, sondern ein gekoppeltes Modell entwickelt werden, welches die Kenngrößen aus beiden Bereichen erfasst und klassifiziert.

Damit soll zudem die Basis für eine zu einem späteren Zeitpunkt mögliche Kopplung der virtuellen mit der realen Fabrik geschaffen werden, die eine In-Situ Prozessführung, z.B. mittels eines Steuerkreises durch eine agentenbasierte Integrationsplattform, ermöglicht.

Zur Umsetzung dieser Ziele soll ein Ansatz erarbeitet werden, welcher die Zusammenhänge aus Zeiten, Kosten und Produkteigenschaften (Qualität) technischer und organisatorischer Prozesse und die Wirkzusammenhänge technischer und organisatorischer Kenngrößen aufzeigt. Die gekoppelte Klassifizierung der Kenngrößen soll mittels Support Vektor Maschinen (SVM) realisiert werden. Mit Hilfe der SVM-Methodik können in vorgegebenen Daten Abhängigkeiten und Strukturen erkannt werden. Hierbei werden nicht nur die vorhandenen Daten beschrieben, sondern eine gute Generalisierungsmöglichkeit für Prognosen neuer Beobachtungen erzielt. Die betrachteten Daten können sowohl aus der realen Linie, als auch aus Werkzeugen der Digitalen Fabrik stammen. Hierbei spielen die kommerziellen Werkzeuge der Materialfluss- und Logistiksimulation wie z.B. *eMPlant*, *Witness* oder *Quest* eine wichtige Rolle. Mit diesen Werkzeugen lassen sich bereits heute, basierend auf statistischen und abgeschätzten Daten, Kenngrößen wie Durchlaufzeiten, Auslastungen von Maschinen, Anlagen, Fahrzeugen und Mitarbeitern sowie Leerlaufzeiten usw. ermitteln. Dies geschieht allerdings ohne direkte Verknüpfung mit den technischen Prozessen. Die Berücksichtigung dieser Wirkzusammenhänge soll durch das in dieser Arbeit zu entwickelnde ganzheitliche Modell umgesetzt werden.

Zunächst soll ein prinzipieller Ansatz für varianzbehaftete Prozessfolgen mit gemeinsamen Zielgrößen zur ganzheitlichen Analyse und Bewertung entwickelt und dokumentiert werden. Dieser Ansatz wird so aufgebaut sein, dass er auf Prozessfolgen, welche in ihren Einzelprozessen gemeinsame Zielgrößen beeinflussen können, adaptiert werden kann. Die Anwendung dieser Methodik in einem Prognosemodell soll beispielhaft für eine Prozessfolge aus dem Rapid Manufacturing umgesetzt werden. Durch die werkzeuglose Fertigung direkt aus den CAD Daten bieten Rapid Manufacturing Verfahren große Potentiale im Hinblick auf eine wirtschaftliche und flexible Herstellung von Bauteilen und Kleinserien. Gerade das Lasersin-

tern zeichnet sich hierbei in jüngster Vergangenheit durch eine zunehmende Verbreitung aus [Zäh 2006]. Wie zu einem späteren Zeitpunkt in dieser Arbeit detaillierter betrachtet, unterliegt der Fertigungsprozess des direkten Metall Lasersinterns bei gleichen Prozessparametern Varianzen in den Produkteigenschaften der gesinterten Bauteile. Neben der Bauteilporosität ist hierbei besonders die Oberflächenrauigkeit mit einer Streuung behaftet. Diese kann in einem nachgeschalteten Kugelstrahlprozess ausgeglichen und eingeebnet werden. Mittels des in dieser Arbeit entwickelten Prognosemodells für die Prozessfolge Direktes Metall Lasersintern - Kugelstrahlen sollen Varianzen im Lasersinterprozess durch eine gezielte Steuerung der Prozessparameter des Strahlprozesses unter Berücksichtigung der Gesamtsystemziele Durchlaufzeit, Stückkosten und Oberflächenrauigkeit kompensiert werden.

Die Erstellung dieses neuen Konzepts zur ganzheitlichen Modellierung technischer Toleranzen und organisatorischer Kennzahlen, die Entwicklung eines Modells zur Analyse der Wirkzusammenhänge, deren Klassifizierung als auch einer Methode zur Bewertung von Maßnahmen in der Fertigung sowie deren Umsetzung an einer beispielhaften Prozessfolge ist die zentrale Aufgabenstellung der hier beschriebenen Arbeit, aus der sich die folgenden Arbeitspakete herleiten:

1. Darstellung der Grundlagen der Modellierung prozesstechnischer und betriebsorganisatorischer Simulationstechniken; Evaluation der Funktionsweise und Leistungsfähigkeit derzeitiger Fabriksimulationsmodelle
2. Ganzheitliche Betrachtung von Fertigungssystemen; Evaluation derzeitiger Systeme im industriellen Umfeld
3. Anpassung des mathematischen Hintergrunds der Support Vektor Methodik und deren Anwendung zur gekoppelten Abbildung der betriebsorganisatorischen und fertigungstechnischen Zielgrößen
4. Entwicklung einer prinzipiellen Methode zur Analyse der Wirkzusammenhänge technischer Prozessparameter untereinander sowie zu den betriebsorganisatorischer Zielgrößen mittels Support Vektor Maschinen
5. Erarbeitung und Integration einer monetären Bewertung
6. Adaption der entwickelten Methode und beispielhafte Umsetzung in einem Prognosemodell anhand einer Prozessfolge aus dem Rapid Manufacturing: Direktes Metall Lasersintern – Strahlspanen.

2 Simulationstechnik im fertigungstechnischen Umfeld

Nach VDI 3633 wird unter dem Begriff Simulation ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen verstanden. Die Grundlage jeder Simulation ist das Simulationsmodell. Dieses, in der Regel im Rechner generierte Abbild der Realität, ermöglicht ein besseres Verständnis für das qualitative und quantitative Verhalten von Prozessen, die entweder zu gefährlich sind um sie in Realversuchen zu erforschen (z.B. Radioaktivität [Harms 1997]) oder mit traditionellen theoretischen und experimentellen Vorgehensweisen nicht lösbar (z.B. Klimavorhersagen [Stenke 2005]) und/oder sehr zeit- und kostenintensiv sind (z.B. Crashversuche [Fischer 2005, Ghouanti 2005, SCAI 2005, Jankowski 2005, Kuhlmann 2005], Fertigungssysteme [Wanner 2006, Straube 2004, Christoph 2003, Sihn 2003]). Der Einsatz von Simulationswerkzeugen ermöglicht eine direkte Zeit- und Kostenoptimierung von Planungs-, Realisierungs- und Anlaufprozessen und hilft bei der Generierung von Maßnahmen sowie der Entscheidungsfindung.

Zunächst sind im Folgenden die Grundlagen und der Stand der Technik der Prozesssimulation auf technischer Ebene dargestellt. Im Weiteren wird der aktuelle Stand im Bereich der Geschäftsprozess- und Logistiksimulation erarbeitet und deren Funktionsweise erläutert. Abschließend wird in diesem Kapitel der Stand der Forschung im Bezug auf eine ganzheitliche Simulation von Fertigungssystemen abgebildet und zusammengefasst.

2.1 Simulation technischer Prozesse

Um heutzutage Produktionsanlagen optimal auszulegen, müssen sie vor der Realisierung simuliert werden. Die Werkzeuge für die virtuelle Fertigung stehen nahezu vollständig zur Verfügung und werden auch für die Auslegung der Anlagen seit geraumer Zeit eingesetzt [Svejda 2001].

Ausgangspunkt jeglicher Betrachtungen ist die Realität. Neben der detaillierten Untersuchung des zu simulierenden Systems spielt im ersten Schritt bereits die Aussage über den Konkretisierungsgrad des zu entwickelnden Modells eine große Rolle. Ausschlaggebend für den Zeit- und Kostenaufwand ist, ob mit Hilfe der Simulation lediglich erste Eindrücke über mögliche

Änderungen des zu untersuchenden Systems im Betriebszustand gewonnen werden sollen, oder ob differenzierte quantitative Aussagen über spezifische Eigenschaften und Zustände gefordert werden.

Um die Realitätstreue sowie eine anschließende Überprüfung der Simulationsergebnisse zu gewährleisten, müssen die entwickelten Modelle auf messbaren Größen basieren. Zu diesem Zweck werden in einem zweiten Schritt alle relevanten Mechanismen und Einflussfaktoren (z.B. Temperatur, Druck, Strömungsgeschwindigkeit usw.) experimentell bestimmt. Im dritten Schritt wird durch Einsatz analytischer, empirischer und numerischer Berechnungsverfahren das Modell des zu untersuchenden Prozesses entwickelt.

Analytische Berechnungsverfahren gehen von technischen, physikalischen oder chemischen Phänomenen aus, die basierend auf Erkenntnissen wissenschaftlicher Grundlagenforschung mathematisch formuliert werden. Aufgrund der Komplexität der meisten Prozesse ist es nur in den wenigsten Fällen möglich, diese mit Hilfe analytischer Verfahren vollständig zu beschreiben [Steinbuch 2004].

Empirische Berechnungsverfahren basieren auf der experimentellen Erfassung prozessrelevanter Ein- und Ausgangsgrößen (Temperatur, Druck, Zeit usw.). Ausgehend von diesen Größen werden Funktionen ermittelt, die das Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße beschreiben. Diese Funktionen ermöglichen es, bei der Wahl beliebiger, nicht bekannter Eingangsgrößen auf die entsprechenden Ausgangsgrößen zu schließen. Der Einsatz lernfähiger künstlicher Intelligenz soll in diesem Zusammenhang die Handhabung empirischer Modelle weiter vereinfachen. Durch ein autonomes Erstellen von Lernmustern wird es möglich, Aussagen über das Verhalten von Prozessparametern zu liefern, ohne dabei die physikalischen und mathematischen Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen detailliert zu kennen [Görz/Nebel 2003, Russel/Novig 2004].

Numerische Berechnungsverfahren sind heute in der computergestützten Prozesssimulation auf technischer Ebene am weitesten verbreitet. Die physikalischen Phänomene und Abläufe werden zunächst durch Differentialgleichungen mathematisch formuliert und in kleine, überschaubare Teilgebiete diskretisiert. Mit Hilfe numerischer Berechnungsverfahren, wie zum Beispiel der Finite-Elemente-Methode, werden im Anschluss Näherungslösungen für diese Differentialgleichungen ermittelt. Die Finite-Element-Methode (FEM) bzw. Finite-Volumen-

Methode (FVM) sind im Ingenieurwesen stark verbreitete Berechnungsverfahren. Begründet wurde das Verfahren Mitte der 60er Jahre unter anderem von R. Clough (Berkley), O. Zienkiewicz (Swansea) und J. Argyris (Stuttgart). Die FEM und FVM ist ein Gebietsverfahren, welches darauf basiert, Eigenschaften infinitesimal kleiner Elemente zu bestimmen und diese durch Knotenbedingungen miteinander zu verknüpfen [Grote 2004]. Die Approximation an den realen Verlauf der Zustandsgröße wird dabei umso besser je genauer die Ansatzfunktion, und/oder je kleiner die einzelnen Elemente gewählt werden. [Gebben 2000]

Als universell einsetzbares Instrument beschränkt sich die FEM bzw. FVM in ihrer Anwendbarkeit nicht nur auf die Strukturmechanik, in der sie ihre Ursprünge hat, sondern wird auch für die Hydro- und Aerodynamik, Akustik, Wärmeleitung und Feldprobleme aller Art eingesetzt.

Unabhängig von der eingesetzten Simulationsmethodik erfolgt abschließend die Auswertung der Simulationsergebnisse. Als Post-Processor-Plattform bieten die meisten Softwarelösungen dem Anwender im Anschluss der Berechnung die Möglichkeit, Ergebnisse für prozessbestimmende Parameter (z.B. Geschwindigkeit, Temperatur, Druck usw.) in Form von Vektor-, Linien-, Kontur- und Oberflächendarstellungen zugänglich zu machen. Die Kompatibilität zu anderen Softwareprogrammen wie z.B. *Microsoft EXCEL* und *MATLAB* ermöglicht den Austausch und die Weiterverarbeitung der Berechnungsergebnisse auf Basis von kommerziellen Business-Programmen.

Darüber hinaus ermöglichen moderne Simulationsprogramme dem Anwender über Visualisierungswerkzeuge seine Ergebnisse auch in Form von Grafiken oder Videoclips darzustellen und so auch fachfremden Personen anschauliche Informationen über die gewonnenen Erkenntnisse liefern zu können.

Vom Gießen (Urformen) [Bähr 2004, Heckel 2004] über Vorgänge beim Tiefziehen (Umformen) [Völkl 2004], die Zerspanung (Trennen) [Kindermann 2004, Gyldenfeldt 2003, Schulte 2005], dem Schweißen (Fügen) [Radaj 1999, Stadtaus 2004], der Lackiertechnik und Galvanik (Beschichten) [Scheibe 2000, Gerth 2006] bis hin zum Werkstoffverhalten auf Grund der Gefügestruktur (Stoffeigenschaften ändern) [Tushtev 2005, Tushtev 2005_2, Koch 2005] existieren heute zahlreiche Prozessmodelle für die unterschiedlichsten Fertigungsverfahren. In der Regel handelt es sich hierbei um Insellösungen, die speziell auf eine Anwendung eines Verfahrens hin entwickelt wurden. Eine verkettete Simulation auf horizontaler Produktionsebene (technische Prozesskette) ist nur vereinzelt, auf vertikaler Ebene, also

die Anbindung an die logistische Organisation und Struktur des Fertigungssystems, nicht vorhanden (Abb. 2-1).

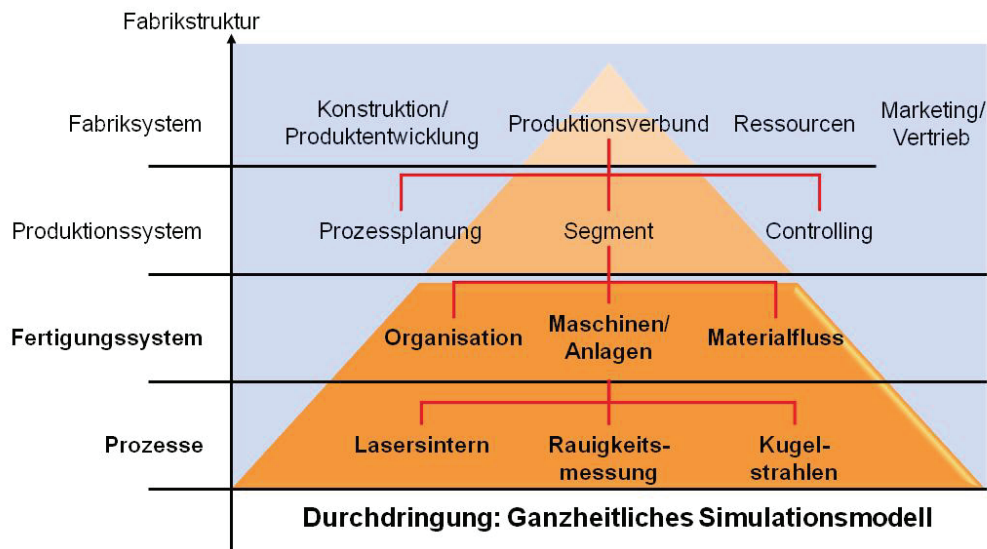


Abb. 2- 1 Ganzheitliche Simulation von Fertigungssystemen

2.2 Simulation betriebsorganisatorischer Prozesse

Auf dem Gebiet der Arbeits- und Geschäftsprozessoptimierung stellt die Simulation eine Schlüsseltechnologie für die Lösung der immer komplexeren Aufgaben dar [Hompele 2001]. Dies hat in den letzten Jahren einerseits zur verstärkten Entwicklung von Spezialsimulatoren für eingeschränkte Aufgabengebiete, andererseits zu allgemeingültigen Simulationskonzepten, die mit Hilfe von Anwendungsbibliotheken für den jeweiligen Einsatzzweck konfiguriert werden, geführt [Wenzel 2000].

Im Gegensatz zu den kontinuierlichen technischen Prozessen ändert sich bei Prozessen in betrieblich-organisatorischen Systemen, z.B. bei Abläufen in Fertigungssystemen, der Systemzustand nicht kontinuierlich, sondern diskret. Ein Beispiel für ein solches System ist die Warteschlange vor einer Maschinengruppe einer Fertigungsanlage: Der Zustand der Warteschlange (die Zahl der "wartenden" Werkstücke) ändert sich nur bei Ankunft oder Abgang eines Werkstücks. Diese Ankünfte und Abgänge können als diskrete Ereignisse betrachtet werden, d.h. als Ereignisse, die zu diskret über die Zeitachse verteilten Zeitpunkten auftreten. Bei Systemen, bei denen primär das Interesse auf den Ereignissen liegt, hat man es im Wesentlichen mit logischen Gleichungen zu tun, welche die Bedingungen für das Eintreten der Ereignisse enthalten. Die Simulation besteht hier in der Beobachtung von Zustandsänderungen des Modells als Folge zeitdiskret auftretender Ereignisse. Da dieser Modellansatz eine

Diskretisierung der Zeit und damit eine bestimmte Betrachtungsweise der Realsysteme voraussetzt, werden sie als Simulation zeitdiskreter Systeme definiert.

Zeitdiskrete Simulationsmodelle treten in vielfältigen Formen auf und werden für die unterschiedlichsten Problemstellungen eingesetzt. Innerhalb der zeitdiskreten Simulation haben sich verschiedene konzeptuelle Sichtweisen herausgebildet, wobei der ereignisorientierte Ansatz heute den wohl wichtigsten und am weitesten verbreiteten Modellierungsstil darstellt.

Bei der diskreten ereignisorientierten Simulation (discrete event simulation) wird eine modellinterne Simulationsuhr von der Ablaufkontrolle jeweils bis zum nächstfolgenden Ereigniszeitpunkt vorgerückt (Abb. 2-2). Dies impliziert, dass die Zeit zwischen zwei benachbarten Ereignissen im Allgemeinen variabel ist. Der Simulationszeitpunkt eines Ereignisses kann beliebig gewählt werden, wodurch eine wirklichkeitsgetreue Abbildung der Zustandsänderungen möglich ist. Dies wäre nicht der Fall, wenn man die Simulationsuhr in konstanten Zeitintervallen weiterschalten würde. Dann müssten alle Ereigniszeitpunkte auf das Ende eines solchen Intervalls verschoben werden, was bei ungünstiger Wahl der Schrittlänge erhebliche Verfälschungen des Modellverhaltens bewirken könnte [Kühn 2006].

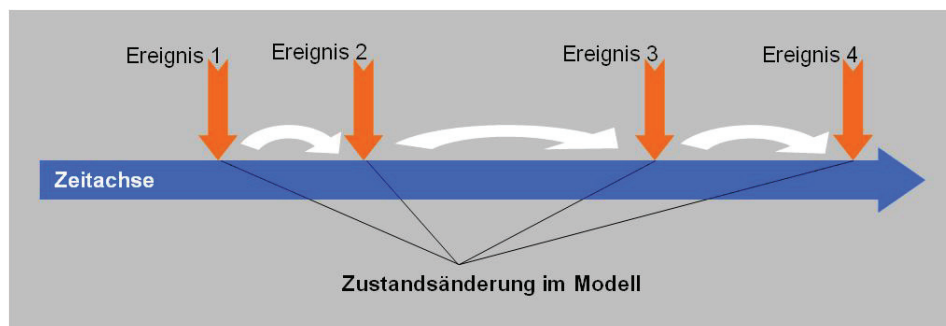
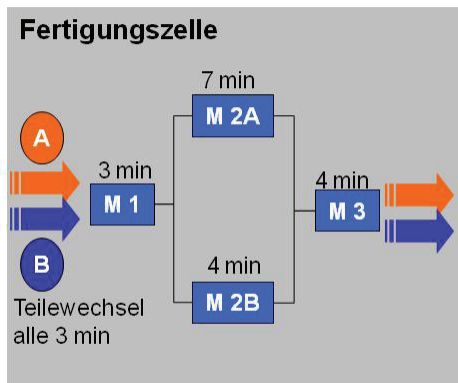


Abb. 2- 2 Funktionsprinzip diskreter ereignisorientierter Simulation

Bei der diskreten ereignisorientierten Simulation ist es durchaus möglich, dass Ereignisse simultan auftreten, also in einem Ereigniszeitpunkt zusammenfallen. Ein sequentiell arbeitender Rechner ist jedoch nur in der Lage, die Ereignisse (Zustandsänderungen) nacheinander abzarbeiten. Das erzwingt eine Sequentialisierung paralleler Ereignisse. Hierfür wird von den ereignisorientierten Simulationssprachen in der Regel ein Prioritätsmechanismus bereitgestellt. Abbildung 2-3 zeigt dies an einem Beispiel.



Zeit (Ereigniseintritt)	Ereignis	Zeit (Ereignisende)
0	A → M 1	3
3	B → M 1	6
3	A → M 2A	10
6	A → M 1	9
6	B → M 2B	10
10	A → M 3	14
14	B → M 3	18
...
...

Abb. 2- 3 Prioritätenmechanismus zur Sequentialisierung paralleler Ereignisse

Grundsätzlich beruht der ereignisorientierte Ansatz auf einer detaillierten Beschreibung von Ereignissen in Form von Ereignisroutinen. In einem ereignisorientierten Modell werden lediglich die Zustandsänderungen nachvollzogen, die zu den Ereigniszeitpunkten stattfinden, nicht jedoch die Tätigkeiten, die in den dazwischen liegenden Intervallen ablaufen. Zeitlich ausgedehnte Vorgänge werden somit auf eine Folge von Ereignissen reduziert, von denen jedes einzelne einem Punkt auf der Zeitachse (dem Ereigniszeitpunkt) zugeordnet ist. Unabhängig davon, wie viel Rechenzeit zur Ausführung einer Ereignisroutine auf einem Computer real verbraucht wird, geschieht sie konzeptuell zeitverzugslos. Die interne Simulationsuhr wird vor der Ausführung der Ereignisroutine zum Ereigniszeitpunkt vorgestellt, steht während der Ausführung still und springt nach vollzogener Zustandsänderung auf den Zeitpunkt des nächsten Ereignisses vor.

Zusammenfassend lassen sich die Hauptmerkmale der diskreten ereignisorientierten Simulation darstellen:

- Die Zustandsänderungen der Modellkomponenten treten diskret und nicht kontinuierlich auf.
- Ereignisorientiert bedeutet dabei, dass der Ablauf der Simulation durch das Eintreten eines Ereignisses (die Zustandsänderung einer Modellkomponente, z.B. Ende der Bearbeitung) gesteuert wird.

- Der Zeitpunkt, an dem im Programmablauf der Zustand der Komponente abgefragt wird, wird über einen definierten (z.B. Dauer der Bearbeitung) und nicht über einen konstanten Zeitschritt bestimmt.

Eine Kategorisierung der am Markt erhältlichen Simulationswerkzeuge in Produktion und Logistik ist in Abb. 2- 4 dargestellt. Auf Basis von Simulations- und Programmiersprachen werden heute unterschiedlichste, heterogene Simulatorenentwicklungs- und Simulationsumgebungen angeboten.



Abb. 2- 4 Klassifizierung der Simulationswerkzeuge [Bernhard 2002]

Simulatorenentwicklungsumgebungen, wie z.B. *CREATE!*, erlauben es, neue Simulatoren zu entwickeln und zu konfigurieren. Simulationsumgebungen, wie z.B. *Quest* und *eMPlant*, stellen offene Simulatoren dar, die auf den Anwendungsfall abgestimmt, bzw. für diesen um eigene Bausteine ergänzt werden können. Beide Lösungen wenden sich an Simulationsexperten, die für einen bestimmten Anwendungsfall ein Spezialwerkzeug schaffen möchten.

Die heute kommerziell erhältlichen Simulatoren lassen sich in ablauf- und strukturorientierte Werkzeuge unterteilen. Sie weisen einen erheblich stärkeren Anwendungsbezug als die zuvor beschriebenen Simulationsumgebungen auf. Einige Werkzeuge, wie z.B. *Witness*, nehmen eine Zwischenstellung ein und erlauben eine Modellierung aus beiden Sichtweisen heraus. Hierüber hinaus wird eine Vielzahl von Speziallösungen am Markt angeboten, die für spezielle Anwendungsbereiche konzipiert sind.

Am Fraunhofer Anwendungszentrum für Logistikorientierte Betriebswirtschaft wurde eine Analyse der im industriellen Umfeld relevanten kommerziellen Softwaretools durchgeführt [Dangelmaier 2003]. In den fünf Tabellen im Anhang (A 1) sind die Ergebnisse dieser Marktanalyse, ergänzt und erweitert um aktuelle Änderungen und Tools, einander gegenübergestellt. Schwerpunkt der Betrachtung waren die Systemeigenschaften, die Modellierungsphilosophie sowie die Simulationsumgebung der einzelnen Werkzeuge.

Im Hinblick auf ihre Marktdurchdringung heben sich *GPSS* (Simulationssprache), *ARENA* und *ProModel* (Simulationsumgebungen) sowie *WITNESS* (Simulator) unter den Simulationswerkzeugen der Produktion und Logistik von den restlichen Tools am Markt durch eine sehr hohe Anzahl an verkauften Lizenzen, bzw. Anwendern ab [Wenzel 2000].

Die gegenwärtige Problematik für den ganzheitlichen Einsatz der Simulationstechnik ist die fehlende Durchgängigkeit der Daten, besonders bei der Abbildung von Produktionsstätten. Wünschenswert ist daher zum einen eine möglichst enge Verknüpfung der verschiedenen Werkzeuge, um über die Schnittstellen einen durchgängigen Datenfluss zu ermöglichen, und zum anderen das Ersetzen der Black-Box-Betrachtung der technischen Prozesse durch eine gekoppelte Simulation der Fertigungsverfahren mit den Arbeits- und Geschäftsprozessen.

Gerade bei heute kommerziell verfügbaren Tools fehlen diese Verknüpfungen und Kopplungen der verschiedenen Planungs- und Simulationswerkzeuge über die Prozessebene hinweg, um Planungs- und Ergebnisdaten über Bereichsgrenzen verfügbar zu machen [Wenzel 2002].

Eine weitere Schwachstelle ist die fehlende Berücksichtigung der Hierarchiestufen in den Produktionssystemen. Der Übergang zwischen Grob- und Feinplanung wird durch die Planungs- und Simulationswerkzeuge noch nicht unterstützt. Erst eine durchgängige Begleitung des Produktionsmanagements durch Simulation schafft die Grundlage, eine Vielzahl von Planungsoptionen im Vorfeld miteinander in Einklang zu bringen und ist eine Grundvoraussetzung auf dem Weg von der digitalen zur virtuellen Fabrik.

2.3 Simulation von Fertigungssystemen

Der massive Anstieg von Produktvarianten bei gleichzeitig verkürzten Produktlebenszyklen und die Globalisierung der Marktwirtschaft sind nur einige Faktoren, an denen die Notwen-

digkeit eines Wandels von bisher einmalig geplanten, statischen Produktionsstrukturen zu anpassungs- und wandlungsfähigen modernen Produktionssystemen erkennbar wird. Die moderne Informationstechnik wird zum Element der Produktionssysteme und zum Treiber der schnellen Wandlung in den Prozessketten vom Kunden bis zum Kunden und von der Produktentwicklung bis zum Recycling [Westkämper 2006].

Im Folgenden wird eine komprimierte Zusammenfassung des Stands der Forschung im Hinblick auf Fertigungssysteme wiedergegeben:

Skalenübergreifende Modellierung

Die skalenübergreifende Nachstellung, Optimierung oder Vorhersage von Phänomenen, Prozessen und Systemen bis zur Realisierung kompletter virtueller Welten nimmt heute in nahezu allen wissenschaftlichen Disziplinen eine Schlüsselstellung ein. In der Meteorologie wurden bereits 1987 erste Lösungen zur Behandlung mehrskaliger Probleme vorgestellt [Pedlosky 1987]. Aktuelle Fragestellungen beschäftigen sich derzeit mit der Kopplung großskaliger Turbulenzgebiete mit kleinskaligen Vorgängen bei der Tropfenbildung und bei thermodynamischen Prozessen [Klein 2001; Majda 2003]. Die Behandlung von Mehrskalenproblemen in den Ingenieurwissenschaften findet sich derzeit hauptsächlich in den Prozessen der Materialmodellierung und Umformtechnik [Kunz 2001, Meyer et al. 2006] sowie in den entsprechenden Sonderforschungsbereichen und Schwerpunktprogrammen [SPP 1146 – Modellierung inkrementeller Umformverfahren; SPP 1155 – Molekulare Modellierung und Simulation in der Verfahrenstechnik; SFB 370 – Integrative Werkstoffmodellierung; SFB 404 - Mehrfeldprobleme in der Kontinuumsmechanik; SFB 475 – Komplexitätsreduktion in multivarianten Datenstrukturen; SFB 438 – Mathematische Modellierung, Simulation und Verifikation in materialorientierten Prozessen].

Simulation von Anlagen und Maschinen

Das immer komplexer werdende dynamische Prozessverhalten von Anlagen und Maschinen erfordert immer genauere und leistungsfähigere Verfahren zur Prozessanalyse, Prozessauslegung und Prozessführung verfahrenstechnischer Prozesse. Aktuelle Literatur zu den Forschungsarbeiten zur numerischen Simulation und Optimierung komplexer Fertigungssysteme finden sich in einzelnen Arbeiten [Börner 2001, Dössel 2001, Ye 2005, Scheibe 2004] ebenso wie in verschiedenen Sonderforschungsbereichen und Schwerpunktprogrammen [SFB 489 –

Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Bauteile; SPP 1138 – Modellierung von Größeneinflüssen bei Fertigungsprozessen].

Expertensysteme zur Steuerung und Regelung von Prozessen und Anlagen

Expertensysteme zur Regelung einzelner Prozesse bzw. Teilprozesse sind heute vielfältig vorhanden. Modelle zur Regelung komplexer Prozessketten sind allerdings nur vereinzelt, in nicht allgemeingültiger Form verfügbar. Bisherige Ansätze des Qualitätsmanagements zur Fehler-Reduktion in Prozessketten gehen von vorgelagerten Maßnahmen mittels FMEA [Pfeifer 1996] oder der Segmentierung der Prozesskette in so genannte Mikro-Prozessketten [Westkämper 1996] aus. In anderen Arbeiten werden Kenngrößen zwei aufeinander folgender Prozesse in die Qualitätsüberwachung mit einbezogen [Haberstroh 2000]. Allerdings besitzt dieses Modell eine nur geringe Übertragbarkeit auf andere Prozessketten und nicht die heute geforderte Flexibilität.

Simulation von Fabriken und Produktionsnetzwerken

Eine wesentliche Grundlage für die Erstellung einer Konzeption und Vorgehensweise für die Virtuelle Fabrik sind Kenntnisse auf dem Gebiet der Planungsmethoden und -werkzeuge. Mehrere Forschungsinstitute haben hierzu in den letzten Jahren eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten [Westkämper 2002, Müller/Wirth 2005, Jodin/Hömberg 2005, Müller et al. 2006, Baum et al. 2006, Scheibe et al. 2006] sowie entsprechende Sonderforschungsbereiche bearbeitet [SFB 457 – Hierarchielose regionale Produktionsnetze: Theorien, Modelle, Methoden und Instrumente; SFB 467 - Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen; SFB 559 – Modellierung großer Netze in der Logistik]. Die Bandbreite der Anwendungen reicht hier von Simulationen zur Produktionsplanungsunterstützung bis zur 3D-visualisierten Simulation zur Unterstützung des Vertriebsprozesses von Maschinen und Anlagen [Mitschang 2003, Kapp 2003, Westkämper 2005].

Zur Zusammenfassung und Komplettierung dieses Kapitels sind in der folgenden Tabelle industriell relevante Simulationsansätze und beispielhaft potentielle Einsatzmöglichkeiten dargestellt.

Verfahren / Gruppe	Simulationsmodelle	Einsatzgebiete
Ereignisorientierte und zeitdiskrete Modelle, Fabrikimulationen	Ablaufsimulation	Zeitmanagement
	Logistiksimulation	Anlagenplanung, Auslegung von Puffer- und Prozesszeiten
	Materialflusssimulation	Materialverbrauch, Kosten
	Robotiksimulation	Bahnführung beim Lackieren und bei der thermokinetischen Beschichtung, Optimierung von dynamischen Prozessen
	Ergonomiemodelle	Mensch-Maschinen Schnittstelle
	Wirtschaftsmodelle	Technologiealternativen
Numerische Rechenverfahren	Finite Elemente Methode (FEM)	Bauteileverzugs, Elektrodynamik, Schichtaufbau, kinetische Druckvorspannung, thermische Bilanzierung, Dehnungsfelder, Eigenspannungen, Schichtschädigung, Wärmetransport
	Finite Volumen Methode (FVM)	Luftströmung, partikelbeladene Freistrahströmung, Transport keramischer Pulver, Wärmeübergang Gas/Partikel, Massentransport in Elektrolyten
	Volume-of-fluid-Methode (VOF)	Filmverlauf, Verdunstung, Trocknung, Freie Oberflächenströmungen, Benetzung, Transport/Aufsteigen von Gasblasen
Stochastische Modelle	Molekulardynamik-Methode	Schichteigenschaften, Keimbildung, Morphologie, Rauheit, Eigenspannung, Kornfraktion, Schädigungsmechanismen
	Monte-Carlo-Simulation	Schichtaufbau, Keimverteilung
Expertensysteme	Agenten-Methode	Qualitätsmerkmale, Steuer- und Regelungstechnik, Monitoring
	Wissensbasierte Modelle und intelligente Datenbanken	Qualitätsmerkmale, Fehlerquellen im Fertigungsprozess, Verwaltung numerischer Simulationsergebnisse
	Online-Datenerfassung und Prozesssteuerung	Anlagentechnik, thermisches Spritzen, Partikeldiagnostik
Mathematische und statistische Verfahren	Korrelations- und Regressionsverfahren	Prozessgrößen - Qualitätsmerkmale
	Häufigkeitsberechnungen	Turbulenzmodellierung (CFD), Aufenthaltswahrscheinlichkeiten
	Analytische Ansätze	Aufladungsmodelle für die Lacktröpfchen
CAD- und Daten-Modellierung und Visualisierung	Rechnernetzgenerierung	Automatische Netzgenerierung, adaptive hybride FEM-Netze
	Augmented und Virtual Reality	Visualisierung, Interaktion

Tab. 2- 1 Übersicht der verschiedenen Simulationsansätze und beispielhafte Einsatzgebiete

3 Ganzheitliche Betrachtung von Fertigungssystemen

3.1 Elemente eines Fertigungssystems

Im Rahmen des betrieblichen Produktionsprozesses kommt der Fertigung eine besondere Bedeutung zu. In der Fertigung erfolgt die Umsetzung der in der Konstruktion und Arbeitsvorbereitung erarbeiteten Planungsvorgaben, wie Einzelteilzeichnungen und Arbeitspläne, in reale Werkstücke. Genauer bezeichnet erfolgt hierbei die Umwandlung der eingesetzten Rohmaterialien in die benötigten Einzelteile. Die Fertigung ist dadurch gekennzeichnet, dass verschiedene Material-, Informations- und Werkzeugzusammenschlüsse zusammenzuführen und parallel zu verarbeiten sind [Eversheim 1989].

Die Fertigungsabläufe werden zum größten Teil bereits in der Konstruktion festgeschrieben, z.B. durch Verfahrensvorschriften oder Reihenfolge und Spezifizierung der Vergütungsvorgänge. Auch die Wahl eines Werkstoffs kann durch dessen Eigenschaften erheblichen Einfluss auf die Art und Reihenfolge der Bearbeitungsvorgänge in der Fertigung haben. Die Arbeitsvorbereitung legt fest, zu welchem Zeitpunkt und auf welchem Fertigungsmittel die Bearbeitung vorgenommen werden soll. Somit muss die Fertigung sicherstellen, dass Material, Information, Betriebsmittel, Betriebsstoffe und monetäre Mittel in ausreichender Menge zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort zusammentreffen und zu einem zufrieden stellenden Bearbeitungsergebnis führen.

Im Folgenden wird der Bereich der Fertigung unter systematischen Gesichtspunkten betrachtet. Es entsteht ein Systemmodell in dessen Kern das Bearbeitungssystem mit dem direkten Wertschöpfungsprozess steht.

Das *Bearbeitungssystem* besteht aus Arbeitsplätzen oder Maschinen mit den Teilbereichen Werkstückvorbereitung, -bearbeitung und -nachbereitung. Einzelne Vorgänge eines Fertigungsauftrags werden nach Maßgabe der Arbeitspläne ausgeführt. Es werden Werkstücke bearbeitet, die von einem Materialsystem bereitgestellt und transportiert werden.

Das *Materialsystem* besteht aus Lager- und Transportsystemen und besitzt die Aufgabe der termin- und ablaufgerechten Ver- und Entsorgung. Es verbindet die einzelnen Bearbeitungssysteme untereinander. Teile durchlaufen das Materialsystem, auch als Materiallogistik bezeichnet, vom Eingang des Rohmaterials bis zur Fertigstellung und zum Warenausgang. Lager und Puffer übernehmen eine ausgleichende Rolle bei unterschiedlichen Arbeitszeiten. Der Materialfluss wird durch die Struktur des Produkts und der Organisation des Produktionssystems bzw. der Wertschöpfungskette bestimmt [Schneider 2005].

Das *Betriebsmittelsystem* versorgt termingerecht die Fertigung mit den benötigten Werkzeugen und Vorrichtungen und führt gebrauchte Betriebsmittel zur Wiederaufbereitung oder in ein Lager zurück, bzw. defekte und unbrauchbar gewordene Betriebsmittel zum Recycling. Die Steuerung des Einsatzes ist nur möglich, wenn die notwendigen Betriebsmittel verfügbar sind. Daher ist diese Aufgabe sehr eng mit der Betriebsmitteldisposition verbunden. Die Betriebsmitteldisposition führt den Betriebsmittelbestand im Lager und sorgt durch Bedarfs- und Bestellplanungen für eine rechtzeitige Beschaffung von Ersatzbetriebsmitteln bzw. neuen Betriebsmitteln. Die Betriebsmittel durchlaufen dieses System mehrfach, bis sie nicht mehr benötigt werden oder unbrauchbar sind. Darin enthalten sind Aufbereitung, Lagerung und Vorbereitung des Betriebsmitteleinsatzes. Die Teilbereiche sind durch den Betriebsmittelfluss miteinander verknüpft, der im Rahmen der Fertigungssteuerung einen offenen Kreislauf darstellt. Die im Rahmen der Disposition neu beschafften Betriebsmittel fließen ebenso in den Kreislauf ein, wie der Teil, der bereits eingesetzten und aufbereiteten Betriebsmittel. Auch entsteht ein Ausscheiden der verbrauchten und aufgrund der technischen und wirtschaftlichen Kriterien nicht mehr aufbereiteten Betriebsmittel [Eversheim 1989].

Das *Betriebsstoffsystem* versorgt die Fertigung mit den notwendigen Hilfsstoffen, wie Kühlschmierstoffe, Druckluft oder Energie.

Das *Informationssystem* liefert an das Bearbeitungssystem Fertigungsaufträge und alle zur Durchführung benötigten Informationen in Papierform oder auf elektronischem Wege, wie beispielsweise die NC-Programme für die Maschinen. Das Informationssystem beinhaltet ferner ein Rückmeldesystem zum Stand der Ausführungen oder zum Stand der Maschinen und Geräte. In dieses System sind die Managementfunktionen des Bereichs integriert. Dabei handelt es sich um das so genannte Fertigungs- oder Betriebsleitsystem, auch „MES Manu-

facturing Execution System“ genannt. Dieses beinhaltet die Aufgaben der Betriebsleitung, -steuerung und -überwachung. Ziel der Gestaltung des Informationsflusses ist es, die richtigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt an die richtige Stelle zu bringen. [Eversheim 1989]

Das *monetäre System* berücksichtigt sämtliche Geldmittel die dem Bearbeitungssystem zur Erfüllung dessen Fertigungsaufgaben zur Verfügung gestellt werden. Dies sind beispielsweise Arbeitslöhne oder Aufwendungen für Reparatur- und Instandsetzungsmaßnahmen der Maschinen und Werkzeuge, Transport- oder auch Lagerkosten. Hierbei werden Hauptkostenstellen, Hilfskostenstellen und allgemeine Kostenstellen, zwischen denen ein gegenseitiger Leistungsaustausch stattfindet, unterschieden. Hauptkostenstellen, auch Fertigungshauptstellen genannt, sind dadurch gekennzeichnet, dass in ihnen ein sichtbarer Fortschritt im Sinne des Fertigungsauftrags erzielt wird. Dies kann ein Fertigungsbereich, eine Maschinengruppe oder eine einzelne Maschine sein. In einer solchen Hauptkostenstelle ist es möglich, mit Hilfe der Parameter Bearbeitungszeit und Maschinenkosten, exakt den Aufwand zu ermitteln, der einem ganz bestimmten Kostenträger zugeordnet werden muss. Die Fertigungshauptstelle kann ihrer Aufgabe nur gerecht werden, wenn ihre Betriebsbereitschaft ständig gewährleistet ist. Diese Leistung ist von verschiedenen Hilfskostenstellen zu erbringen. Zwar lassen sich die Kosten für die erbrachte Leistung noch exakt einer Hauptkostenstelle anlasten, innerhalb dieser aber kommt sie verschiedenen Aufträgen oder Produkten zugute. Um dennoch eine Belastung der einzelnen Aufträge nach dem Verursachungsprinzip zu gewährleisten, werden die innerhalb einer Abrechnungsperiode zu erfolgenden Leistungen, die von Hilfsstellen an Hauptstellen abgegeben werden, als Zuschlag auf die Maschinen- oder Lohnkosten aufgerechnet. Somit werden diese wiederum entsprechend den Bearbeitungszeiten auf die einzelnen Werkstücke umgelegt.

Darüber hinaus werden auch im Fertigungsbereich Leistungen erbracht, die für den Ablauf erforderlich sind, aber weder einer Haupt- noch einer Hilfskostenstelle direkt angelastet werden können. Beispiele für solche auf allgemeine Kostenstellen zu verrechnenden Leistungen sind Transportvorgänge, Lagerwesen und ähnliches.

Die hier vorgestellte Arbeit verfolgt das Ziel, einen Beitrag zur ganzheitlichen Modellierung komplexer Fertigungssysteme zu leisten und organisatorische sowie technische Teilaspekte mit einem geeigneten Prognosemodell für Prozessfolgen effizient auf Rechnersystemen abzubilden. Die ganzheitliche Modellierung von Prozessfolgen ist eine der zentralen Vorausset-

zungen, um virtuelle Fabriken realitätsgetreu nachbilden zu können und stellt somit ein modernes, effektives Werkzeug zur Planung und Optimierung von Fertigungsprozessen und Fabrikabläufen dar (Abb. 3-1).

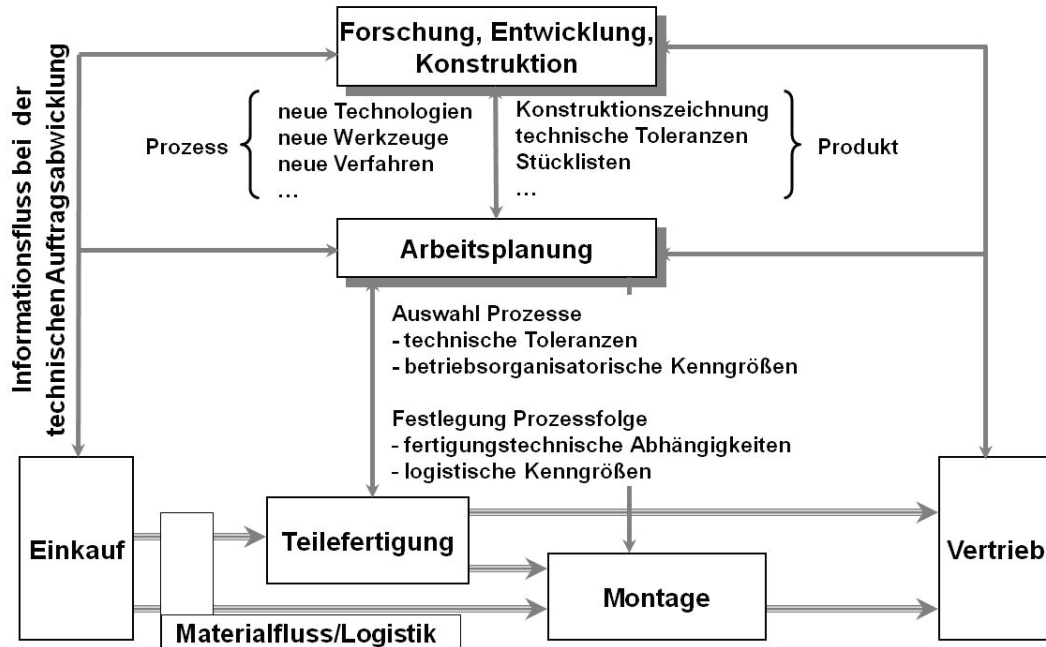


Abb. 3- 1 Einordnung der gekoppelten Betrachtung innerhalb der Fabrikstruktur

In diesem Zusammenhang beruht die langfristig erfolgreiche Etablierung der virtuellen Fabrik auf zwei grundsätzlichen Säulen:

1. dem Vorhandensein tragfähiger, die Realität in allen entscheidenden Aspekten richtig wiedergebender Modelle für die involvierten technischen und betriebsorganisatorischen Prozesse;
2. der Anknüpfung der erstellten Modelle in handhabbare Softwareprogramme, die alle ablaufenden Prozesse und fabrikorganisatorischen Zusammenhänge darstellen und steuern können.

In dieser Arbeit soll deshalb ein Prognosemodell geschaffen werden, welches die technischen Toleranzen und betriebsorganisatorischen Kenngrößen darstellt, koppelt und eine Integration in bisherige Abbildungsmodelle der Digitalen Fabrik ermöglicht. Unter dem Begriff Digitale Fabrik werden die bisherigen Methoden der Modellierung mit ereignisorientierten Simulationen und der Visualisierung zusammengefasst. Erst mit der Integration realitätsgetreuer Pro-

zessimulationen wird die statische Abbildung der Digitalen Fabrik zu einer dynamischen Abbildung der Virtuellen Fabrik (siehe auch Kapitel 2.2).

Der allgemeingültige Grundaufbau des gekoppelten Modellansatzes soll einen vielfältigen Einsatz im zukünftigen Engineering ermöglichen. Hier können vor allem eine effektivere Führung bei Fertigungsprozessen, die Optimierung von Maschinen, das Reverse Engineering, die Planung der Produktion oder die Gestaltung komplexer Fertigungssysteme genannt werden.

3.2 Betrachtete Systeme im industriellen Umfeld

Basierend auf dem zuvor beschriebenen Modell eines Fertigungssystems werden bereits heute Systeme zur Betriebssteuerung eingesetzt. Im Folgenden wird deren Funktionsweise beschrieben und Defizite identifiziert.

3.2.1 Produktionsplanung und -steuerung (PPS)

Die Hauptaufgabe der operativen Produktionsplanung und -steuerung, kurz PPS genannt, ist zur Ausschöpfung der Leistungspotentiale beizutragen, die durch die vorangegangenen Entscheidungen zur Gestaltung der Infrastruktur des Produktionssystems geschaffen wurden. Auf der Grundlage der produktpolitischen Entscheidungen werden nun Produktionsprogramme erstellt, in denen der Einsatz der vorhandenen Ressourcen für einen mittel- und kurzfristigen Planungszeitraum festgelegt werden. Auf diese Weise wird die Erreichung der strategischen Ziele weiter vorangetrieben. In einem hierarchischen Planungssystem bilden operative Entscheidungen das Bindeglied zwischen der Ressourcenbereitstellung und dem eigentlichen Produktionsgeschehen. Sie gehen der unmittelbaren Produktionsveranlassung voraus und sollen gewährleisten, dass die von den Kunden ausgehende Nachfrage mit dem vorhandenen Bestand an Ressourcen befriedigt werden kann.

In der operativen Produktionsplanung und -steuerung bestehen enge Wechselwirkungen zwischen der Produktion und den angrenzenden Funktionsbereichen der Beschaffung und der Distribution. Auch werden aufgrund der Entscheidungen im Bereich der Produktionsplanung oft unmittelbar logistische Prozesse, wie die Lagerung oder der innerbetriebliche Transport, ausgelöst. Ausgehend von einem vorgegebenen Produktprogramm sowie einer gegebenen Ausstattung an Produktionsanlagen und einem gegebenen Bestand an Stammarbeitskräften

sind die folgenden Punkte im Rahmen der operativen Produktionsplanung und -steuerung festzulegen [Günther 2005]:

- Wie sind die saisonalen Schwankungen von Kapazitätsbedarf und Kapazitätsangebot auszugleichen
- Welche absatzfähigen Produkte sollen in welchen Mengen in den einzelnen Perioden des Planungszeitraums produziert werden
- Welche Mengen an Verbrauchsfaktoren sind hierfür bereitzustellen
- In welcher Form sollen die Produktionsprozesse ablaufen.

Das computergestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssystem, ein Modul des Enterprise Resource Planning Systems (ERP-Systeme, siehe auch anschließendes Unterkapitel), ist historisch als isoliertes Anwendungssystem für den Produktionsbereich entstanden. Ebenso kam es zur Entwicklung der „Advanced Planning Systems“, die darauf abzielen, Planungsschwächen der konventionellen PPS-Systeme auszugleichen.

Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme bzw. „Advanced Planning Systems“ bilden den planerischen Kern des umfassenden Konzepts des Computer Integrated Manufacturing, kurz CIM. Unter diesem Begriff fasst man die integrierte Informationsverarbeitung für betriebswirtschaftliche und technische Aufgaben eines Industriebetriebs zusammen. Weitere CIM-Komponenten sind nach [Günther 2005]:

- Computer Aided Design (CAD)
- Computer Aided Planning (CAP)
- Computer Aided Manufacturing (CAM), sowie das
- Computer Aided Quality Assurance (CAQ)

Das Zusammenspiel oben erwähnter Komponenten des CIM-Konzeptes wird in Abbildung 3-2 deutlich.

Die operativen Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme werden in der betrieblichen Praxis in unterschiedlicher Weise durch EDV-gestützte Konzepte umgesetzt. Dabei unterscheiden sich die Systeme gemäß den folgenden Schwerpunkten:

- PPS-Systeme, die zentral für sämtliche Produktionssegmente alle Planungs- und Steuerungsaufgaben übernehmen. Diese Systeme, auch bekannt unter Material Requirements Planning (MRP) oder Manufacturing Resource Planning (MRP2) arbeiten nach dem Push Prinzip (Bring Prinzip). Sie folgen einem einheitlichen Sukzessivplanungskonzept und differenzieren nicht nach den spezifischen Anforderungen einzelner Produktionssegmente.
- Kapazitätsorientierte PPS-Systeme bieten eine methodisch anspruchsvolle, aber in der Praxis noch nicht umgesetzte Planungskonzeption. Diese Systeme sind auf dem Konzept der hierarchischen Planung aufgebaut und tragen den Besonderheiten unterschiedlicher Produktionssegmente Rechnung.
- Partielle PPS-Systeme sind Konzepte, die für den Bereich der Produktionssteuerung besondere Lösungsvorschläge anbieten. Diese Systeme arbeiten nach dem Pull-Prinzip (Hol-Prinzip), wie beispielsweise das so genannte Kanban System, eine Variante der Materialflusssteuerung. Eine weitere Implementierung des Pull-Prinzips stellt das CONWIP-System dar.

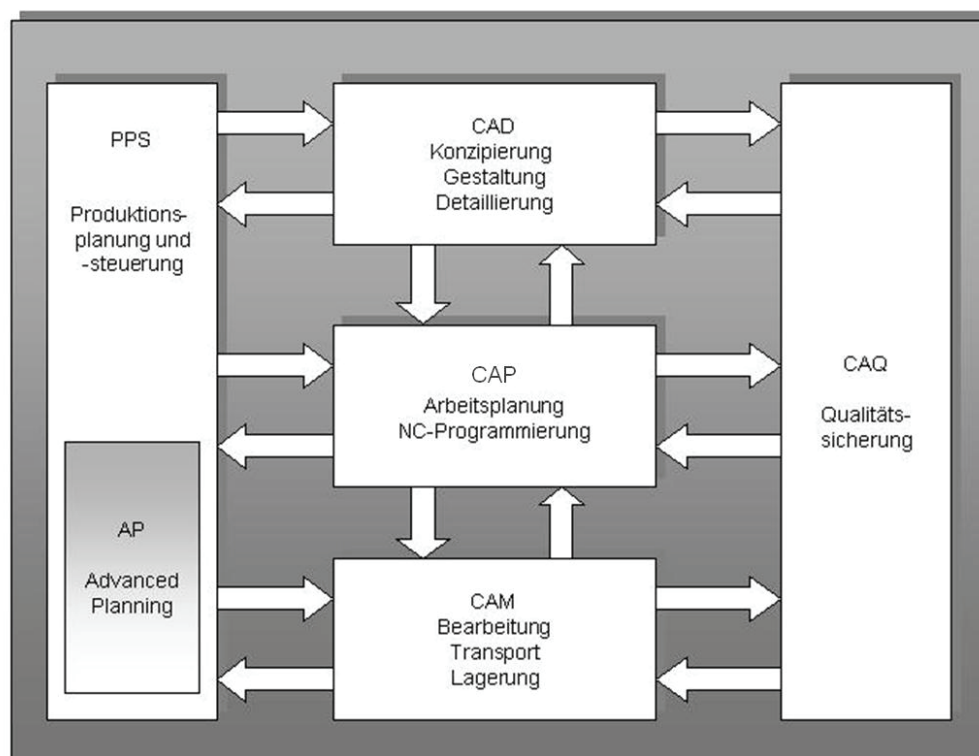


Abb. 3- 2 Zusammenspiel der CIM Komponenten [Günther 2005]

3.2.2 Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme

Enterprise Resource Planning Systeme dienen der transaktionsorientierten Koordinierung der Produktion mit dem Ziel der Kostenreduzierung. Mit der Fragestellung „Was ist? Was war?“ wird versucht, Produkte in unternehmensinternen Produktions- und Lagerprozessen sequentiell und top-down zu planen und zu steuern [Westkämper et al.2002].

Auf Grund seiner weiten Verbreitung im industriellen Umfeld soll die Wirkungsweise der ERP Systeme im Folgenden anhand des SAP R/3 Systems näher erläutert werden. Das SAP R/3 ist eine betriebswirtschaftliche Standardsoftware für Client-Server-Architekturen. Mit R/3 kommen Anwendungen für die Bereiche Rechnungswesen und Controlling, Produktion und Materialwirtschaft, Qualitätsmanagement und Instandhaltung, Vertrieb, Projektmanagement und Personalwesen zum Einsatz. Ganzheitlich konzipiert, aber auch modular nutzbar, ist R/3 für alle unternehmensspezifischen Anforderungen einsetzbar. Die betriebswirtschaftlichen Anwendungsmodule werden nachstehend kurz dargestellt [Weihrauch 2001].

Rechnungswesen

Die Aufgabe des Rechnungswesens ist es, den Wertefluss im Unternehmen zu planen, zu steuern und zu kontrollieren. Es kann aufgeteilt werden in externes und internes Rechnungswesen. Das externe Rechnungswesen ist nach den gesetzlichen Vorschriften strukturiert und dient der Offenlegungspflicht gegenüber externen Interessensgruppen. Das interne System besteht aus einer Kosten- und Leistungsrechnung und informiert Entscheidungsträger innerhalb des Unternehmens. Zentrale Komponenten im R/3-System sind das Finanzwesen, das Unternehmenscontrolling und das Immobilienmanagement.

Logistik

Die betriebliche Logistik umfasst die Gestaltung des Material-, Informations- und Produktionsflusses vom Lieferanten über die Produktion bis zum Abnehmer. Mit Unterstützung der Anwendungskomponenten des R/3 Systems können logistische Abläufe aufgrund der vorhandenen Daten- und Funktionsintegration über Bereichsgrenzen hinweg geplant, gesteuert und koordiniert werden. Es entfallen unnötige und zeitaufwändige Mehrfacheingaben bei der Bearbeitung logistischer Geschäftsvorfälle. Zu den Anwendungsmodulen der Logistik gehören der Vertrieb, die Materialwirtschaft, die Logistics Execution, die Produktionsplanung und -

steuerung, das Qualitätsmanagement, die Instandhaltung, der Kundenservice, das Projektsystem und das Umweltmanagement.

Personalwirtschaft

Die Personalwirtschaft, auch bekannt als Human Resources, beschäftigt sich mit den personalwirtschaftlichen Aufgaben. Sie wird in die Gruppen Personalmanagement, Personalzeitwirtschaft, Personalabrechnung, Veranstaltungsmanagement und Organisationsmanagement eingeteilt.

Produktionstypen

Bei den Fertigungsabläufen in der industriellen Produktion wird in Abhängigkeit vom Nachfrageverhalten, der Produktstruktur und der Ablauforganisation zwischen verschiedenen Produktionstypen unterschieden, die ihrerseits wiederum unterschiedliche Anforderungen an die Planung und Steuerung der Produktion stellen. Das SAP R/3 System unterstützt alle gängigen Produktionstypen wie die Diskrete Fertigung, die Serienfertigung, die Prozessfertigung und die Produktionsversorgung mit Kanban.

Planungsstrategien

Die Planung und Fertigung bzw. Beschaffung eines Materials kann auf verschiedene Arten erfolgen, was auch als Planungsstrategien bezeichnet wird. Eine Planungsstrategie wird dem Material über eine Strategiegruppe im Materialstamm zugeordnet. Die gängigsten Strategien sind nach [Weihrauch 2001] die:

- Strategien für die Lagerfertigung,
- Strategien für die Kundeneinzelfertigung,
- Strategien für die Montageabwicklung.

Die Organisationsstruktur in der Produktion

Die Struktur eines Unternehmens lässt sich durch verschiedene Organisationseinheiten für die Logistik, das Rechnungswesen und die Personalwirtschaft abbilden. Die wesentlichen Organisationseinheiten sind im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung der Mandant, der Buchungskreis, das Werk und der Lagerort.

Einen Ausschnitt der Vielzahl an Komponenten vermittelt Tabelle 3-1.

BC Basic Components	Basic-Service Betriebssystemplattform Datenbankplattform Frontend Services Development Workbench Business Engineer
AC Accounting	Financial Account Treasury Controlling Investment Management Project Systems Enterprise Controlling
LO Logistics	Sales and Distribution Materials Management Quality Management Plant Maintenance Production Planning
HR Human Resources	Personnel Management Time Management Payroll Accounting
CA Cross Application	Dokumentenverwaltung Dokumentationswerkzeuge Klassensystem CAD-Integration Computer Aided Testtool Open Information Warehouse Application Link Enabling Internet Application Components

Tab. 3- 1 Komponentenausschnitt von SAP R/3 (nach [Weihrauch 2001])

4 Mathematischer Hintergrund zur gekoppelten Modellierung – Support Vektor Maschinen (SVM)

Ein gerade in jüngster Zeit immer mehr an Bedeutung gewinnendes Klassifizierungsverfahren ist die Support Vektor Maschine. Support Vektor Maschinen (SVM) stammen aus dem Umfeld des maschinellen Lernens. Das maschinelle Lernen befasst sich „mit der computergestützten Modellierung und Realisierung von Lernphänomenen“ [Wrobel et al. 2000]. Das SVM Verfahren wurde Anfang der 90er Jahre von Vapnik entwickelt [Boser et al. 1992]. SVM sind auch für große Datensätze geeignet und generieren sehr schnell und zuverlässig Klassifizierungsergebnisse. Die SVM kann als eine der nennenswertesten Neuerungen im Bereich der Klassifikation der letzten Jahre angesehen werden [vgl. Schölkopf/Smola 2002]. Stammanwendungsgebiet der SVM ist die Bilderkennung, bei denen Eigenschaften der Bilder als Merkmale in die Klassifikation einfließen. Auch die Analyse von medizinischen Daten zur Krebsdiagnostik [Gyon et al. 2002] und die Handschrifterkennung [Schölkopf 1997, Bahlmann et al. 2002] zählen mittlerweile zu den klassischen Anwendungsgebieten der SVM. Weiter kommt heute vermehrt die SVM Methodik in der Biomechanik zur Genklassifikation [Furey et al. 2000] und in der Textklassifikation [Joachims 2002] zum Einsatz.

SVM bietet neben der linearen Trennung auch die Möglichkeit durch den Einsatz so genannter Kernfunktionen nichtlineare Strukturen in Datensätzen zu entdecken. Sie bieten die Grundlage für kernbasierte Lernalgorithmen [Monien 2005]. Ziel ist die Trennung vorgegebener Klassen mittels einer in der Regel nicht linearen (Hyper-) Ebene. Der Einsatz von Kernfunktionen ermöglicht eine flexible Anpassung an den Anwendungsfall. Hierbei wird die Trennung sowohl durch Bi- als auch Multiklassifikation ermöglicht [Hsu/Lin 2002].

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über die der SVM zugrunde liegenden Methodik. Es werden zunächst die Basisansätze erläutert und anschließend auf die Multiklassifikation eingegangen. Weiter werden die grundlegenden mathematischen Schritte zur Bestimmung der Entscheidungsfunktion zur Klassifizierung beschrieben. Abschließend werden kurz aktuelle Einsatzgebiete, Anwendungsbeispiele sowie die wichtigsten Softwarelösungen vorgestellt.

4.1 Methodische Grundlagen

Ziel der SVM-Methodik ist es, in vorgegebenen Datensätzen Strukturen und Abhängigkeiten zu analysieren. Hierbei werden nicht nur die vorgegebenen Daten beschrieben, sondern durch die gute Generalisierung der Methode eine Prognosemöglichkeit für neue Beobachtungen geschaffen. Dies wird über Trennfunktionen realisiert, welche den Zusammenhang zwischen den beschreibenden Merkmalen und der jeweiligen Klassenzugehörigkeit herstellen.

4.1.1 Einführung in die Klassifizierungsverfahren

Da eine streng hierarchische Einteilung von Klassifikationsverfahren kaum möglich ist, lassen sie sich am besten anhand verschiedener Eigenschaften einteilen:

- Automatische Verfahren
- Numerische und nicht-numerische Verfahren
- Statistische und verteilungsfreie Verfahren
- Überwachte und nicht-überwachte Verfahren
- Fest dimensionierte und lernende Verfahren
- Parametrische und nicht-parametrische Verfahren.

4.1.1.1 Automatische Verfahren

Bei automatischen Verfahren findet die Klassifizierung mittels eines automatischen Prozesses durch eine Software statt. Der Prozess der maschinellen Klassifikation kann als formale Methode des Entscheidens in neuen Situationen aufgrund erlernter Strukturen bezeichnet werden. Die maschinelle Klassifikation ist ein Teilgebiet des Maschinellen Lernens. Genauer ist dies die Erzeugung eines Algorithmus (der lernende Algorithmus), der, angewandt auf bekannte und schon klassifizierte Fälle (die Datenbasis), Strukturen berechnet. Unter einem Algorithmus versteht man die genau definierte Handlungsvorschrift zur Lösung eines Problems oder einer bestimmten Art von Problemen. In Form von Computerprogrammen und elektronischen Schaltkreisen steuern sie Computer und andere Maschinen. Diese neu erlernten Strukturen ermöglichen es einem weiteren Algorithmus (der auswertende Algorithmus), einen neuen und bisher unbekanntem Fall aufgrund der beobachteten Attribute und deren Ausprägungen einer der bekannten Ziel-Klassen zuzuordnen [Duda et al. 2000].

4.1.1.2 Numerische und nicht-numerische Verfahren

Die numerischen Verfahren sind klassische Klassifikationsverfahren und werden besonders bei der Mustererkennung angewandt. Sie gehören zu den überwachten Klassifikationsverfahren und bedienen sich geometrischer Abstandsmaße und der Statistik. Es werden die Varianten Schwellwertklassifikation und Abstandsklassifikation unterschieden. Bei der Schwellwertklassifikation gilt es zu ermitteln, ob ein Merkmalswert unter- oder oberhalb einem Schwellwert liegt. Bei der Abstandsklassifikation dagegen gilt es den Abstand (bzw. die geometrische Abweichung) des Merkmalswertes zu einem für jede Klasse vorliegenden Muster zu ermitteln.

Nicht-numerische Verfahren, welche genauso der Gruppe von überwachten Klassifikationsverfahren angehören sind z.B. syntaktische Klassifikationsverfahren, die bei der Spracherkennung zur Anwendung kommen, sowie modelbasierte Klassifikationsverfahren.

4.1.1.3 Statistische und verteilungsfreie Verfahren

Statistische Verfahren basieren auf Dichteberechnungen und Wahrscheinlichkeiten, während sich bei verteilungsfreien Verfahren klare Trennflächen angeben lassen. Ein sehr erfolgreiches statistisches Klassifikationsverfahren ist die Lineare Diskriminanzanalyse (LDA). Bei diesem Verfahren werden Objekte betrachtet, die jeweils genau einer von mehreren gleichartigen Klassen angehören. Es ist bekannt, welcher Klasse jedes einzelne Objekt angehört. An jedem Objekt werden Ausprägungen von Merkmalen beobachtet. Aus diesen Informationen sollen lineare Grenzen zwischen den Klassen gefunden werden, um später Objekte, deren Klassenzugehörigkeit unbekannt ist, einer der Klassen zuordnen zu können.

4.1.1.4 Überwachte und nicht überwachte Verfahren

Das Erzeugen von Strukturen aus vorhandenen Daten wird auch als Mustererkennung, Diskriminierung oder überwachtes Lernen bezeichnet. Dabei werden Klasseneinteilungen vorgegeben (dies kann auch durch Stichproben geschehen). Im Gegensatz dazu existiert nicht-überwachtes Lernen, bei dem die Klassen der Daten nicht vorgegeben sind, sondern auch diese erlernt werden müssen. Dabei können allerdings Informationen hinzugezogen werden, inwiefern eine Klasseneinteilung richtig oder falsch war. Ein Beispiel für nicht überwachte Verfahren ist die Clusteranalyse.

4.1.1.5 Fest dimensionierte und lernende Verfahren

Klassifikationsverfahren, die mit einer bestimmten Datenmenge zur Speicherung versorgt werden, um anhand dieser Daten neue Erfassungsdaten korrekt klassifizieren zu können, wer-

den als fest dimensionierte und lernende Klassifikationsverfahren bezeichnet. Ein Beispiel für ein derartiges Verfahren ist die Klassifikation mittels der Support Vector Machine, welches zu einem späteren Zeitpunkt in diesem Kapitel detailliert behandelt wird.

4.1.1.6 Parametrische und nicht-parametrische Verfahren

Parametrische Verfahren beruhen auf parametrischen Wahrscheinlichkeitsdichten, während bei nicht-parametrischen Verfahren (z.B. Nächster-Nachbar-Klassifikator) die Dichten meist aus einer Stichprobe geschätzt werden. Beispiele hierfür sind die folgenden Verfahren:

- Quader-Klassifikator
- Abstandsklassifikator
- Bayes-Klassifikator
- Nächste-Nachbar-Klassifikation
- Fuzzy-Klassifikator
- Polynomklassifikator
- Clusterverfahren
- Künstliches neuronales Netz
- **Support Vector Machines.**

Sind die Grenzen zwischen den einzelnen Klassen im Merkmalsraum bekannt, lassen sich diese durch eine Diskriminanzfunktion angeben [Webb 2002].

4.1.2 Die Lernmethodologie

Die Konstruktion von Maschinen, die fähig sind, aus Erfahrungswerten zu lernen, ist seit der Einführung von Rechnern von großer Bedeutung. Vor allem die Nutzbarkeit von betriebssicheren, lernenden Systemen ist aus strategischer Sicht sehr interessant, da viele Aufgabenstellungen mit klassischen Programmier Techniken kaum zu bewältigen sind. Das Entdecken von Genen in DNA-Sequenzen oder die Filterung von Emails gehören zum Beispiel zu den oben genannten Aufgabenfeldern, die eine hohe Komplexität aufweisen. Maschinelle, lernende Algorithmen könnten diese Probleme überwinden [Christianini/Taylor 2006].

4.1.2.1 Überwachtes Lernen

Die bereits erwähnten Probleme können nicht durch einen klassischen Programmieransatz gelöst werden, da der Systemgestalter die Methode nicht genau bestimmen kann, mit welcher richtige Ausgangsgrößen anhand von Eingangsgrößen ermittelt werden können. Die Eingangs- und Ausgangsgrößenfunktionalität anhand von Beispielen zu erlernen, wäre eine mög-

liche Lösungsstrategie. Diese wird als *Learning Methodology* (Lernmethodologie) bezeichnet [Mitchell 1997]. Handelt es sich bei den Lerndaten um Eingangs-/Ausgangsgrößenpaare, so wird diese Prozedur *Supervised Learning* (überwachtes Lernen) genannt. Die Lernbeispiele werden als *Training Data* (Trainingsdaten) bezeichnet. Falls eine grundlegende Funktion von Eingangsgrößen zu Ausgangsgrößen (*Inputs* und *Outputs*) existiert, so fungiert diese als *Target Function* (Zielfunktion), welche gleichzeitig die Lösung des Lernproblems darstellt. Im Falle der Klassifikation wird sie als *Decision Function* (Entscheidungsfunktion) bezeichnet. Die Lösung wird aus einer Menge von so genannten *Candidate Functions*, welche den Eingaberaum und den Ausgabebereich abbilden, ausgewählt. Eine bestimmte Menge oder Klasse von *Candidate Functions* wird als *Hypotheses* bezeichnet. Die Auswahl der Menge von *Hypotheses* (oder *Hypothesis Space*) ist folglich eine der wichtigsten Bestandteile der Lernstrategie. Ein weiterer wichtiger Bestandteil dieser Strategie ist der Algorithmus, welcher die Trainingsdaten als Eingabe festschreibt und eine *Hypothesis* aus der *Hypothesis Space* auswählt [Solomonoff 1964]. Dieser Algorithmus wird *Learning Algorithm* genannt. Hinsichtlich der Klassifikation ist zu nennen, dass es grundsätzlich zwei verschiedene Arten von Klassifikation gibt. Auf der einen Seite die binäre Klassifikation, die z.B. ja/nein bzw. wahr/falsch als Ergebnis liefert, auf der anderen Seite die *Multi-Class Classification* (Mehr-Klassen Klassifikation), welche eine größere Anzahl von Kategorien besitzt [Christianini/Taylor 2006].

4.1.2.2 Lernen und Generalisieren

Während der Lern- bzw. Trainingsphase des lernenden Algorithmus kann eine Anzahl von Fehlern entstehen. Das Ziel ist es, eine *Hypothesis* zu erhalten, welche die richtige Klassifikation der Trainingsdaten liefert. Wenn dies der Fall ist, gilt die *Hypothesis* als konsistent (folgerichtig). Hinsichtlich der Entwicklung einer folgerichtigen *Hypothesis* gibt es zwei Schwierigkeiten. Zum einen kann die Funktion, welche erlernt werden soll, zu komplex dargestellt und daher nicht überprüfbar sein. Zum anderen sind die Trainingsdaten zu inkonsistent, so dass es keine grundlegende Funktion gibt, welche die Trainingsdaten richtig abbildet. Auch das reine Finden einer zu den Trainingsdaten passenden *Hypothesis* genügt nicht, da sie neue Daten zum größten Teil nicht korrekt klassifizieren könnte. Die Fähigkeit einer *Hypothesis*, Daten nach Eingabe der Trainingsmenge zu klassifizieren, wird *Generalisation Ability* (Generalisierungsfähigkeit) genannt. Diese gilt es zu optimieren [Christianini/Taylor 2006].

4.1.2.3 Optimierung der Generalisierungsfähigkeit

Viele klassische Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens sind in der Lage Funktionen jeglicher Art darzustellen und liefern bei komplizierten Trainingsmengen *Hypothesen*, welche sich wie *Rote Learner* (*Rote Learning* bedeutet Auswendiglernen) verhalten. Mit *Rote Learner* sind *Hypothesen* gemeint, welche die Daten innerhalb der Trainingsmenge korrekt klassifizieren, jedoch bei vorher nicht gesehenen Daten hauptsächlich zusammenhanglose Prognosen liefern. *Hypothesen*, die zwecks der Konsistenz zu komplex werden, heißen *Overfit* (übermäßige Anpassung). Eine Möglichkeit, dieses Problem zu überwinden, wäre die Einschränkung der Größe der *Hypothesen*. Der Lösungsansatz besteht darin, die Abstimmung, unter Bezug auf statistische Schranken bei Generalisierungsfehlern, zu fördern. Diese Schranken hängen üblicherweise von bestimmten Größen, wie z.B. der Bandbreite des Klassifizierers, ab. Deshalb ist es notwendig, Algorithmen so zu erweitern, dass sie in der Lage sind, bestimmte Größenwerte zu optimieren. Die *Support Vector Machine*, die in dieser Arbeit als Klassifizierungsmethode zum Einsatz kommt, besitzt einen Algorithmus, der hinsichtlich der Generalisierungsfähigkeit optimiert ist und sich deshalb von den meisten bisher bekannten Klassifikationsverfahren sehr positiv abhebt [Christianini/Taylor 2006].

Die folgende Liste gibt eine Übersicht bezüglich der Klassifikationsverfahren, welche sich in den letzten Jahren in der Anwendung bewährt haben [in Anlehnung an Jain et al. 2000]:

- Template matching (Vorlagenabgleich)
- Nearest Mean Classifier (Nächste-Mitte-Klassifizierer)
- Subspace Method (Unterraum-Methode)
- 1-Nearest Neighbour Rule (1-Nächster-Nachbar-Regel)
- k-Nearest Neighbour Rule
- Bayes plug-in (Einschub nach Bayes)
- Logistic Classifier (Logistischer Klassifizierer)
- Parzen Klassifizierer
- Fisher Linear Discriminant
- Binary Decision Tree (Binärer Entscheidungsbaum)
- Perzeptron
- Multi-layer Perceptron (Neuronales Netz)
- Radial Basis Network (Radiales Basisnetz)
- **Support Vector Machine.**

Es gibt zahlreiche unterschiedliche Methoden zur Klassifikation. Bei der Wahl ist vor allem zu berücksichtigen, dass jedes Verfahren seinen eigentlichen Einsatzbereich hat, in dem es Vorteile auf Grund seiner Methodik bietet. Es gibt wenige Verfahren, die eine umfangreiche Einsatzmöglichkeit bieten. Im Hinblick auf den Einsatz von Support Vector Machines ist hervorzuheben, dass sie sich in kurzer Zeit als ein sehr flexibles Verfahren etabliert hat.

4.2 Mathematische Grundlagen der SVM

4.2.1 Einführung in die SVM

Die Support Vector Machine (SVM) ist eine überwachte Lernmethode, die aus einer vorgegebenen Menge an markierten Trainingsdaten eine Funktion erzeugt, welche Zusammenhänge der Ein- und Ausgangsdaten darstellt. Diese Funktion wird als *Mapping Function* bezeichnet. Eine *Mapping Function* kann entweder eine Klassifizierungsfunktion, eine Kategorie der Eingangsdaten oder eine Regressionsfunktion darstellen. Der Begriff der Regression steht an dieser Stelle für eine Punktprognose. Für die Klassifikation werden oft nichtlineare Kernelfunktionen verwendet, welche die Eingangsdaten in einen hochdimensionalen Merkmalsraum transformieren. Kernel sind spezielle Anwendungen von mathematischen Kernen im Bereich des maschinellen Lernens. Im Vergleich zum Eingangsraum werden in diesem hochdimensionalen Merkmalsraum die Eingangsdaten differenzierbar dargestellt. Es werden anschließend *Maximum-Margin-Hyperebenen* erzeugt (*Margin* steht für den kleinsten Abstand der Punkte zur Hyperebene). Das so erzeugte Modell hängt nur von einer Teilmenge der Trainingsdaten ab. Diese Teilmenge befindet sich in der Nähe der Klassenschranken [Wang 2005]. Die Lernstrategie der SVM basiert auf der statistischen Lerntheorie, die in den letzten drei Jahrzehnten von Vapnik, Chervonenkis und anderen entwickelt wurde. SVMs haben zusätzlich zu ihrer soliden mathematischen Grundlage in der statistischen Lerntheorie gute Leistungen in zahlreichen realen Anwendungen wie z.B. in der Bioinformatik, im *Textmining* (bezeichnet die automatisierte Entdeckung neuer, richtiger und relevanter Informationen aus Textdaten), in der Mustererkennung sowie der Bildverarbeitung erbracht. Diese Leistungen haben dazu geführt, dass die SVM zusammen mit anderen *Soft Computing* Techniken, wie z.B. dem Neuronalen Netz und den Fuzzy-Systemen, zu den modernsten Tools im Bereich des maschinellen Lernens und im *Data Mining* gehören [Wang 2005]. Mit Hilfe des SVM-Lernverfahrens können lineare und nichtlineare Probleme gelöst werden. Das Verfahren kann effektiv insbesondere bei zahlreichen Objektattributen eingesetzt werden, bei denen der Ein-

satz anderer Lernverfahren, z.B. künstliche neuronale Netze, eher problematisch ist. Ein weiterer Nachteil neuronaler Netze, die Gefahr des Überlernens von gegebenen Daten, ist bei der Support Vektor Methode nicht in dem Maße gegeben. Das Überlernen wird auch als Auswendiglernen, Überanpassung, *Overlearning* oder *Overfitting* bezeichnet. Überanpassung hemmt die gewünschte Generalisierungsleistung, d.h. die Übertragbarkeit auf neue, nicht gelernte Daten. Bei einer SVM kann die Kapazität der Lernalgorithmen und damit das Potential einer Überanpassung kontrolliert werden. Ferner sind SVM-Ergebnisse wegen des zugrunde liegenden exakten mathematischen Kalküls leicht reproduzierbar. Sie unterliegen keinen Zufallsschwankungen innerhalb des Verfahrens, da das Lernen einer SVM durch das Minimieren des erwarteten Fehlprognose- bzw. Fehlklassifikationsrisikos erfolgt.

Die folgende Abbildung zeigt die prinzipielle Funktionsweise einer *Learning Machine* mit

$$w = w(x, y). \quad (4-1)$$

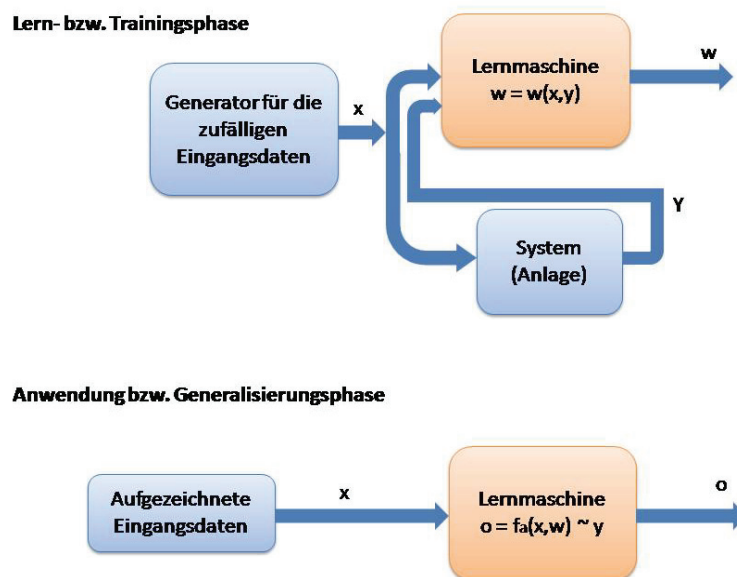


Abb. 4- 1 Modell einer lernenden Maschine [in Anlehnung an Wang 2005]

Dies geschieht durch die Analyse der Input-Daten x_i innerhalb des Systems und die Überwachung der Output-Daten y_i , die das System liefert. Auf diese Art generiert sie die Abbildungsfunktion

$$y = f(x, w). \quad (4-2)$$

Die *Learning Machine* versucht eine Näherungsfunktion zu finden, welche eine gute Generalisierungsfähigkeit besitzt. Nach der Trainingsphase kann davon ausgegangen werden, dass die Output-Daten

$$o = f_a(x, w) \sim y \quad (4-3)$$

gute Näherungswerte für die realen Werte y des Systems darstellen.

4.2.2 Lineare Lernalgorithmen

Beim überwachten Lernen wird dem Lernalgorithmus eine vordefinierte Menge an Trainingsbeispielen bzw. Inputs mit dazugehörigen Kennzeichnungen bzw. Output-Werten zugeführt. Üblicherweise haben die Trainingsbeispiele die Form von Eigenschaftsvektoren, so dass der Input-Raum eine Teilmenge von \mathfrak{R}^n darstellt. Sobald die Eigenschaftsvektoren vorhanden sind, kann eine Gruppe von Hypothesen zur Problemlösung herangezogen werden. Lineare Funktionen sind leicht verständlich und einfach anwendbar. Die Literaturwissenschaft der traditionellen Statistik und der klassischen Neuronalen Netze hat viele Methoden entwickelt, mit denen unter Verwendung von linearen Funktionen zwischen zwei Klassen anhand von Beispielen unterschieden werden kann. Weitere Beispiele sind Methoden zur Interpolation anhand linearer Funktionen.

4.2.3 Lineare Klassifikation

Bei der Berechnung der Trennfunktion soll zunächst angenommen werden, dass die Daten linear und ohne Fehler trennbar sind. Das Ziel ist, eine Ebene zu bestimmen, die eine optimale Trennung mit möglichst wenigen fehlklassifizierten Vektoren ermöglicht. Diese Ebene wird nun so bestimmt, dass folgende Ziele erreicht werden:

1. Maximierung des Abstands zwischen den Klassen
2. Minimierung der Fehler in den Trainingsdaten.

Zunächst werden zwei Hilfsebenen eingeführt, die den gleichen, maximalen Abstand zur Trennebene aufweisen und so positioniert werden, dass die jeweils nächsten Punkte der beiden Klassen auf diesen Hilfsebenen liegen. Nur diese Vektoren haben einen Einfluss auf die Lage der Ebene, d.h. sie sind die einzigen Vektoren, die in die Berechnung der Ebene mit einfließen. Die Anzahl der Support Vektoren gibt also die Anzahl Beobachtungen, Kennzahlen usw. an, die bei fest vorgegebener Parameterkonstellation nötig ist, um die Eingabedaten zu repräsentieren und die Trennebene zu bestimmen [Monien 2000].

Die binäre Klassifikation wird in der Regel durch Nutzung einer reellwertigen Funktion

$$f : X \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad (4-4)$$

ausgeführt. Der *Input* $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ wird für alle $f(x) \geq 0$ der positiven Klasse, anderenfalls der negativen Klasse zugordnet. $f(x)$ stellt hierbei eine lineare Funktion von $x \in X$ dar, für die gilt:

$$f(x) = \langle w \cdot x \rangle + b = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b \quad (4-5)$$

Hierbei stellen $(w, b) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}$ diejenigen Parameter dar, welche die Funktion beeinflussen können. Die Entscheidungsregel ist durch $\text{sgn}(f(x))$ definiert, wobei $\text{sgn}(0) = 1$ gilt. $\text{Sgn}(f(x))$ steht für die Signum- bzw. Vorzeichenfunktion, welche den Wert des Vorzeichens einer Zahl liefert. Zur Erfüllung der Lernmethodologie, müssen die Parameter w und b anhand der Daten erlernt werden. Die *Hypothesis* (wie in Abbildung 4-2), welche durch die Gleichung $\langle w \cdot x \rangle + b = 0$ definiert ist, splittet den Eingaberaum X in zwei Teile.

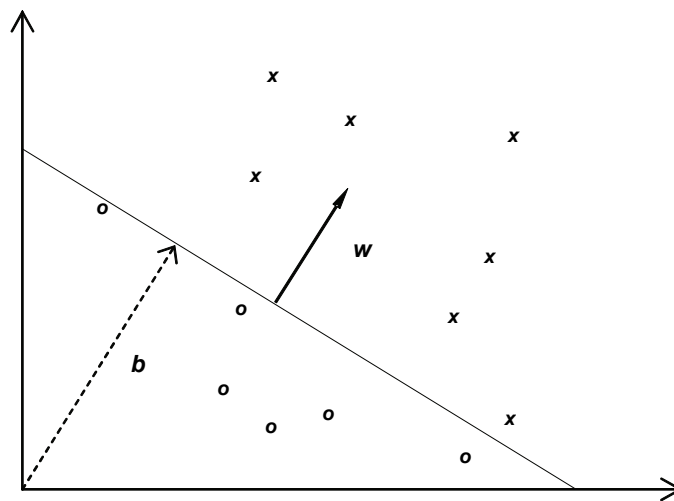


Abb. 4- 2 Eine trennende Hyperebene (w, b) für ein 2-dimensionales Trainingset [in Anlehnung an Christianini/Taylor 2006]

Eine Hyperebene ist ein affiner Unterraum mit der Dimension $n-1$. Diese Teile entsprechen den Input-Daten der zwei verschiedenen Klassen. Der Vektor w bestimmt die Richtung senkrecht zur Hyperebene, wohingegen das Variieren des Wertes von b eine Parallelverschiebung zur ursprünglichen Hyperebene bewirkt. In der Fachsprache werden w und b als *Weight Vector* (Gewichtungsvektor) und *Bias* (Ausrichtung) bezeichnet. [Christianini/Taylor 2006]

Um die Funktionsweise der Support Vector Machine verstehen zu können, ist die Kenntnis von einigen Fachbegriffen und Theoremen notwendig. Der Eingaberaum wird mit X , der

Ausgabebereich dagegen mit Y notiert. Gewöhnlich gilt $X \subseteq \mathfrak{R}^n$, wohingegen bei binärer Klassifikation $Y = \{-1, 1\}$, bei *Multiclass* Klassifikation $Y = \{1, 2, \dots, m\}$, bei der Regression $Y \subseteq \mathfrak{R}$ gilt. Die Regression steht hierbei für die Feststellung des Zusammenhangs zwischen x und y mit Hilfe einer Stichprobe. Ein *Training Set* ist eine Sammlung von Trainingsbeispielen, welche auch Trainingsdaten genannt werden. Das Trainingsset wird wie folgt notiert:

$$S = ((x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)) \subseteq (X \times Y) . \quad (4-6)$$

Hierbei steht n für die Anzahl der *Input* Daten. Diese werden durch x_i ausgedrückt, wogegen die y_i -Werte ihre *Labels* (Etiketten, Kennzeichnungen) sind. Stellt X ein Vektorraum dar, so muss beachtet werden, dass die Input-Vektoren, genau wie Gewichtungsvektoren, als Spaltenvektoren abgebildet sind.

4.2.3.1 Rosenblatt Perzeptron

Der erste iterative Algorithmus für lernende, lineare Klassifizierer ist das Verfahren des Perzeptrons, welches von Frank Rosenblatt im Jahre 1958 entwickelt wurde. Das Perzeptron ist ein vereinfachtes Neuronales Netz. Es besteht in der Grundversion aus einem einzelnen künstlichen Neuron mit anpassbaren Gewichtungen und einem Schwellenwert [Rosenblatt 1959]. Unter diesem Begriff werden verschiedene Kombinationen des ursprünglichen Modells verstanden. Hierbei wird zwischen einlagigen und mehrlagigen Perzeptronen (engl. *Multi-Layer Perceptron*, MLP) unterschieden. Die prinzipielle Arbeitsweise besteht darin, einen Eingabevektor in einen Ausgabevektor umzuwandeln und stellt damit einen Assoziativspeicher dar [Rosenblatt 1959]. Dieser Algorithmus aktualisiert direkt den Gewichtungsvektor und seine Ausrichtungen (engl. *Bias*). Die Funktionsweise des Perzeptron-Algorithmus besteht darin, dass falsch klassifizierte positive oder negative Trainingsbeispiele einem willkürlich gewählten Eingangsgewichtungsvektor beigelegt werden [Minsky/Papert 1999]. Unter der Annahme, dass der Eingangsgewichtungsvektor der Nullvektor ist, kann die endgültige *Hypothesis* als Linearkombination von Trainingspunkten beschrieben werden:

$$w = \sum_{i=1} \alpha_i y_i x_i \quad (4-7)$$

[Minsky/Papert 1999].

Der Koeffizient α_i von x_i ist durch das Klassifikationsergebnis y_i gegeben. α_i nehmen positive Werte an, wenn die Klassifikationen der Eingangsdaten x_i falsch war und eine Aktuali-

sierung der Gewichtung ausgelöst haben. Somit kann die Entscheidungsfunktion $h(x)$ wie folgt geschrieben werden:

$$\begin{aligned}
 h(x) &= \operatorname{sgn}(\langle w \cdot x \rangle + b) & (4-8) \\
 &= \operatorname{sgn}\left(\left\langle \sum_{i=1} \alpha_i y_i x_i \cdot x \right\rangle + b\right) \\
 &= \operatorname{sgn}\left(\left\langle \sum_{i=1} \alpha_i y_i \langle x_i \cdot x \rangle \right\rangle + b\right)
 \end{aligned}$$

[Christianini/Taylor 2006].

Dieses Verfahren stellt ein gutes Iterationsverfahren dar, vorausgesetzt es existiert eine Hyperebene, die die Trainingsdaten korrekt klassifiziert. In diesem Fall bezeichnet man die Daten als linear separierbar. Falls keine derartige Hyperebene existiert, spricht man von nicht separierbaren (engl. *nonseparable*) Daten. Die Anzahl der Näherungen hängt von einer Größe ab, die als *Margin* bezeichnet wird. Diese Größe hat hinsichtlich des Verstehens der Funktionsweise der *Support Vector Machine* eine zentrale Bedeutung.

Margin steht für den kleinsten Abstand der Punkte zur Hyperebene und ist wie folgt definiert (Definition des funktionalen *Margin* eines Beispiels (x_i, y_i) bezüglich einer Hyperebene (w, b)):

$$\gamma_i = y_i (\langle w \cdot x_i \rangle + b) \quad (4-9)$$

Hierbei stellt die Menge $\gamma_i > 0$ eine korrekte Klassifikation von (x_i, y_i) dar. Letztendlich ist der *Margin* eines Trainingssets S der maximale geometrische *Margin* aller Hyperebenen. Die Dimension des *Margins* eines linear trennbaren Trainingssets ist positiv.

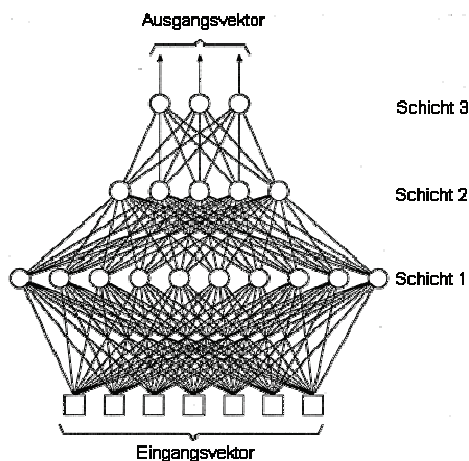


Abb. 4-3 Vereinfachte Darstellung eines mehrlagigen Perzeptrons

Die folgende Abbildung zeigt den geometrischen *Margin* an zwei Punkten bezüglich einer Hyperebene (Trennebene) im zweidimensionalen Raum. In Bild 4-5 dagegen wird der *Margin* eines Trainingssets abgebildet.

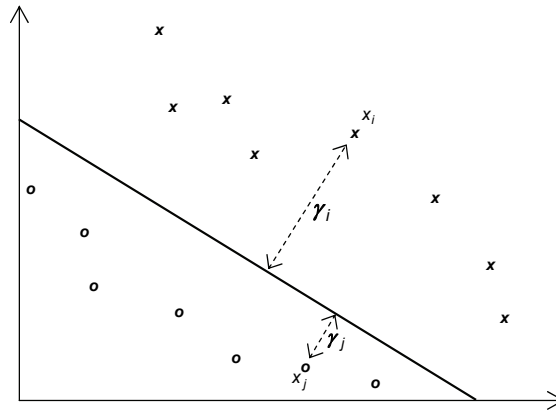


Abb. 4- 4 Der geometrische *Margin* von zwei Punkten [In Anlehnung an Christianini/Taylor 2006]

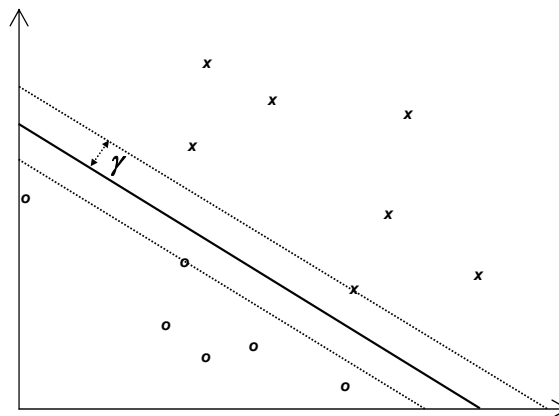


Abb. 4- 5 *Margin* eines Trainingssets [In Anlehnung an Christianini /Taylor 2006]

Nicht immer gelingt es mittels der Algorithmen neue Daten korrekt zu klassifizieren. Das Problem der falschen Klassifikation hat mehrere Ursachen, die erst durch eine zeitaufwendige Untersuchung des gesamten Klassifikationsprozesses und einer erneuten Trainingsphase mit neu angepassten Trainingsdaten behoben werden können. Auf der anderen Seite bieten lernende Maschinen den Vorteil, dass nach einer endgültigen Einarbeitung der Maschine die unbekannt Daten in kürzester Zeit richtig klassifiziert werden können.

Bei Klassifikationsproblemen mit Multi-Klassen lautet der Ausgabebereich $Y = \{1, 2, \dots, m\}$. Die Generalisierung von linearen *Learning Machines* bezüglich der Multi-Klassifikation funktio-

niert entsprechend: Jeder Klasse der m Klassen wird ein Gewichtungsvektor und ein *Bias* (Ausrichtung) zugeordnet $(w_i, b_i), i \in \{1, \dots, m\}$. Die Entscheidungsfunktion lautet somit

$$c(x) = \arg \max_{1 \leq i \leq m} (\langle w_i \cdot x \rangle + b_i). \quad (4-10)$$

Geometrisch gesehen bedeutet dies, dass jede Klasse mit einer trennenden Hyperebene versehen und jeder neue Punkt x der Klasse, dessen Hyperebene den größten Abstand zu ihm hat, zugeordnet wird. Der Eingaberaum wird in m einfach verbundene und konvexe Bereiche geteilt.

4.2.3.2 Lineare Regression

Die Standardaufgabe der linearen Regression, die auch als Methode der kleinsten Fehlerquadrate bekannt ist, besteht darin, ein lineares Modell an die Eingangsdaten anzupassen, also eine *bestmögliche trennende Gerade* durch eine Punktwolke zu legen [Chevan/Sutherland 1991]. Bezogen auf die Klassifizierung ist die Aufgabe der linearen Regression das Finden einer linearen Funktion

$$f(x) = \langle w \cdot x \rangle + b, \quad (4-11)$$

welche ein gegebenes Trainingsset S (gekennzeichnet durch $Y \subseteq \mathbb{R}$) am besten interpoliert. Geometrisch betrachtet entspricht dies einer Hyperebene, die gut an den gegebenen Punkten gelegen ist. Die folgende Abbildung zeigt eine ein-dimensionale Regressionsfunktion. Der Abstand, welcher in der Abbildung mit ξ gekennzeichnet ist, steht für den Fehler bezüglich dieses speziellen Trainingsbeispiels.

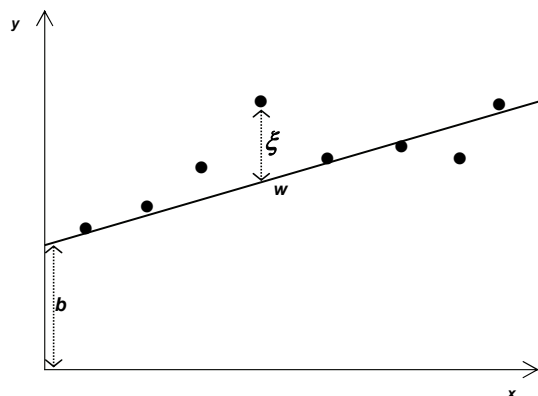


Abb. 4- 6 Ein-dimensionale Regressionsfunktion [in Anlehnung an Christianini/Taylor 2006]

Eine Lösung zur Findung einer passenden Regressionsfunktion wurde im 18. Jahrhundert von Gauss und Legendre entwickelt. Die Lösung besteht darin, die Linie auszuwählen, welche die

Summe der Abstandsquadrate der Trainingspunkte minimiert. Diese Methode wird auch als Methode der kleinsten Quadrate bezeichnet (*Least Squares*). Numerische Stabilität und Überlegungen bezüglich der Generalisierung haben die Entwicklung einer Variante dieser Methode bewirkt, welche mit der maximalen Margin-Hyperebene bei der Klassifikation übereinstimmt. Diese Methode ist bekannt als Ridge-Regression und wurde von Hoerl und Kennard entwickelt. Es wird eine Funktion ausgewählt, welche die Kombination aus den Quadratverlusten und des genormten Vektors \mathbf{w} minimiert [Hoerl/Kennard 1970].

4.2.3.3 Vapnik-Chervonenkis-Theorie

Wie bereits erwähnt bilden die Trainingsdaten mit den Vektoren $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n, i \in \{1, \dots, l\}$, deren Klassenzugehörigkeit mit $y_i \in \{-1, +1\}$ gegeben ist und die einer Verteilung $P(\mathbf{x}, y)$ genügen, die Basis für die Berechnung der Support Vector Machine. Zur Erstellung von Prognosen für neue Testdaten ist es notwendig, dass eine Funktion $f_\beta(\mathbf{x})$ gefunden wird. Diese Funktion hat die Aufgabe, das erwartete Risiko bezüglich der Missklassifikation zu minimieren [Monien 2005]. Die Definition für dieses Risiko lautet wie folgt [Schölkopf et al. 1999]:

$$R_{erw} = \int \frac{1}{2} |y - f_\beta(\mathbf{x})| dP(\mathbf{x}, y). \quad (4-12)$$

Der Parameter β steht dabei stellvertretend für die zu bestimmenden Parameter, welche die Trennfunktion festlegen und dadurch charakterisieren. Da generell die Verteilung $P(\mathbf{x}, y)$ der Eingabedaten nicht bekannt ist, kann das erwartete Risiko R_{erw} nicht ermittelt werden. Mit Hilfe des empirischen Risikos kann das erwartete Risiko angenähert werden, da darin die Anzahl der Fehlklassifikationen innerhalb der Trainingsdaten enthalten ist:

$$R_{emp} = \frac{1}{2l} \sum_{i=1}^l |y_i - f_\beta(\mathbf{x}_i)|, \quad (4-13)$$

wobei l die Anzahl der Trainingsvektoren ist. Die Minimierung des empirischen Risikos führt dazu, dass sich die Generalisierungsfähigkeit verschlechtert. Grund dafür ist die Optimierung der Anpassung der Trainingsdaten, was zu einer Überanpassung (*Overfitting*) führt. Durch die Einführung des strukturellen Risikos kann dem Problem der Überanpassung entgegengewirkt werden. Dieser Risikowert berücksichtigt auch die Komplexität der Trainingsdaten, welche bei der Minimierung des empirischen Risikos sehr hoch sein könnte [Monien 2005]. Zur Bestimmung des strukturellen Risikos, welches auf die Begrenzung des erwarteten Risikos nach oben abzielt, ist die Einführung der VC-Dimension (*Vapnik-Chervonenkis-*

Dimension) erforderlich. Nach [Schölkopf et al. 1999] bezeichnet die VC-Dimension einer Funktionenklasse die maximale Anzahl an Beobachtungen, die unabhängig von ihrer Klassenzugehörigkeit fehlerfrei getrennt werden können [Monien 2005]. Beispielsweise würde die VC-Dimension der Funktionenklasse der Geraden im \mathbb{R}^2 gerade drei betragen. Nach *Vapnik* gilt die folgende Abschätzung [Burgess 1998]:

$$R_{erw} \leq R_{emp} + \sqrt{\frac{h \left(\log \left(\frac{2l}{h} \right) + 1 \right) - \log \left(\frac{\zeta}{4} \right)}{l}}, \quad 0 \leq \zeta \leq 1. \quad (4-14)$$

Dabei bezeichnet h die VC-Dimension der jeweiligen Funktionenklasse. Der zweite Summand der rechten Seite wird auch die VC-Konfidenz genannt, welche eine monoton steigende Funktion der VC-Dimension ist. Das Ziel bei der Anwendung des Prinzips des strukturellen Risikos ist die Minimierung der rechten Seite der obigen Ungleichung [Müller et al. 2001], wodurch das erwartete Risiko minimiert wird [Monien 2005].

Die Auswahl einer geeigneten Trennfunktion soll demnach so erfolgen, dass sowohl R_{emp} , als auch die VC-Konfidenz minimal gehalten werden, wodurch schließlich R_{erw} minimiert wird [Monien 2005].

4.2.4 Lineare Support Vector Machines

4.2.4.1 Optimierungsproblem bei der Klassifikation

Wie zuvor beschrieben, ist das Ziel der Klassifikation mittels Support Vector Machines, eine Maximierung des *Margins*. Dies ist gleichbedeutend mit der Maximierung der Spanne zwischen den Klassen. Somit ergibt sich folgendes Optimierungsproblem:

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2. \quad (4-15)$$

Folgende Nebenbedingungen sollten dabei berücksichtigt werden:

$$y_i (\mathbf{w}x_i + \mathbf{b}) \geq 1, \quad \forall i \in \{1, \dots, l\}.$$

Das duale Optimierungsproblem, welches der Vereinfachung der Berechnung und der Schaffung von nicht linearer Trennung dient [Burgess 1998] sieht nach Einführung der Lagrange-Multiplikatoren und mehreren Umformungen wie folgt aus:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j \right\} \quad (4-16)$$

unter den Nebenbedingungen $\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0$, $\alpha_i \geq 0 \quad \forall i$ und den Karush-Kuhn-Tucker-Bedingungen (KKTB) $\alpha_i (y_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + \mathbf{b}) - 1) = 0$, welche für alle $i \in \{1, \dots, l\}$ einzuhalten sind. Gilt für i $\alpha_i > 0$, so heißt der dazugehörige Vektor \mathbf{x}_i Support Vektor und gehört zur Menge der Support Vektoren, welche für die Berechnung der Hyperebene betrachtet werden. Die Lage der Ebene wird nur durch die Support Vektoren beeinflusst. Die Anzahl der Support Vektoren gibt die Anzahl der Beobachtungen an, die nötig sind, um die Eingangsdaten darzustellen und die trennende Hyperebene festzulegen. Die Minimierung der Anzahl der Support Vektoren ist eines der Ziele der Anwendung von Support Vector Machines. Im Falle, dass die Support Vektoren genau auf den Hilfsebenen liegen, bezeichnet man diese als *Margin*-Vektoren.

4.2.4.2 Linear nicht trennbare Daten

Die lineare Trennbarkeit der Eingangsdaten war bisher die Voraussetzung für die Ermittlung der trennenden Hyperebene. Es kann demzufolge eine lineare Trennebene, welche die Daten fehlerfrei separiert, ermittelt werden. Unter Berücksichtigung von Separierungsfehlern sieht das vorher erwähnte Optimierungsproblem wie folgt aus:

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^l \xi_i, \quad (4-17)$$

dabei lauten die Nebenbedingungen $y_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + \mathbf{b}) \geq 1 - \xi_i$, $\forall i \in \{1, \dots, l\}$. Im Falle, dass $\xi_i \geq 1$ ist, liegt eine Fehlklassifikation vor. Bei $0 \leq \xi_i \leq 1$ dagegen befindet sich der Vektor der Eingangsdaten \mathbf{x}_i zwischen den Hilfsebenen. Die korrekte Klassifikation liegt vor, wenn $\xi_i = 0$ gilt, so dass \mathbf{x}_i auf der ihm zugewiesenen Seite der Hyperebene liegt. Das oben beschriebene Optimierungsproblem unterscheidet sich von den vorigen Optimierungsproblemen nur durch die zusätzliche Schranke C für die gesuchten Lagrange-Multiplikatoren α_i , mit den Nebenbedingungen $\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0$ und $0 \leq \alpha_i \leq C \quad \forall i$. Der Parameter C bewirkt die Beschränkung des Einflusses jedes einzelnen Punktes auf die Position der Ebene [Schölkopf/Smola 2002]. Mit wachsendem Wert für C rückt die Minimierung der Fehler in den Vordergrund der Optimierung.

Der Normalenvektor w kann nach der Berechnung der Lagrange-Multiplikatoren bestimmt werden. Die Ausrichtung bzw. der Bias b kann für einen beliebigen Vektor x_j , wobei $\alpha_j \geq 0$ erfüllt sein muss, mit der Gleichung

$$y_j(w x_j + b) - 1 = 0 \quad (\text{linear trennbar}), \quad (4-18)$$

oder mit

$$y_j(w x_j + b) - 1 + \xi_j = 0 \quad (\text{linear nichttrennbar}) \quad (4-19)$$

ermittelt werden [Burgess 1998].

Im linear trennbaren und im linear nichttrennbaren Fall erfolgt die Bestimmung der Entscheidungsfunktion $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \{-1, +1\}$ zur Klassifikation eines neuen Datenpunkts x wie folgt:

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{i \in SV} \alpha_i y_i x_i x + b \right). \quad (4-20)$$

Das Kürzel *SV* in der obigen Gleichung steht dabei für die Menge der Indizes der berechneten Support Vektoren. Dies bedeutet, dass die Entscheidung darüber, in welche Klasse ein neuer Datenvektor einzuordnen ist, nur von den Support Vektoren abhängt. Bei großen Datenmengen wird dadurch der Rechenaufwand bei der Klassifizierung von neuen Daten reduziert.

4.2.5 Kernfunktionen

Die Anwendungen in der realen Welt sind so komplex, dass ausdrucksstärkere Hypothesenräume benötigt werden. Lineare Funktionen sind hinsichtlich nichtidealer Anwendungen nicht mehr ausreichend. Kerndarstellungen bieten eine alternative Lösung bezüglich der begrenzten Anwendungsmöglichkeit von *Linear Learning Machines*. Durch die Einführung von so genannten Kernfunktionen werden die Daten in einen hochdimensionalen Merkmalsraum projiziert. Dies führt zu einer Steigerung der computertechnischen Leistung von linear lernenden SVM. Trainingsbeispiele tauchen niemals isoliert auf, sondern in Form von Skalarprodukten aus Datenpaaren. Der Vorteil der durch die Verwendung von SVM in dualer Darstellungsweise entsteht, ist die Tatsache, dass die Anzahl von bestimmbar Parameter nicht von der Anzahl der verwendeten Eigenschaften bzw. Attribute abhängt. Das Ersetzen des inneren Produkts durch eine entsprechend gewählte *Kernfunktion* führt zu einer impliziten, nichtlinearen Abbildung der Daten in einem hochdimensionalen Merkmalsraum, ohne die Anzahl der bestimmbar Parameter zu erhöhen. Kernfunktionen und ihre Anwendung sind der Grundbaustein für die Funktionsweise der Support Vector Machine. Ein weiterer Vorteil den Kernan-

wendungen mit sich bringen, ist die weitgehende Entkoppelung der lernenden Algorithmen und die Theorie von den Besonderheiten des Anwendungsgebietes, welche lediglich entsprechend der Struktur einer geeigneten Kernfunktion verschlüsselt werden müssen. Die Wahl einer passenden Kernfunktion für eine Support Vector Machine ist somit ein entscheidender Faktor für die Qualität einer SVM.

Die Schwierigkeit beim Erlernen der Zielfunktion liegt an ihrer Darstellung. Das Ziel ist es, eine Darstellung auszuwählen, die dem spezifischen Lernproblem entspricht. Daher beinhaltet die Vorverarbeitungsstrategie im Maschinellen Lernen das Ändern der Datendarstellung:

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n) \rightarrow \phi(\mathbf{x}) = (\phi_1(\mathbf{x}), \dots, \phi_N(\mathbf{x})).$$

Dieser Schritt ist gleichbedeutend mit dem Abbilden des Eingaberaums X in einen neuen Raum $F = \{\phi(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in X\}$.

Das folgende Beispiel zeigt eine Möglichkeit, die Datendarstellung einer Zielfunktion zu ändern: Hierbei wird die folgende Zielfunktion betrachtet

$$f(m_1, m_2, r) = C \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (4-21)$$

welche das Newtonsche Gravitationsgesetz wiedergibt. Eine lineare Maschine, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, könnte die Gleichung in dieser Schreibweise nicht verwenden und darstellen. Allerdings kann eine einfache Änderung der Koordinaten eine Darstellung liefern, die von einer linearen Maschine erlernt werden kann:

$$(m_1, m_2, r) \quad (x, y, z) = (\ln m_1, \ln m_2, \ln r),$$

aus welcher die Darstellung

$$g(x, y, z) = \ln f(m_1, m_2, r) = \ln C + \ln m_1 + \ln m_2 - 2 \ln r = c + x + y - 2z \text{ folgt.}$$

Größen, die für die Beschreibung der Daten eingeführt werden, werden üblicherweise *Features* (engl. Eigenschaften) genannt, wohingegen die ursprünglichen Daten als *Attributes* (engl. Merkmale) bezeichnet werden. Der Schritt, in dem eine passende Repräsentation der Daten und Funktionen gesucht wird, ist als *Feature Selection* (engl. Eigenschaftsauswahl) bekannt. Der Raum X steht für den Eingaberaum, während $F = \{\phi(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in X\}$ den *Feature Space* (engl. Eigenschaftsraum) darstellt.

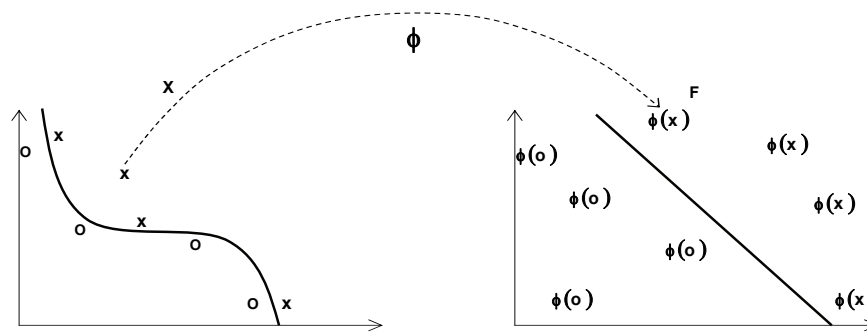


Abb. 4- 7 Vereinfachung des Klassifikationsprozesses durch eine Featureabbildung

Abbildung 4-7 zeigt beispielhaft das *Feature Mapping* (engl. Eigenschaftsabbildung) von einem zweidimensionalen Inputraum in einen zweidimensionalen Feature Raum. Im zweidimensionalen Inputraum können die Daten nicht linear separiert werden, wohingegen dies im Feature Raum möglich ist. Es gibt viele verschiedene Ansätze bezüglich der Auswahl von Eigenschaften. Ein Ansatz wäre z.B. die *Dimensionality Reduction* (engl. Dimensionsreduzierung). Sie dient zur Bestimmung des kleinsten Sets an Features, welches die in den ursprünglichen Merkmalen beinhaltete und notwendige Information überführt:

$$x = (x_1, \dots, x_n) \quad \phi(x) = (\phi_1(x), \dots, \phi_d(x)), d < n$$

Um nichtlineare Beziehungen mit einer linearen Lernmaschine bearbeiten zu können, muss ein Set an nichtlinearen Eigenschaften ausgewählt und in die neue Darstellung umgeschrieben werden. Diese Schritte entsprechen der Verwendung einer festen, nichtlinearen Abbildung der Daten im Feature Raum. Das Set von *Hypotheses* beinhaltet somit Funktionen folgender Form:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N w_i \phi_i(x) + b, \quad (4-22)$$

wobei $\phi: X \rightarrow F$ eine nichtlineare Abbildung der Daten des Inputraums in einen Feature-Raum darstellt.

Eine wichtige Eigenschaft linearer Lernmaschinen ist die Möglichkeit, diese dual darstellen zu können. Dies bedeutet, dass die *Hypothesis* als eine Linearkombination der Trainingspunkte dargestellt werden kann. Dadurch kann die Entscheidungsregel mit Hilfe der Skalarprodukte aus Testpunkten und Trainingspunkten wie folgt festgesetzt werden:

$$f(x) = \sum_{i=1} \alpha_i y_i \langle \phi(x_i) \cdot \phi(x) \rangle + b. \quad (4-23)$$

Die Methode zur direkten Berechnung des Skalarprodukts aus $\phi(x_i) \cdot \phi(x)$ im Featureraum als Funktion der originalen Eingabepunkte wird *Kernfunktion* genannt. Als Kernel wird eine Funktion K bezeichnet, für die für alle $x, z \in X$ gilt:

$$K(x, z) = \langle \phi(x) \cdot \phi(z) \rangle. \quad (4-24)$$

Hierbei steht ϕ für die Abbildung von X in einem Featureraum F .

Die Verwendung von Kernen ermöglicht es, die Daten implizit in einen Featureraum zu überführen. Von den Trainingsbeispielen wird nur die Gewichtsmatrix (*Gram Matrix, bzw. Kernel Matrix*) als weiterführende Information im Featureraum verwendet. Ist eine Kernfunktion K gefunden, kann die Entscheidungsregel anhand von Auswertungen der Kernel festgesetzt werden:

$$f(x) = \sum_{i=1} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b. \quad (4-25)$$

Ein wesentlicher Vorteil bei der Verwendung von Kernen stellt die Tatsache dar, dass das grundlegende Featureabbild, im Hinblick auf das Lernen der SVM, im Featureraum nicht bekannt sein muss.

Im Folgenden wird der Schwerpunkt auf der Konstruktion von solchen Kernfunktionen liegen. Die Kernelfunktion generalisiert das maßgebende Skalarprodukt im Inputraum:

$$K(x, z) = \langle x \cdot z \rangle. \quad (4-26)$$

Ziel ist es, in das Featureraumabbild eine Nichtlinearität einzuführen. Zu einem nichtlinearen Abbild gelangt man, indem man das Skalarprodukt aus den Featurevektoren bildet:

$$\phi(x) = \left(x_i x_j \right)_{(i,j)=(1,1)}^{(n,n)}. \quad (4-27)$$

Der Ansatz zur Erstellung der Kernelfunktion liegt darin, die Kernfunktion direkt zu definieren. Folglich würde auch der Merkmalsraum implizit definiert werden. Eine Kernfunktion für den Inputraum zu definieren ist hierbei in der Regel zielführender als einen komplizierten Merkmalsraum zu schaffen. Folgende Eigenschaften einer Kernfunktion $K(x, z)$, müssen erfüllt sein, damit eine Abbildung des Merkmalsraums gewährleistet ist. Die Funktion muss symmetrisch sein:

$$K(x, z) = \langle \phi(x) \cdot \phi(z) \rangle = \langle \phi(z) \cdot \phi(x) \rangle = K(z, x). \quad (4-28)$$

Weiter muss sie die Ungleichungen nach Cauchy-Schwarz erfüllen:

$$\begin{aligned} K(x, z)^2 &= \langle \phi(x) \cdot \phi(z) \rangle^2 \leq \|\phi(x)\|^2 \cdot \|\phi(z)\|^2 \\ &= \langle \phi(x) \cdot \phi(x) \rangle \langle \phi(z) \cdot \phi(z) \rangle = K(x, x)K(z, z). \end{aligned} \quad (4-29)$$

4.2.5.1 Theorem von Mercer

Nach Mercer gibt es Charakteristika, welche bestimmen, ob eine Funktion eine Kernelfunktion $K(x, z)$ darstellt. Einführend wird dazu ein endlicher Inputraum $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ betrachtet und angenommen, dass $K(x, z)$ eine symmetrische Funktion in X ist. Man beachte außerdem die Matrix

$$\mathbf{K} = \left(K(x_i, x_j) \right)_{i,j=1}^n. \quad (4-30)$$

Da \mathbf{K} symmetrisch ist, existiert eine orthogonale Matrix \mathbf{V} , so dass $\mathbf{K} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}'$ gilt. Dabei ist $\mathbf{\Lambda}$ eine Diagonalmatrix, welche die Eigenwerte λ_t der Matrix \mathbf{K} mit den entsprechenden Eigenvektoren $\mathbf{v}_t = (v_{ti})_{i=1}^n$ aus den Spalten von \mathbf{V} beinhaltet. Weiter wird angenommen, dass die Eigenwerte positiv sind. Mit dem Merkmalsabbild

$$\phi: x_i \quad \left(\sqrt{\lambda_t} v_{ti} \right)_{t=1}^n \in \mathfrak{R}^n, i = 1, \dots, n. \quad (4-31)$$

erhält man

$$\langle \phi(x_i) \cdot \phi(x_j) \rangle = \sum_{t=1}^n \lambda_t v_{ti} v_{tj} = (\mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}')_{ij} = \mathbf{K}_{ij} = K(x_i, x_j). \quad (4-32)$$

Die Erstellung von Kernfunktionen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Hierbei kommt es darauf an, in welchem Kontext Kernfunktionen benötigt werden und welche Grundvoraussetzungen vorliegen. So können zum Beispiel aus gegebenen Funktionen komplexere Kernfunktionen abgeleitet und damit bessere Ergebnisse in der Klassifikation erreicht werden.

Durch Addition oder skalare Multiplikation können weitere Kerne entwickelt werden. Erlaubt sind alle Verknüpfungen, welche die positiv-Definitheit der Kerne erhält. Eine weitere Möglichkeit, Kernfunktionen zu erstellen, wäre die Erarbeitung von Kernen aus den Features, genauer genommen von ihrem Skalarprodukt.

4.2.5.2 Kernfunktionen und nicht lineare Separierung

Mittels Kernfunktionen können, wie bereits angesprochen, in einem höherdimensionalen Raum Skalarprodukte implizit berechnet werden. Sie dienen also zur Bestimmung nicht linearer Trennfunktionen. Bezüglich der Existenz eines Skalarprodukts ist folgende Bedingung von Mercer zu beachten [Burgess 1998]:

Es existiert eine Abbildung ϕ und eine Erweiterung (Kernfunktion)

$$\mathcal{K}(x_i, x_j) = \sum_k \phi(x_i)_k \phi(x_j)_k \quad (4-33)$$

genau dann, wenn für jede integrierbare Funktion $g(x)$, für die $\int g(x)^2 dx$ endlich ist, gilt:

$$\int \mathcal{K}(x_i, x_j) g(x_i) g(x_j) dx_i dx_j \geq 0. \quad (4-34)$$

Diese Bedingung gewährleistet unter den gegebenen Voraussetzungen die Existenz eines Skalarprodukts in einem höherdimensionalen Raum. Somit sieht das mehrmals bearbeitete Optimierungsproblem unter Berücksichtigung der Einführung von Kernfunktionen, d.h. des Ersatzes des Skalarprodukts durch eine Kernfunktion, wie folgt aus:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^l \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \alpha_i \alpha_j y_i y_j \mathcal{K}(x_i, x_j) \right\}, \quad (4-35)$$

mit den Nebenbedingungen $\sum_{i=1}^l \alpha_i y_i = 0$ und $0 \leq \alpha_i \leq C \quad \forall i$.

Durch den Einsatz von Kernfunktionen können die Berechnungen im Merkmalsraum, dessen Dimension rapide wachsen kann, ersetzt werden. Die Entscheidungsfunktion f zur Klassifizierung eines Datenvektors hat nun folgende Gestalt:

$$f(x) = \text{sign} \left(\sum_{x_i \in SV} \alpha_i y_i \mathcal{K}(x_i, x) + b \right). \quad (4-36)$$

Für homogene Polynome vom Grad d ($\mathcal{K}(x, y) = (xy)^d$) und für einen n -dimensionalen Inputraum, wobei n für die Anzahl der Merkmale zur Beschreibung der Beobachtungen steht, ist der zugehörige Raum, in dem die Daten linear getrennt werden sollen, von folgender Dimension [Burgess 1998]: $\binom{n+d-1}{d}$. (4-37)

Die Dimension des Merkmalsraums wächst mit steigender Anzahl der Merkmale in ihrer Ordnung $\mathcal{O}(n^d)$. Dies kann eventuell dazu führen, dass die Dimension nur schwer oder nicht mehr bearbeitet werden kann. In der folgenden Tabelle sind verschiedene Kerne, welche von renommierten Wissenschaftlern entwickelt wurden und heutzutage zum Einsatz kommen, aufgelistet. Abgesehen von ein paar Ausnahmen werden einige Kerne in empirischen Analysen nur selten verwendet. Der Grund für den seltenen Einsatz liegt darin, dass für bestimmte Anwendungen spezielle Kerne entwickelt werden. In der Anwendung von Support Vector Machines kommen normalerweise nur wenige Arten von Kernen zum Einsatz [Burgess 1998].

Zu den gebräuchlichen Kernfunktionen in der Tabelle 4-1 gehören die Kerne mit der Nummerierung: Nr. 2, Nr. 3, Nr. 6 und Nr. 10.

Nr.	Kernfunktion	Bemerkung	Quelle
1	$K(x_i, x_j) = x_i x_j$		[Schölkopf/ Smola 2002]
2	$K(x_i, x_j) = (x_i x_j)^d$	$d \in \mathbb{N}$	
3	$K(x_i, x_j) = (x_i x_j + 1)^d$	$d \in \mathbb{N}$	[Vapnik 1995]
4	$K(x_i, x_j) = \left(\frac{x_i x_j}{a} + \tilde{b} \right)^d$	$a \neq 0, \tilde{b}, d \in \mathbb{N}$	
5	$K(x_i, x_j) = \frac{1 - (x_i x_j)^d}{1 + (x_i x_j)^d}$	$-1 < x_i x_j < 1, d \in \mathbb{N}$	[Saunders et al. 1998]
6	$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \ x_i - x_j\ ^2)$	$\gamma \in \mathbb{R}^+$	[Vapnik 1995]
7	$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\ x_i - x_j\ ^2}{\sigma^2}\right)$	$\sigma \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$	[Schölkopf/ Smola 2002]
8	$K(x_i, x_j) = a \left(\exp\left(\frac{\gamma}{\ x_i - x_j\ ^2 + \sigma^2}\right) - 1 \right)$	$\sigma, \gamma \in \mathbb{R} \setminus \{0\}, a \in \mathbb{R}$ konstant	[Ayat et al. 2002]
9	$K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma D(x_i, x_j))$	$\gamma \in \mathbb{R}, D(\cdot, \cdot)$ Distanzmaß	[Bahlmann et al. 2002]
10	$K(x_i, x_j) = \tanh(rx_i x_j - s)$	$r, s \in \mathbb{R}$	[Schölkopf/ Smola 2002]
11	$K(x_i, x_j) = \frac{\pi}{2\gamma} \frac{\cosh\left(\frac{\pi - \ x_i - x_j\ }{\gamma}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi}{\gamma}\right)}$	$0 \leq \ x_i - x_j\ \leq 2\pi, \gamma \neq 0$	[Vapnik 1998]

Tab. 4- 1 Bekannte Kernfunktionen im Überblick [in Anlehnung an Monien 2005]

Mit Hilfe von Kernen können innerhalb der zu klassifizierenden Daten nicht lineare Strukturen erkannt werden, wodurch, im Vergleich zu linearen Support Vector Machines, bessere Ergebnisse erzielt werden können.

4.2.6 Multi-Klassifikationsverfahren

Im Gegensatz zur Bi-Klassifikation, welche in den bisherigen Kapiteln behandelt wurde, sind in den meisten Klassifikationsanwendungen mehrere Klassen bzw. Gruppen Gegenstand der Analyse. Innerhalb der SVM-Anwendung gibt es daher verschiedene Methoden der Klassifikation. Multi-Klassifikation kann mittels direkter Verfahren oder indirekt mittels Verfahren, deren Grundlage die Bi-Klassifikation darstellt, erfolgen. Hinsichtlich der Ergebnisgüte sind direkte Klassifikationsverfahren, aufgrund des größeren Rechenaufwands, in der Regel nicht so effektiv wie die indirekten Verfahren [Hsu/Lin 2002].

Die Hauptaufgabe der Multi-Klassifikationsverfahren ist, wie bei der Bi-Klassifikation, die Findung einer Entscheidungsfunktion zur Klassifizierung neuer Daten. In den folgenden Multiklassifikationsverfahren sind wiederum die Datenvektoren $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$ mit $i \in \{1, \dots, K\}$ gegeben, wobei K hier für die Anzahl der zu analysierenden Klassen steht. Ausgangspunkt der Verfahren ist die lineare Trennung, wobei die Methodik für die nicht lineare Trennung analog umgesetzt werden kann.

4.2.6.1 One-Against-All-Klassifikation

Bei der One-Against-All-Klassifikation wird jede Klasse für sich untersucht und von den restlichen separiert [Shiego 2005]. Die restlichen Klassen werden hierbei zu einer Klasse zusammengefasst, wodurch die Vorzüge der Bi-Klassifikation genutzt werden können. Diese Zusammenfassung hat zur Folge, dass insgesamt K Optimierungsprobleme bei K zu untersuchenden Klassen zu lösen sind. Zur Lösung des binären Entscheidungsproblems sind auf der einen Seite die interessierende Klasse K und auf der anderen Seite eine Klasse, welche aus den Datenvektoren besteht, die zuvor den restlichen $K-1$ Klassen zugewiesen wurden, gegeben. Folglich sieht das k -te Optimierungsproblem mit $k \in \{1, \dots, K\}$ bei der linearen Trennung wie folgt aus:

$$\min \frac{1}{2} \|\mathbf{w}^{(k)}\|^2 + C \sum_{i=1}^l \xi_i^{(k)}. \quad (4-38)$$

Hierbei lauten die Nebenbedingungen:

$$w^{[k]}x_i + b^{[k]} \geq 1 - \xi_i^{[k]}, \quad \text{falls } y_i = k$$

$$w^{[k]}x_i + b^{[k]} \leq -1 + \xi_i^{[k]}, \quad \text{falls } y_i \neq k$$

$$\xi_i^{[k]} \geq 0, \quad i \in \{1, \dots, I\}, k \in \{1, \dots, K\}.$$

Der Index k steht hier für die K verschiedenen Optimierungsprobleme und $w^{[k]}$ ist der Normalenvektor der zu bestimmenden Trennebene. Nach K -maliger Berechnung des obigen Optimierungsproblems ergeben sich vorerst insgesamt K Entscheidungsfunktionen der Gestalt

$$f^{[k]}(x) = \text{sign}(w^{[k]}x + b^{[k]}) \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}. \quad (4-39)$$

Für jede der Klassen k muss eine Trennebene $D^{[k]}$ bestimmt werden, die diese Klasse vom Rest der Datenvektoren separiert. Die Trennebenen haben die Form

$$D^{[k]} := \{x \mid w^{[k]}x + b^{[k]} = 0\}. \quad (4-40)$$

Die Zuweisungsvorschrift, welche den Klassen die neuen Daten zuordnet, kann dann mit Hilfe dieser Trennebenen bestimmt werden. Die Klassenzuweisung erfolgt häufig auf Basis der Signum-Funktion. Die Klasse, deren Entscheidungsfunktion $f^{[k]}$ den Wert 1 liefert, wird dem neuen Datenvektor zugewiesen. Jedoch liefert dieses Verfahren nicht immer eine eindeutige Zuordnung, wie in der folgenden Abbildung zu erkennen ist.

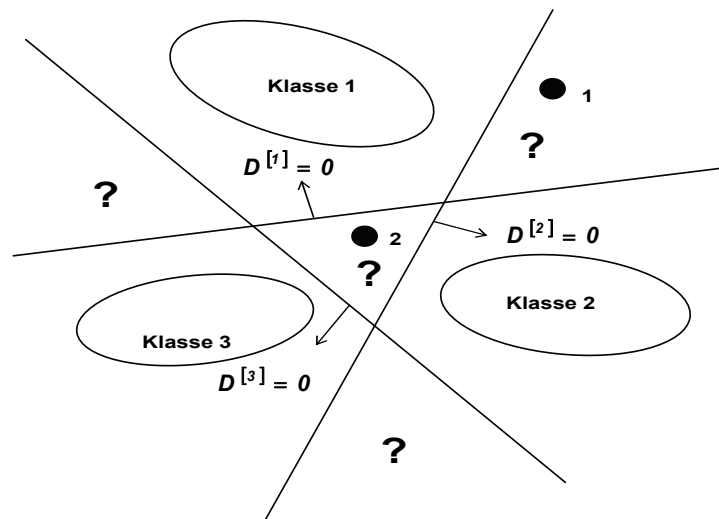


Abb. 4-8 Unklassifizierbare Regionen bei der One-Against-All-Klassifikation für $k=3$
[in Anlehnung an Shiego 2005]

Mit Hilfe von stetigen Entscheidungsfunktionen für die Klassifikation kann diese nicht eindeutige Zuordnung vermieden werden. Dies bedeutet, dass der Datenvektor x_i in die folgende Klasse klassifiziert wird [Shiego 2005]:

$$y_i = \arg \max_{k=1, \dots, K} (w^{[k]} x_i + b^{[k]}). \quad (4-41)$$

Somit wird der Datenpunkt 1 im obigen Beispiel in die Klasse 1 klassifiziert, da die Entscheidungsfunktion der Ebene $D^{[1]}$ den höchsten Wert liefert. Datenpunkt 2 liegt ebenfalls in der Klasse 1. Dieses Vorgehen zur Vermeidung der Nichteindeutigkeit der Klassengrenzen wird als Tie-Breaking bezeichnet [Kreßel 1999].

4.2.6.2 One-Against-One-Klassifikation

Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass Gebiete, die zu einer nicht eindeutig klassifizierbaren Region gehören, entfernt oder minimiert werden können. Dadurch kann die Unausgeglichenheit der Klassengrößen bei der One-Against-All-Klassifikation vermieden werden [Kreßel 1999]. Dazu wird für je zwei Klassen, unabhängig von den restlichen Klassen, eine optimale Trennebene berechnet. Um diese Berechnung durchführen zu können sind $K(K-1)/2$ Paarvergleiche nötig. Der Nachteil dieses Zwischenschritts ist der deutlich höhere Aufwand gegenüber dem One-Against-All-Verfahren, welcher allerdings durch die geringe Anzahl an Trainingsbeispielen pro Klasse verringert wird [Schölkopf/Smola 2002]. Bei dem Vergleich der Klassen k_1 und k_2 ergibt sich folgendes Optimierungsproblem, welches gelöst werden muss [Kreßel 1999]:

$$\min \frac{1}{2} \|w^{[k_1, k_2]}\|^2 + C \sum_{i=1}^{l'} \xi_i^{[k_1, k_2]}, \quad (4-42)$$

mit den Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} w^{[k_1, k_2]} x_i + b^{[k_1, k_2]} &\geq 1 - \xi_i^{[k_1, k_2]} && , \text{ falls } y_i = k_1 \\ w^{[k_1, k_2]} x_i + b^{[k_1, k_2]} &\leq -1 + \xi_i^{[k_1, k_2]} && , \text{ falls } y_i = k_2 \\ \xi_i^{[k_1, k_2]} &\geq 0, \quad i \in \{1, \dots, l'\}, k_1, k_2 \in \{1, \dots, K\}. \end{aligned}$$

Hierbei steht l' für die Anzahl der Vektoren aus den beiden Klassen k_1 und k_2 .

Nach der Voting-Strategy wird für einen neu zu klassifizierenden Vektor x_i der Wert jeder der $K(K-1)/2$ Entscheidungsfunktionen mit $f^{[k_1, k_2]}(x_i) = \text{sign}(w^{[k_1, k_2]} x_i + b^{[k_1, k_2]})$ berechnet [Kreßel 1999]. Wenn der neue Vektor mittels der Entscheidungsfunktion zu Klasse 1 zugeordnet wird, erhält diese Klasse einen Punkt und im Falle, dass er zu Klasse 2 zugeordnet wird, bekommt diese einen Punkt. Also werden $K(K-1)/2$ Punkte auf K Klassen verteilt. Der neue Datenvektor x_i wird dabei der Klasse zugeordnet, welche die meisten Punkte beinhaltet. Im Falle, dass bei beiden Klassen ein Punktegleichgewicht herrscht, wird der Vektor x_i zur

Klasse mit dem kleinsten Index zugeordnet [Kreßel 1999]. Bei dieser Methode sind nicht eindeutig klassifizierbare Gebiete nicht auszuschließen, welche jedoch im Vergleich zur One-Against-All-Methode deutlich kleiner sind. Der Aufwand bei der Multiklassifikation mittels One-Against-All- und One-Against-One-Verfahren ist gering, da die beiden Verfahren auf dem binären Trennungsprinzip basieren. Nachteilig sind die nichteindeutigen Gebiete bei der Klassifikation. Um das Problem der nichtklassifizierbaren Regionen zu beheben haben Platt, Christianini und Shawe-Taylor die *Decision Directed Acyclic Graph Support Vector Machines* entwickelt [Platt et al. 2000].

4.2.6.3 Decision Directed Acyclic Graph

Dieses Verfahren basiert auf der One-Against-One-Trennung, welche mit einem gerichteten Graphen verknüpft ist. Der Graph beinhaltet K innere Knoten, an denen jeweils eine Support Vector Machine berechnet werden muss. Dabei dienen die Endknoten der Klassenzuweisung von Testdaten. Diese Daten werden dann durch den zu erstellenden Graphen klassifiziert. Zur Veranschaulichung dieses Verfahrens kann die Abbildung 4-9 in Betracht gezogen werden.

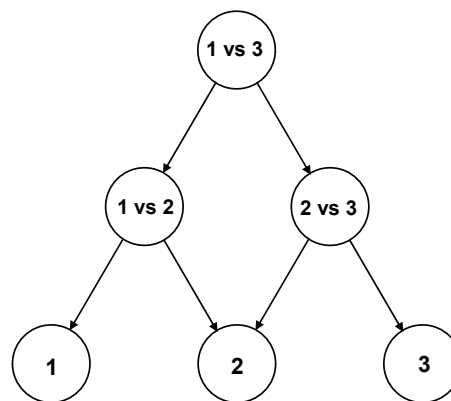


Abb. 4- 9 Prinzip beim Decision-Directed-Acyclic-Graph-Verfahren

Der Ausgangspunkt dieser Veranschaulichung sei erneut die Klassifikation mit drei Klassen. Zuerst wird die vorläufige Klassenzugehörigkeit des Datenpunkts am oberen Knoten des Graphen bestimmt. Ausgehend von der obigen Abbildung wird der Datenvektor am Anfang weder zu Klasse 1 noch zu Klasse 2 zugeordnet. Hierbei wird nach dem Ausschlussprinzip vorgegangen und nicht direkt klassifiziert [Monien 2005]. Im Anschluss dazu erfolgt die Überprüfung der Klassenzugehörigkeit zu den restlichen Klassen. Schrittweise werden Klassen ausgeschlossen, bis letztendlich eine Klasse übrig bleibt, welcher dann der Datenvektor zugeordnet wird.

4.2.6.4 Fuzzy Support Vector Machines

Die Klassifikation mittels Fuzzy Support Vektor Maschinen wurde von [Abe/Inoue 2002] eingeführt und dient der Reduzierung bzw. Beseitigung von nicht eindeutigen Klassifikationsgebieten bei der binären Trennung [Monien 2005]. Die Klassifikation basiert dabei auf sogenannten Membership-Funktionen (engl. Zugehörigkeitsfunktionen) statt auf Entscheidungsfunktionen. Diese Vorgehensweise kann entweder auf dem One-Against-All-Verfahren (OAA) oder auf dem One-Against-One-Verfahren (OAO) beruhen [Abe/Inoue 2002]. Im Folgenden sind die zu bestimmenden K Ebenen $D^{[k]}$ für $k \in \{1, \dots, K\}$ beim OAA-Verfahren die Grundlage für die Multiklassifikation mittels Membership-Funktionen. Diese Funktionen ermöglichen die eindeutige Bestimmung der Klassenzugehörigkeit. Folgende Größen werden für eine Klasse K bei der Klassifizierung von einem Eingabevektor x ermittelt [Abe/Inoue 2001]:

Wenn $k, j \in \{1, \dots, K\}$, dann gilt

$$m_{kj}(x) = m_{kk}(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ falls } F^{[k]}(x) > 1 \\ F^{[k]}(x) & , \text{ sonst} \end{cases} , \quad \text{für } k = j$$

$$m_{kj}(x) = \begin{cases} 1 & , \text{ falls } F^{[k]}(x) < -1 \\ -F^{[k]}(x) & , \text{ sonst} \end{cases} , \quad \text{für } k \neq j$$

$F^{[k]}(x)$ steht für die reellen Ausgabewerte der Entscheidungsfunktion $f^{[k]}$ an der Stelle x , die wie folgt ermittelt werden können:

$$F^{[k]}(x) := w^{[k]}x + b^{[k]} . \quad (4-43)$$

Letztendlich wird die Zugehörigkeit des Datenvektors x zur Klasse K mit dem Wert von $m_k(x)$ bestimmt. Die Höhe dieses Wertes ist maßgebend für die Einordnung des Vektors in die betreffende Klasse.

Die Zuordnung des Vektors x zu einer der K Klassen wird wie folgt ermittelt:

$$y = \arg \max_{k=1, \dots, K} m_k(x) . \quad (4-44)$$

Im Fall, dass z.B. $\max m_k(x) = 1$ ist, ergibt sich eine eindeutige Zuordnung des Vektors zur Klasse k .

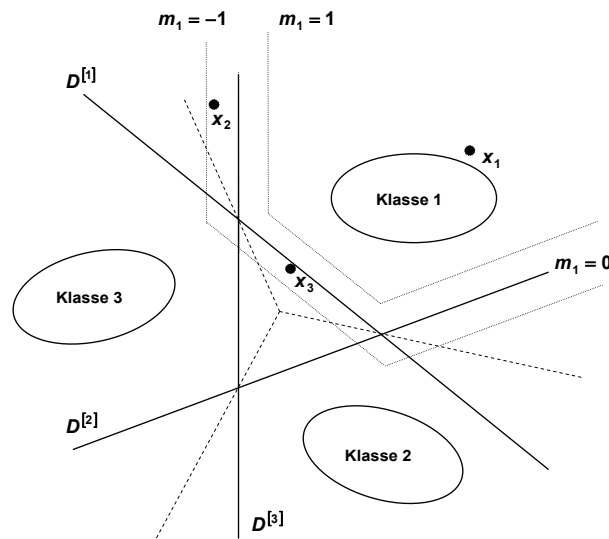


Abb. 4-10 Trennebenen bei der OAA-Fuzzy-Klassifikation [in Anlehnung Monien 2005]

Die Vorgehensweise für die Erstellung einer eindeutigen Klassifikationsdarstellung (vgl. Abbildung 4-10) besteht darin, zuerst für die einzelnen Beobachtungen, bezogen auf den Vergleich von zwei Klassen, Membership-Werte zu bestimmen. Dieser Schritt sollte jeweils aus Sicht aller beteiligten Klassen geschehen. Erst anschließend kann der endgültige Membership-Wert für jede Klasse ermittelt werden [Monien 2005].

4.2.6.5 Error-Correcting Output Codes

Error-Correcting Codes (Fehler-Korrektur-Codes) können Fehler in der Datenübertragung aufdecken und korrigieren. Das Verfahren der Error-Correcting Output-Codes (ECOC) wurde von [Dietterich/Bakiri 1995] entwickelt und dient zur Verschlüsselung von Klassifikationsausgabewerten, wodurch die Generalisierungsfähigkeit verbessert wird [Abe/Shiego 2005]. In Bezug auf Support Vector Machines können diese Codes außerdem zur Aufhebung von nicht-klassifizierbaren Regionen verwendet werden [Abe/Shiego 2005]. Bei der Multiklassifikation kommt es, aufgrund der höheren Anzahl von Klassen und Merkmalen, des Öfteren zu Falschklassifikationen. Diese können dann mittels des ECOC-Verfahrens minimiert werden.

4.2.6.6 Direktes Klassifizieren

Abgesehen von der Multiklassifikation auf Basis der Bi-Klassifikation, gibt es die Möglichkeit Eingabedaten direkt zu klassifizieren. Die folgende Methode, welche von [Vapnik 1998] entwickelt wurde, bietet eine derartige Möglichkeit: In einem einzigen Optimierungsproblem wird die Betrachtung aller Vektoren und Klassen ermöglicht [Monien 2005]. Dazu muss folgender Ausdruck minimiert werden [Weston/Watkins 1999]:

$$\min \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \|w^{[k]}\|^2 + C \sum_{i=1}^I \sum_{k \neq y_i} \xi_i^{[k]}, \quad (4-45)$$

dabei lauten die Nebenbedingungen

$$w^{[y_i]} x_i + b^{[y_i]} \geq w^{[k]} x_i + b^{[k]} + 2 - \xi_i^{[k]} \quad \text{mit } \xi_i^{[k]} \geq 0,$$

wobei $k \in \{1, \dots, K\} \setminus y_i$ mit $y_i \in \{1, \dots, K\}$.

Hierbei hat die Entscheidungsfunktion folgende Form:

$$f(x) = \arg \max_k (w^{[k]} + b^{[k]}) \quad \text{mit } k \in \{1, \dots, K\}. \quad (4-46)$$

4.2.7 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass heute eine Vielzahl an verschiedenen Klassifikationsverfahren insbesondere zur Multiklassifikation existieren. Auf der einen Seite gibt es die Multiklassifikationsverfahren, welche auf der Bi-Klassifikation basieren und dadurch schnellere Rechenzeiten ermöglichen. Auf der anderen Seite hingegen gibt es Methoden, mit deren Hilfe Datenvektoren direkt klassifiziert werden können. Die direkten Klassifikationsmethoden bieten eine bessere Übersicht als die indirekten Methoden. Sie bieten die Möglichkeit einer Gesamtdarstellung aller Klassen, wohingegen bei indirekten Methoden einige Zwischenformulierungen und Differenzierungen vorgenommen werden müssen. Als wesentlichen Vorteil der indirekten Methoden lässt sich der Rechenaufwand, der aufgrund der Bi-Klassifikationsbasis geringer ist als bei direkten Methoden, nennen.

Die Wahl eines Klassifikationsverfahrens ist somit von mehreren Faktoren abhängig. Zu diesen Faktoren zählen die Trainingsdauer, Rechenzeiten, Generalisierungsfähigkeit sowie Klassenanzahl und Anzahl an Beobachtungen. Somit ist die Auswahl eines geeigneten Verfahrens individuell auf den Anwendungsfall abzustimmen.

4.3 Datengrundlage und Merkmalsauswahl

Der Einsatz der Support Vektor Methode ermöglicht es, Daten zu klassifizieren und somit die Basis zur Prognose von Zugehörigkeiten nicht klassifizierter Beobachtungen zu bilden. Die zu untersuchenden Daten sollten hierbei so ausgeprägt sein, dass sich eine sinnvolle Klasseneinteilung innerhalb der Daten ergibt. Die Einteilung in die unterschiedlichen Klassen kann dabei auf unterschiedliche Weise vorgenommen werden:

1. manuelle Einteilung auf Basis vorhandenen Wissens
2. Einsatz von Segmentierungsverfahren zur Identifikation von möglichst homogenen Segmenten in einer Menge von nicht klassifizierten Daten.

Die Auswahl der beschreibenden Merkmale orientiert sich stark am Optimierungsproblem des Untersuchungsobjektes und spiegelt letztendlich die Klassenzugehörigkeiten wider. Es muss allerdings gewährleistet werden, dass die verwendeten Merkmale metrisch oder metrisch interpretierbar sind [Monien 2005]. Die Datenbasis muss für den Einsatz der SVM vollständig vorliegen, d.h. bei jeder Beobachtung muss ein Eintrag zu jedem Merkmal vorhanden sein, muss aber nicht in einer bestimmten Verteilung vorliegen.

4.3.1 Allgemeiner Ablauf bei der Klassifikation

Der allgemeine Ablauf eines Segmentierungs- bzw. Klassifikationsprozesses bei der Zuordnung einer neuen Beobachtung bzw. eines neuen Merkmals zu einem Segment bzw. einer Klasse ist in Abb. 4-11 dargestellt. Der Datenstamm bildet die Ausgangsbasis zur Klassifikation. Diese Daten können beispielsweise aus realen Versuchen oder aus Simulationsversuchen stammen. Um die Voraussetzungen für den Einsatz von Klassifikationsinstrumenten, wie die SVM, zu schaffen, ist es hilfreich den Datenstamm in geeignete Segmente zu unterteilen bzw. diese zunächst einmal zu definieren. Der Klassifikationsprozess beinhaltet nun die Trennung dieser vordefinierten Segmente in Klassen und die daran anschließende Prognose der Klassenzugehörigkeit eines neuen Merkmals.

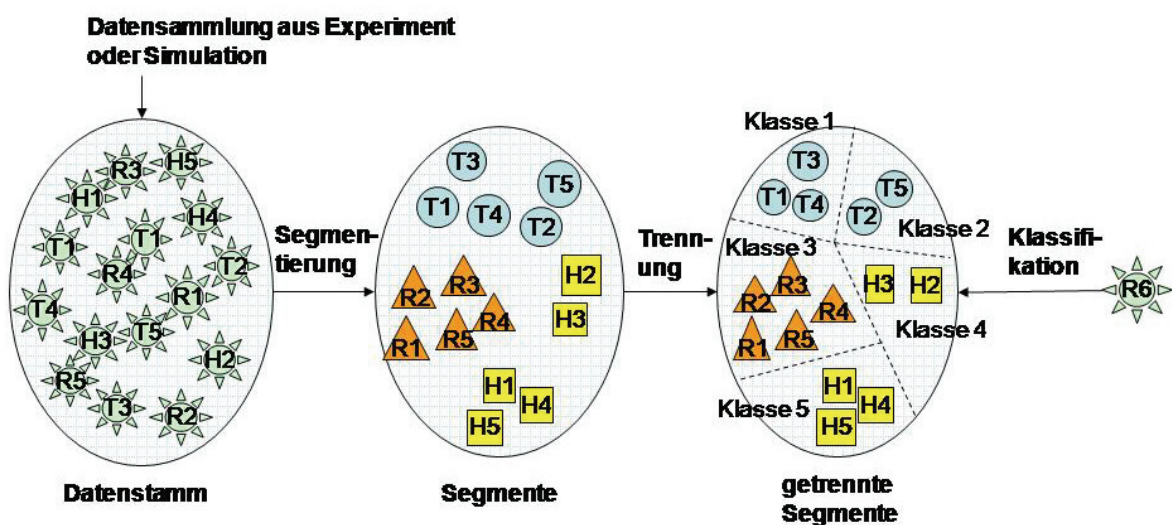


Abb. 4- 11 Prinzipieller Ablauf bei der Klassifikation

Mit Hilfe der Trainingsdaten werden die Segmentierung sowie die Trennung der Segmente in Klassen vorgenommen. Die SVM wird trainiert, um damit die Trennebene bestimmen zu können. Durch die Klassifikation der Testdaten erfolgt eine Überprüfung der SVM.

4.3.2 Kern- und Parameterwahl

Die angemessene Wahl der richtigen Kernfunktion ist entscheidend für den erfolgreichen Einsatz eines SVM-Modells [Chapelle et al. 2002]. In vielen Veröffentlichungen werden Polynom (4-47), die Radialbasis-Funktion (4-48) und sigmoide Funktionen (4-49) als mögliche Kerne genannt [Monien 2005]:

- Polynomial d -ten Grades:

$$K(x, z) = (1 + (x, z))^d \quad (4-47)$$

- Radial Basis (Gauß-Kern):

$$K(x, y) = \exp \left(-\frac{\|x - z\|^2}{c} \right) \quad (4-48)$$

- Sigmoid:

$$K(x, y) = \tanh (k_1(x, y) + k_2) \quad (4-49)$$

Trotz einer großen Vielfalt an Kernen kommt in den unterschiedlichsten Bereichen sehr oft die Radialbasis-Funktion zum Einsatz. Dies liegt darin begründet, dass neben den sehr guten Klassifikationsergebnissen eine schnelle Approximation innerhalb der Optimierung gegeben ist [Monien 2005]. Aufgrund dieser Leistungsstärke fiel somit die Wahl nach einem geeigneten Kern im Rahmen dieser Arbeit auf die Radialbasis-Funktion. Neben der Wahl der Kernfunktion ist die Suche nach geeigneten Parametern der Kernfunktionen ebenso Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz eines SVM-Modells. Hierbei sind bei herkömmlichen Support Vector Machines in der Regel zwei bis drei Parameter im Vornhinein festzulegen. Hierzu müssen die Werte des Kernparameters γ sowie die Ausprägung des Güteparameters C festgelegt werden.

Der Parameter C gibt die Information über die Wichtigkeit der Richtigklassifikation wieder. Je höher dieser Wert ist, desto eher wird die Richtigklassifikation im Gegensatz zur Optimierung der Spanne zwischen den Klassen fokussiert [Monien 2005].

Untersuchungen in [Monien 2005] zeigen, dass mit zunehmendem Wert des Kernparameters γ die Anpassung der Ebene an die Daten verbessert wird, was in einer erhöhten Trefferquote für die Trainingsdaten resultiert.

Leider ist die analytische Wahl der Parameter ein noch offenes Problem der Forschung [Bennett, Campbell 2000, Schölkopf/Smola 2002]. Eine Empfehlung von bestimmten Parameterausprägungen, in denen gute Klassifikationsergebnisse zu erwarten sind, können bisher noch nicht angegeben werden. Die Parameterwahl hängt sehr stark vom zugrunde liegenden Datensatz ab. Die Lösung dieses Problems ist eine systematische Vorgehensweise, bei der die Bestimmung der Parameter mittels des so genannten Gridsearch-Verfahrens ermöglicht wird [Hsu et al. 2003]. Hierbei bilden die Ausprägungen der Parameter ein gleichmäßiges Netz, bei dem in jedem Knoten, also jeder Kombination der vorher festgelegten Parameterausprägungen, eine Trefferquote ermittelt wird.

Die Gesamttrefferquote eines Klassifikationsinstruments lässt sich durch den Anteil der richtig klassifizierten Beobachtungen an allen vorliegenden Beobachtungen berechnen:

$$TQ = \frac{T(l)}{l}. \quad (4-50)$$

Hierbei ergibt $T(l) \leq l$ die Anzahl der richtig klassifizierten Beobachtungen bei einem Datensatz im Umfang von l Beobachtungen. Über die Trefferquote kann die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, mit welcher das Modell eine neue Beobachtung richtig klassifiziert. Im Mehrklassenfall ergibt sich die Trefferquote für eine Klasse k entsprechend aus

$$TQ_k = \frac{T(l^{[k]})}{l^{[l]}}, \quad (4-51)$$

wobei durch $l^{[k]}$ die Anzahl der Beobachtungen in Klasse k wiedergegeben wird. Es kann so eine differenzierte Beurteilung der Klassifikationsgüte erfolgen. Abb. 4-12 zeigt Beispiele entsprechender Gridsearch-Ergebnisse. Sie veranschaulicht sehr gut die unterschiedlichen Auswirkungen der Parameterausprägungen der vier Datensätze auf die Trefferquote. In allen vier Fällen ist zu erkennen, dass die Kombination eines großen Wertes des Güteparameters C mit einem kleinen Kernparameterwert γ zu den größtmöglichen Trefferquoten führt. Diese Kombination kann aber von Datensatz zu Datensatz sehr stark variieren und muss daher individuell ermittelt werden.

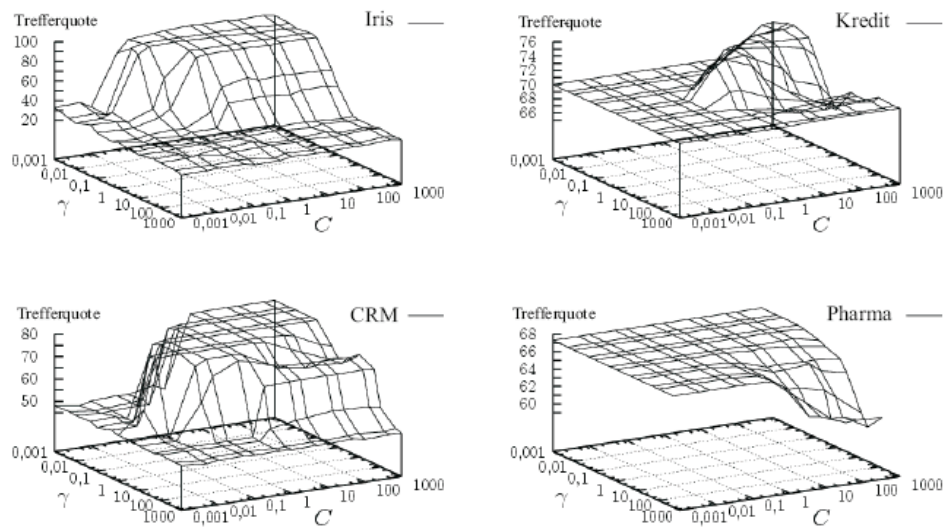


Abb. 4- 12 Darstellung der Trefferquoten für vier verschiedene Datensätze in Abhängigkeit der Parameter γ und C bei Einsatz des Radialbasis-Kerns [Monien 2005]

4.4 Bisherige Einsatzgebiete und Anwendungsbeispiele von SVM-Modellen

In den letzten Jahren wurde die SVM-Methodik immer weiterentwickelt, optimiert und viele Veröffentlichungen verfasst. Dies ist ein eindeutiges Indiz dafür, dass diese Methodik heute zu den wichtigsten Methoden des Maschinellen Lernens zählt. Der Prozess der Weiterentwicklung, Anpassung und Optimierung von Support Vector Machines wird voraussichtlich noch viele Jahre andauern. Ein Grund hierfür ist die fortschreitende Erschließung neuer Anwendungsgebiete.

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die heutigen Anwendungsgebiete der Support Vektor Maschinen. Im Anschluss folgt eine kurze Vorstellung der wichtigsten und im Rahmen dieser Arbeit relevanten Softwarelösungen.

Eines der wichtigsten Anwendungsgebiete der Support Vektor Methode ist heute die Mustererkennung. Die Mustererkennung beschäftigt sich mit der maschinellen Erkennung von digitalen Mustern, die Sensoren erfassen. Hierbei kann es sich um verschiedenste Arten von Informationen handeln. Die Einsatzgebiete reichen von der Erkennung handgeschriebener Zeichen, über die Identifizierung von Personen bis hin zur Auswertung von Audio- und Videosignalen. In der Praxis können diese Verfahren den Menschen unterstützen, indem sie beispielsweise durch die Erkennung handschriftlicher Zeichen dem Benutzer eine natürliche Form der Eingabe von Daten z.B. in einen PDA ermöglichen.

Die Klassifikation von Mustern kann allgemein als eine Abbildung aufgefasst werden, die ein Muster einer Klasse zuordnet [Zitzelsberger 2006]. Als Grundlage für die Klassifikation dienen Datensätze, deren Muster zuvor durch menschliche Hilfe einer Klasse zugeordnet wurden, wie zum Beispiel handgeschriebene Ziffern und deren Bedeutung. Anhand dieser Daten errechnet die Support Vektor Maschine eine Funktion, die Muster mit verschiedenen Merkmalen korrekt voneinander trennt und Muster mit ähnlichen oder gleichen Merkmalen derselben Klasse zuordnet. Mit dieser Entscheidungsfunktion lassen sich anschließend neue unbekannte Muster zuverlässig klassifizieren (Abb. 4-13).

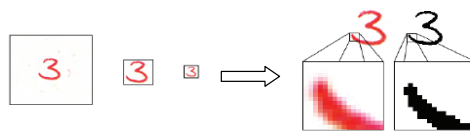


Abb. 4- 13 Vorverarbeitung und Merkmalsgewinnung bei der Texterkennung
[Zitzelsberger 2006]

Selbst im Bereich der Landwirtschaft kann durch die Anwendung der Bilderkennung mit Hilfe von Support Vektor Maschinen beispielsweise das Auslaufverhalten von Legehennen analysiert werden. Abb. 4-14 zeigt, wie eine Analyse der Nutzung der Grünfläche aussehen kann.



Abb. 4- 14 Nutzung der Grünfläche der Legehennen [Peis/Haidn 2004]

Ein weiterer nennenswerter Anwendungsbereich der Support Vektor Maschinen ist die Gesichtsmustererkennung beim Menschen, wie z.B. anhand der Fragestellung, ob ein Gesichtszug einem Mann oder einer Frau zugeordnet werden kann (Abb.4-15).

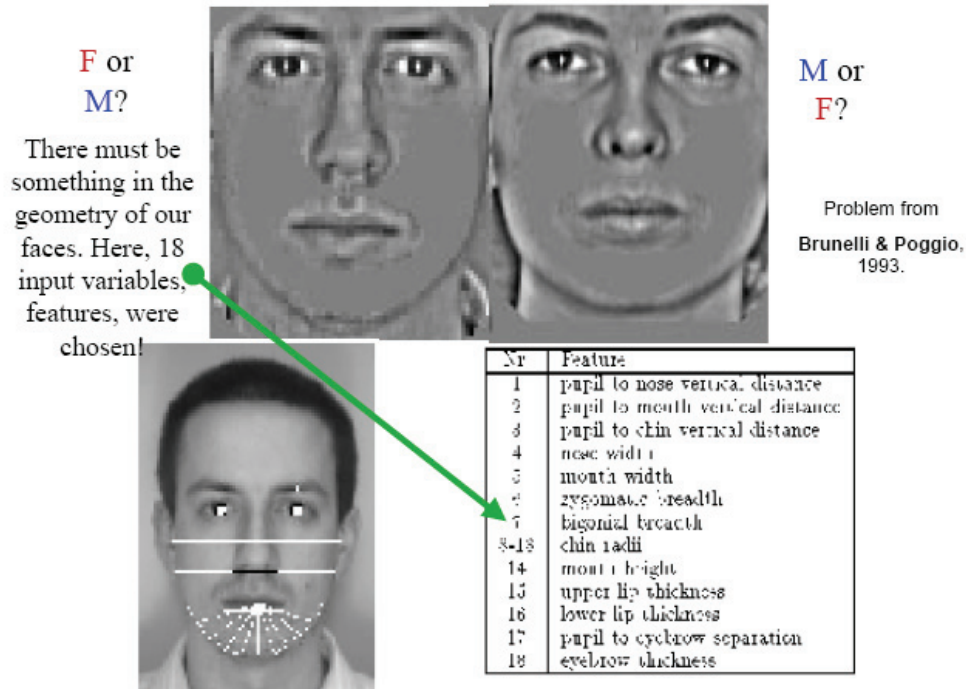


Abb. 4- 15 Zuordnung ob männlich oder weiblich [Kecman 2001]

Analog zu den bereits vorgestellten Anwendungen werden auch hier zunächst Merkmale, wie die Nasen- oder Kinnform, analysiert, in Klassen zugeordnet und als Lerndaten für die Support Vektor Maschine verwendet. Der anschließende Vergleich ordnet dann den neuen Gesichtszug anhand der Merkmale, je nach Übereinstimmung, der Klasse Mann oder Frau zu. Ein weiteres Anwendungsgebiet der Bilddatenklassifikation stellt in der Medizin die Tumordetektion dar [Müller 2004].

Ein noch recht junges Anwendungsfeld ist die Bioinformatik. Im Bereich des biologischen Data-Mining ist hier die automatische Kategorisierung von Genausprägungen aus DNA-Chips zu nennen. Mittels Support Vektor Maschinen können eine große Anzahl von Genen erfasst und analysiert werden [Brown et al. 2000].

Im technischen Umfeld halten Methoden der künstlichen Intelligenz in den letzten Jahren vermehrt Einzug. Gerade die Support Vektor Methode verspricht durch seine analytische Vorgehensweise und eine sehr gute Prognosegüte weitere Fortschritte. Als Beispiele sollen an dieser Stelle jeweils eine Anwendung aus dem Bereich der Produktentwicklung und der Prozessführung vorgestellt werden.

Die TU Berlin verwendet ein SVM-Modell zum Monitoring und der Analyse des Schwingungs- und Vibrationsverhaltens von Verbrennungsmotoren. Das Modell ist hierbei direkt an verschiedene Motorenprüfstände gekoppelt. Das so trainierte Modell erlaubt nun Vorhersagen über das Schwingungs- und Vibrationsverhalten neuer Motorenkonstruktionen anhand der vorhandenen Geometriedaten aus dem CAD. In einem sehr frühen Stadium können somit Motorenkonstruktionen bewertet und noch vor einer teuren Prototypenfertigung optimiert und verifiziert werden [Bazarsuren/Filbert 2004].

Im Umfeld der Prozessoptimierung entwickelte A. P. Kumar am Fraunhofer IPA ein agentenbasiertes Diagnosesystem zur Überwachung des Polierprozesses bei der Herstellung von Silizium-Wafern. Ziel war es, mit einer integrierten Prozessüberwachung frühzeitig Defektentstehungen auf Grund des technischen Prozesses vorhersagen zu können. Kern dieses Prognosemodells bildet ebenfalls die Support Vektor Methode [Kumar 2005].

Viele weitere Beispiele würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Im Folgenden werden nun die gängigsten kommerziell verfügbaren Softwarelösungen kurz vorgestellt.

4.5 Softwarelösungen

Die zahlreich als Freeware erhältlichen Softwaretools zu Support Vektor Maschinen sind in vielen Fällen auf wenige Anwendungen begrenzte Implementierungen in C++, Java oder Windows/Linux. Aus diesem Grund beschränkt sich dieser Überblick auf Softwaretools, die erstens eine grafische Oberfläche besitzen, zweitens Multiklassen unterstützen und drittens in der Lage sind, sich auf unterschiedliche Anwendungsbereiche adaptieren zu lassen.

4.5.1 MATLAB SVM Toolbox

Die MATLAB SVM Toolbox der Information Signal Images Systems (kurz: ISIS) Research-Group ist eine kernbasierte SVM-Implementierung zur Klassifikation und Regression von Datensätzen.

Die SVM Toolbox ist ein einfach gestaltetes Softwaretool für MATLAB. Es besitzt eine übersichtliche Oberfläche und unterstützt Multiklassen. Allerdings ist der Anwendungsbereich sehr eingeschränkt, da dieses System nur eine 2D-Klassifikation und 1D-Regression erlaubt. Sehr große Datensätze bei einer hohen Anzahl an Klassen würden das Programm

sicherlich an seine Grenzen führen. Auf Grund der Praxisrelevanz wird auf die Implementierung der SVM Toolbox nicht eingegangen.

4.5.2 MATLAB Fuzzy Logic Toolbox

Die Fuzzy Logic Toolbox der Fa. Mathworks erweitert die MATLAB-Umgebung für technisch-wissenschaftliche Berechnungen um Werkzeuge für den Entwurf von Fuzzy Logic Systemen. Der Anwender wird von grafischen Benutzeroberflächen (GUIs) durch die einzelnen Entwicklungsschritte für ein Fuzzy Inference-System geleitet. Zudem werden Funktionen für zahlreiche verbreitete Fuzzy Logic Methoden, wie zum Beispiel Fuzzy Clustering und adaptives Neuro-Fuzzy-Lernen, zur Verfügung gestellt. In Bezug auf die Support Vektor Maschinen ist das Fuzzy-Lernen ein geeignetes SVM-Anwendungsfenster. Wichtigstes Merkmal ist dabei die Erzeugung der Membershipfunktionen.

Die Fuzzy Logic Toolbox ermöglicht die Anwendung von Neuro-Fuzzy-Techniken und Clustering-Verfahren zur Modellierung und Klassifikation des Verhaltens von Systemen.

Abb. 4-16 zeigt den ANFIS-Editor (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Editor), der Membership-Funktionen erzeugt, indem diese mit Eingabedaten trainiert werden, anstelle einer manuellen Eingabe. Die Toolbox arbeitet sowohl allein mit einem Back-Propagation-Algorithmus als auch in Kombination desselben mit einer Kleinste-Quadrate-Methode, wodurch Fuzzy-Systeme aus den Daten lernen können.

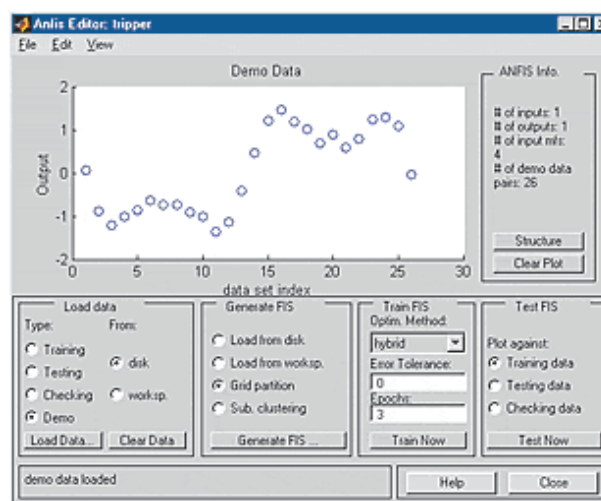


Abb. 4- 16 Beispiel Anfis-Editor [Quelle: Mathworks]

Die Fuzzy Logic Toolbox unterstützt K-Means-Clustering und subtraktives Clustering, Verfahren zur Klassifikation und Modellierung von Daten (Abb. 4-17).

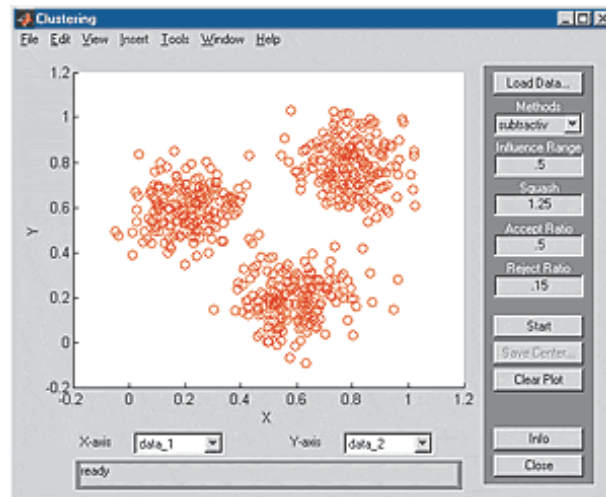


Abb. 4- 17 Clustering von Datenstrukturen [Quelle: Mathworks]

Die Fuzzy Toolbox bietet im Bereich der Neuronalen Netze ein sehr breites Spektrum an Möglichkeiten zur Analyse, Klassifikation und Bewertung von Datensätzen, ist allerdings nicht als Freeware zu erhalten.

4.5.3 YALE

YALE (Yet Another Learning Environment) ist eine als Freeware erhältliche quell-offene Entwicklungsumgebung für Experimente und Anwendungen im Bereich des maschinellen Lernens, des Data Minings und der Knowledge Discovery. YALE wurde 2001 am Lehrstuhl für künstliche Intelligenz der Universität Dortmund entwickelt und über die Jahre immer weiter optimiert und aktualisiert.

YALE bietet im Vergleich zu den bereits vorgestellten Systemen die umfangreichste Softwarelösung an. Sie unterstützt Multiklassen, besitzt eine übersichtliche grafische Oberfläche und kann zudem Daten dreidimensional abbilden. Darüber hinaus bietet Yale über 100 Lernschemas für Klassifikationen und Regressionen.

Insgesamt bietet die Softwarelösung Yale die besten Eigenschaften, um das Konzept einer ganzheitlichen Modellierung von Prozessfolgen mittels der Support Vektor Maschine zu realisieren. Abb. 4-18 gibt einen ersten Eindruck vom Einsatz von Yale bei der Klassifikation und anschließender Visualisierung der Trennung von Datensätzen in Multiklassen.

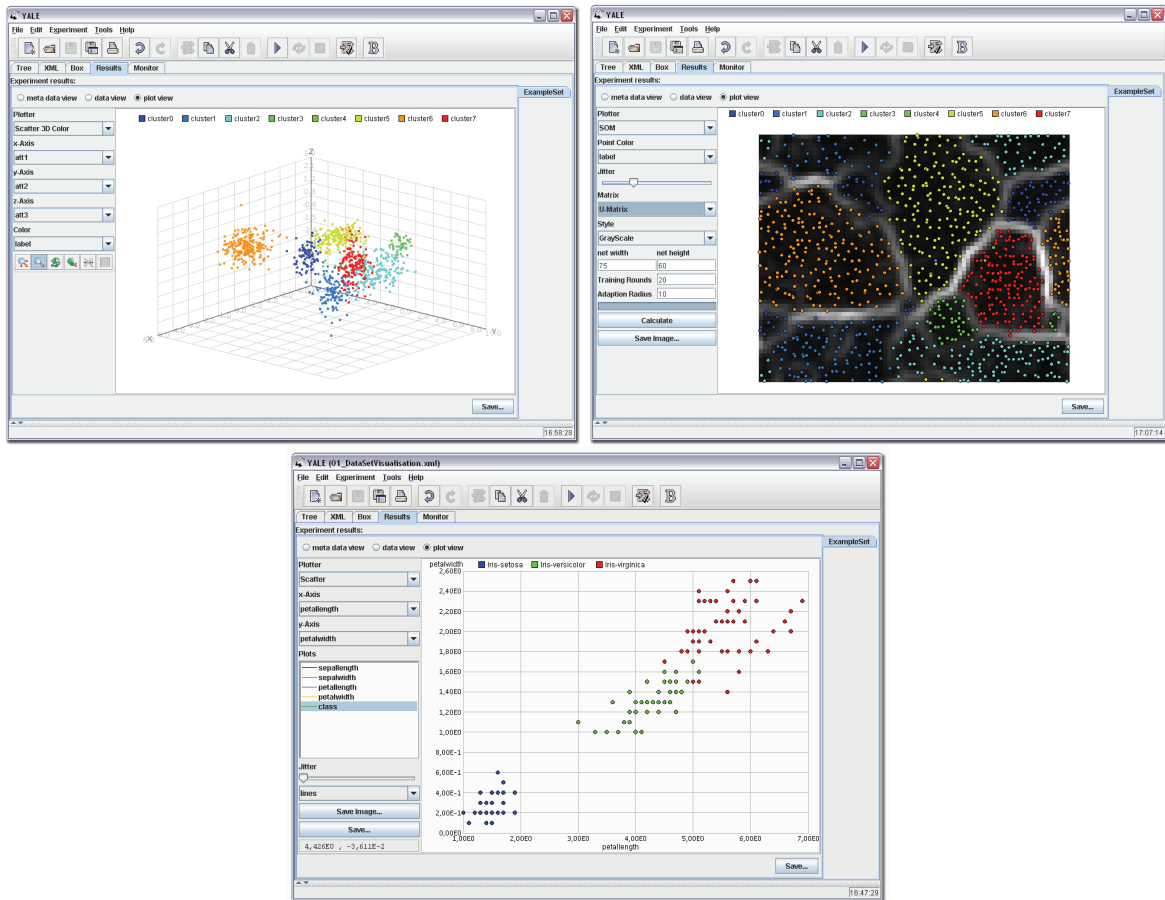


Abb. 4- 18 YALE Benutzeroberfläche bei Multiklassifikation [Quelle: <http://rapid-i.com>]

5 Betrachtete Prozess- und Messtechnik zur Verifikation

5.1 Betrachtete Prozesstechnik

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell soll anhand einer Prozesskette aus dem Rapid Manufacturing verifiziert werden. Hierzu kommt die Prozessfolge Lasersintern – Strahlspanen (Kugelstrahlen) zum Einsatz. Im Folgenden werden deshalb kurz die Prozessgrundlagen und deren Einflussgrößen behandelt.

5.1.1 Der Lasersinterprozess und seine Einflussgrößen

Bei dem generativen Verfahren Lasersintern handelt es sich um eine relativ junge Technologie. Ansätze zur Modellierung und Simulation des Prozesses sind dennoch vereinzelt in der Literatur beschrieben [Niebling 2004; Niebling 2005; Kolossov 2004]. Hier sind vor allem die physikalischen Zusammenhänge von Bedeutung, die sehr komplex und eng verflochten sein können (Abb. 5-1).

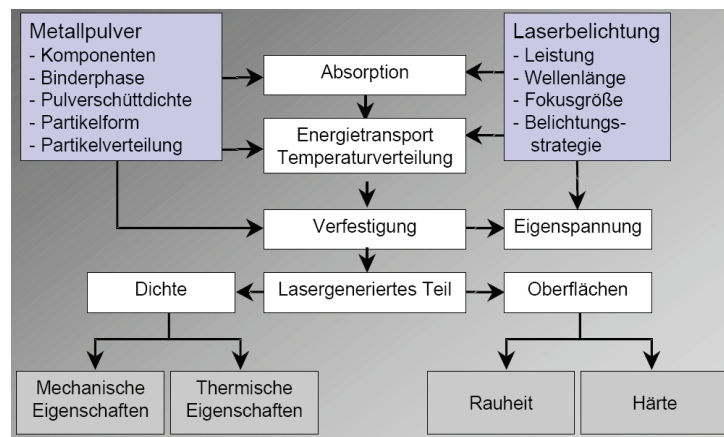


Abb. 5- 1 Physikalische Zusammenhänge beim Lasersintern [Quelle: EOS GmbH]

Es gibt im Wesentlichen zwei Hauptstellgrößen, das Metallpulver und den Laser. Das Metallpulver und die Laserbelichtung haben einen besonderen Einfluss auf die Absorption und den Energietransport. Sie bestimmen den Verfestigungsvorgang, der einerseits die technischen Eigenschaften des generierten Bauteils sowie Dichte und Oberflächenbeschaffenheit definiert [Niebling 2005]. Eine Lasersinter-Anlage besteht im Wesentlichen aus den folgenden 5 Komponenten:

1. dem Laser, zum Aufschmelzen des Metallpulvers,
2. der Trägerplattform mit aufgesetzter Bauplattform,
3. der Dosierplattform, zur Bevorratung des Metallpulvers,
4. dem Abstreifer, zum Auftragen des Metallpulvers auf die Bauplattform
5. dem Prozessrechner zur Prozesssteuerung.

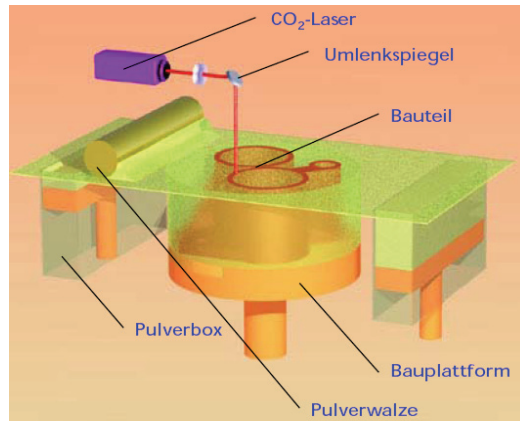


Abb. 5- 2 Prinzipieller Aufbau einer Lasersinteranlage [Hennings 2002]

5.1.1.1 Technische Kenngrößen des Lasersinterprozesses

Im Folgenden werden zunächst die technischen Kenngrößen beschrieben, die durch die jeweiligen Prozessparameter beeinflusst werden können.

Abb. 5-3 gibt einen Überblick der Prozessparameter von welchen das Sinterergebnis hinsichtlich Werkstückeigenschaften, Qualitätsmerkmale und technischer Kenngrößen beeinflussbar ist.

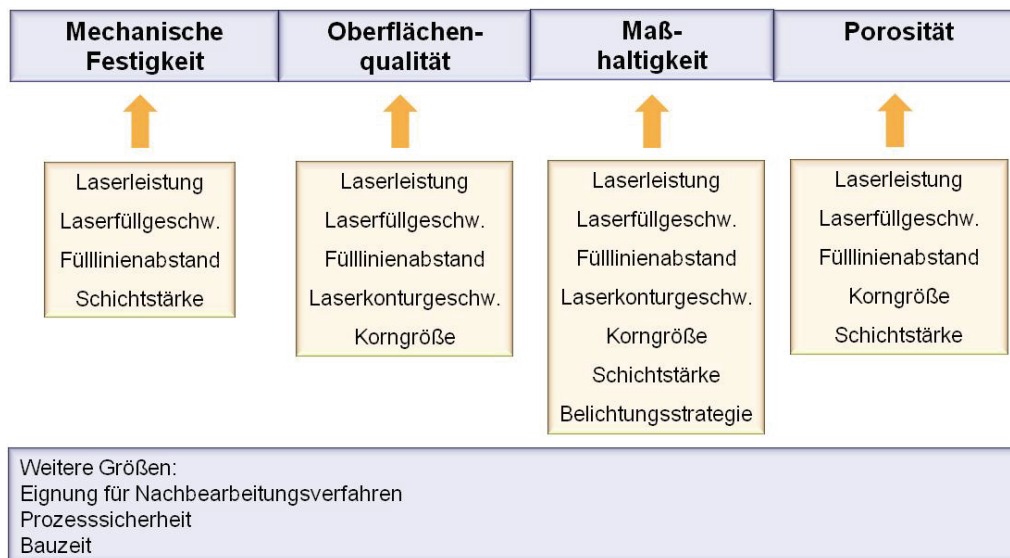


Abb. 5- 3 Prozessparameter und ihr Einfluss [In Anlehnung an Müller 2002]

Mechanische Festigkeit

Die mechanische Festigkeit beinhaltet in diesem Zusammenhang folgende Kenngrößen:

- Biegebruchfestigkeit
- Zugfestigkeit
- Härte und
- Druckfestigkeit.

Diese Kenngrößen hängen im Wesentlichen vom Bauteilvolumen bzw. von der Bauteildichte ab. Beeinflusst wird die Bauteildichte durch die Scangeschwindigkeit und den Fülllinienabstand sowie der Schichtstärke und der Laserleistung [Müller 2002]. Abb. 5-4 zeigt exemplarisch die Abhängigkeit der Bauteildichte von der Scangeschwindigkeit.

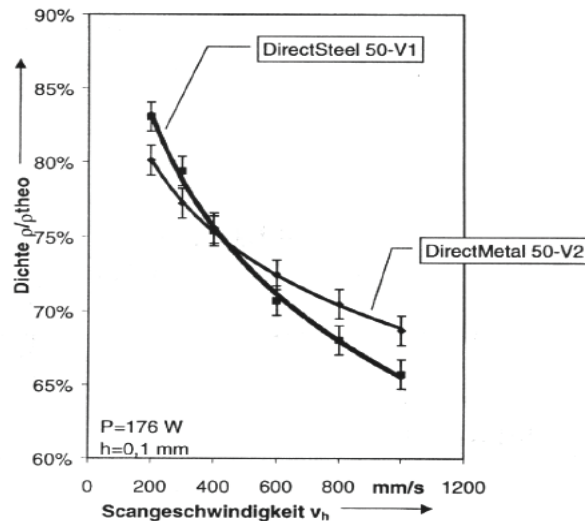


Abb. 5- 4 Abhängigkeit der Bauteildichte von der Scangeschwindigkeit [Müller 2002]

Bei hohen Scangeschwindigkeiten und großen Fülllinienabständen verringert sich die Bauteildichte und damit auch die mechanische Festigkeit des Werkstücks [Müller 2002]. Andererseits würde sich auch die benötigte Bauzeit verringern. Bei einer niedrigen Scangeschwindigkeit und einem kleinen Fülllinienabstand steigt die Dichte. Damit erhält man höhere mechanische Festigkeiten. Außerdem steigt hierbei auch die Wärmeleitfähigkeit des gesinterten Werkstücks.

Oberflächenqualität und Porosität

Scangeschwindigkeit und Fülllinienabstand üben auch hier einen Einfluss auf die Oberflächenqualität und Porosität aus. Generell führen niedrige Scangeschwindigkeiten und kleine Fülllinienabstände zu niedrigen Oberflächenrauheiten und folglich auch zu einer geringen Porosität [Müller 2002]. Die Korngröße des Sinterwerkstoffs hat ebenfalls großen Einfluss auf die Oberflächenbeschaffenheit.

Maßhaltigkeit

Die Maßhaltigkeit wird neben den bereits vorgestellten Prozessparametern Scangeschwindigkeit, Fülllinienabstand und Korngröße besonders durch die Schichtstärke beeinflusst. Hierbei

wird mit der Schichtstärke die Genauigkeit bestimmt, mit der das Werkstück in Z-Richtung aufgebaut werden kann. Eine Untergrenze bildet hier der größte Partikeldurchmesser der Pulverteilchen.

Die Laserleistung wird im Allgemeinen auf den maximalen Wert gesetzt und darf nicht beliebig verkleinert werden, da bestimmte physikalische Prozesse im Metallpulver eine gewisse Zeit benötigen, um vollständig abzulaufen [Müller 2002]. Generell beeinflussen Laserleistung und Belichtungsparameter alle erwähnten Bauteileigenschaften. Zusammenfassend lassen sich für den Lasersinterprozess folgende technischen Kenngrößen festlegen:

- Mechanische Festigkeiten
- Oberflächenrauheit
- Maßhaltigkeit bzw. Toleranzen
- Bauzeit
- Prozesssicherheit.

Abb. 5-5 zeigt schematisch die Prozesskette des Lasersinterns mit den einzelnen Prozessschritten sowie den jeweiligen Einflüssen der Prozessparameter und Kenngrößen des Sinterergebnisses.

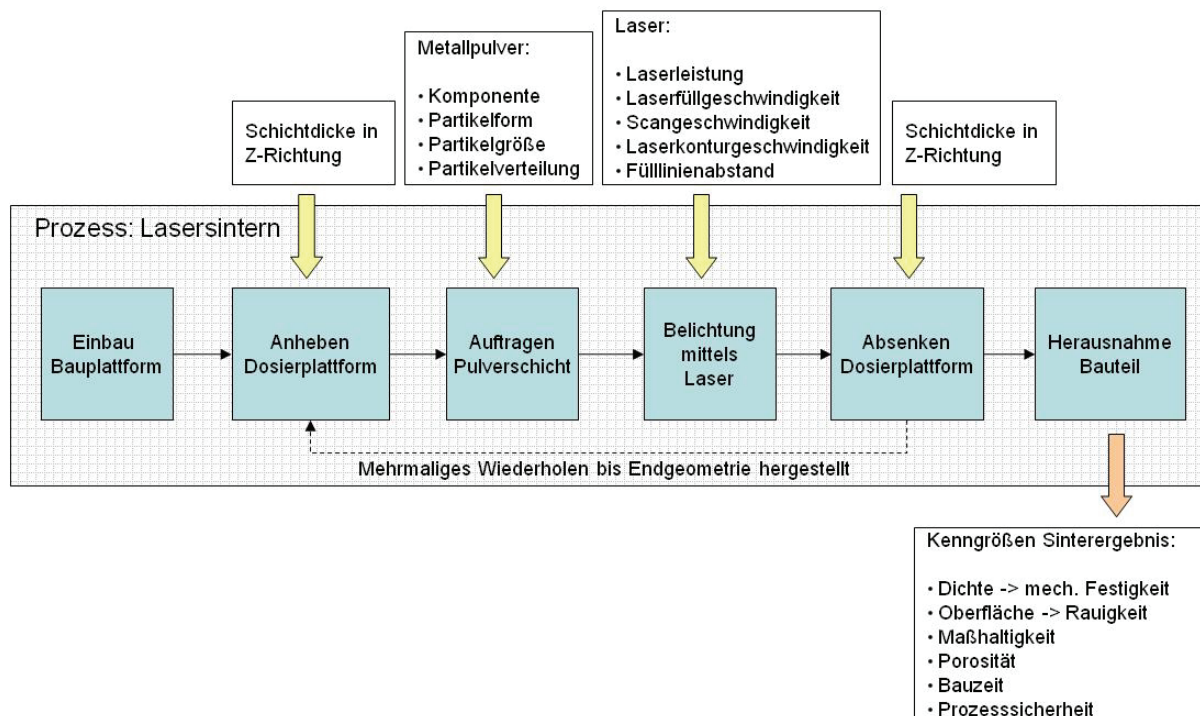


Abb. 5- 5 Lasersinterprozess mit Einfluss- und Kenngrößen

5.1.2 Der Strahlprozess und seine Einflussgrößen

Das *Strahlspanen* gewinnt als Bearbeitungsverfahren eine immer größere Bedeutung. Durch Rechnersimulation ist es möglich geworden, die sehr komplexen Prozessabläufe auf den Einsatzzweck hin zu planen [Maizoobi 2005; Wu-Wie 2005]. Verbesserungen bei der Steuerung und der eingesetzten Messtechnik ermöglichen zudem die Beherrschung des Verfahrens in engen Toleranzfeldern. Bei allen mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahren werden die angestrebten Veränderungen der randnahen Werkstoffschichten durch lokale elastisch-plastische Deformationen des Werkstoffs bewirkt. Dabei sind die Ursachen der Ver- aber auch Entfestigungsvorgänge in der Erzeugung und Vernichtung von Gitterstörungen wie z.B. Versetzungen zu suchen. Die Erzeugung der Makroelastizitäten lässt sich grundsätzlich an zwei elementaren Vorgängen erklären [Schulz 2003]:

- Plastische Streckung der unmittelbaren Werkstückoberfläche.
- Auftreten einer Hertz'schen Pressung in der Kontaktzone zwischen Strahlgut und Strahlmittel.

Beim Vorgang der plastischen Streckung in Oberflächennähe, wird die unmittelbare Oberfläche des Werkstücks plastifiziert. Dies führt nach der Entlastung zu Druckelastizitäten an der Oberfläche und zu Zugeelastizitäten im Inneren.

Beim Vorgang der Hertz'schen Pressung treten die maximalen plastischen Verformungen in einem bestimmten Bereich unter der Oberfläche auf. Hierdurch bildet sich ein Druckelastizitätszustand mit einem Maximum unterhalb der Werkstückoberfläche aus [ElTobgy 2004]. Beide Prozesse treten stets nebeneinander auf und werden durch die Strahlparameter beeinflusst. Der Strahlvorgang muss so geführt werden, dass eine plastische Deformation des Werkstücks erreicht wird.

Das Strahlspanensystem arbeitet mit einem geschlossenen Strahlmittelkreislauf in Verbindung mit einer hochwirksamen Staubfilteranlage. Das Herz der Strahlmaschine ist das Schleuder- rad, welches das Strahlmittel auf die zu bearbeitende Oberfläche schleudert. Über einen Luftstromabscheider wird das Strahlmittel von Staub und abgestrahlten Teilchen gereinigt und in den Strahlkreislauf zurückgeführt. Staub und Verunreinigungen werden über ein Ventilator- system in den Staubbehälter geleitet und können von dort entleert werden.

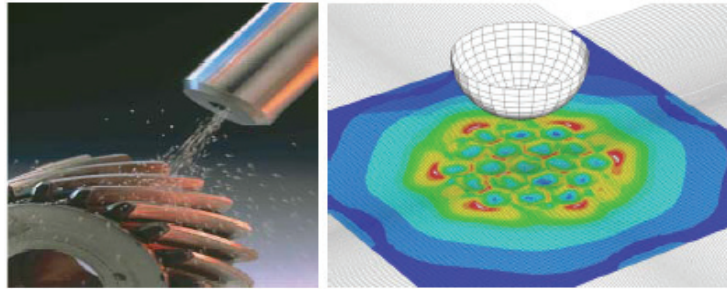


Abb. 5- 6 Beispiel: Strahlspanen real und virtuell [Klemenz 2006]

Für ein optimales Strahlergebnis müssen die Prozessparameter optimal aufeinander abgestimmt sein. Hierbei ist zu beachten, dass neben den genannten erwünschten Effekten auch eine schädigende Wirkung durch falsche Prozessführung auftreten kann. Insbesondere durch zu starkes und langes Strahlen können Ermüdungserscheinungen des Werkstoffs auftreten.

5.1.2.1 Technische Kenngrößen des Kugelstrahlprozesses

Neben der Veränderung der Oberflächencharakteristik bzw. Oberflächenrauheit, bewirkt eine Kugelstrahlbehandlung auch eine Steigerung der Dauerfestigkeit sowie die Induzierung von Eigenspannungen. Beim Kugelstrahlen gelten folgende Prozessparameter [Schiffner 2001]:

- Strahlgut: Werkstoff und Härte, sowie Form und Abmessung
- Strahlmittel: Strahlwerkstoff und Härte
- Prozessführung: Strahlzeit, Kugelgeschwindigkeit, Überdeckung der bestrahlten Fläche sowie Auftreffwinkel der Kugeln.

Darüber hinaus lassen sich weitergehende Aussagen für den Kugelstrahlprozess herleiten, da die Größe des Kugeleindrucks ein Maß für die maximal erreichbare Umformung je Kugel darstellt und somit auch die Intensität der Strahlung beeinflusst. Werden beim Kugelstrahlen kleine Kugeldurchmesser verwendet, so wird zur Anhebung der Strahlintensität der Einsatz größerer Kugeldurchmesser erheblich wirksamer sein als die Erhöhung der Kugelgeschwindigkeit. Je größer aber der Kugeldurchmesser ist, desto größer wird die Abhängigkeit von der jeweiligen Kugelgeschwindigkeit, so dass, ausgehend von einer bestimmten vorgegebenen Strahlintensität oder Oberflächenrauheit, auch die Erhöhung der Kugelgeschwindigkeit die geeignete Maßnahme zur Erhöhung der Strahlintensität sein kann.

Neben der Veränderung der Oberflächenrauheit bewirkt eine Kugelstrahlbehandlung auch eine Steigerung der Dauerfestigkeit sowie die Induzierung von Eigenspannungen. Auch in

diesen Bereichen gibt es Korrelationen zu den bereits erwähnten Prozessparametern. In Abb. 5-7 ist die Steigerung der Dauerfestigkeit über der Kugelgeschwindigkeit aufgetragen.

Im Bereich bis zu etwa 25 m/s ist eine Linearität zu erkennen. Eine maximale Steigerung der Dauerfestigkeit erhält man nur für Kugelgeschwindigkeiten bis zu ca. 55 m/s. Bei höheren Geschwindigkeiten sinkt das Erhöhungspotential der Dauerfestigkeit.

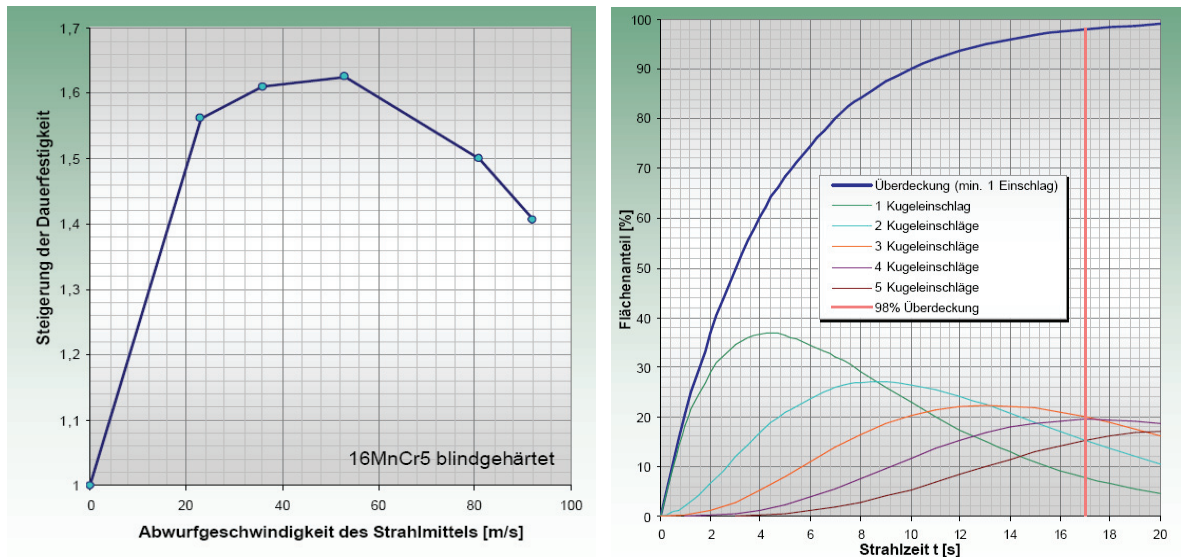


Abb. 5- 7 Zusammenhang zwischen Dauerfestigkeit und Kugelgeschwindigkeit sowie Überdeckung und Strahlzeit [Eichseder 2004]

Der Überdeckungsgrad lässt sich durch die Strahlzeit beeinflussen. In Abb. 5-7 ist grafisch der Flächenanteil in Abhängigkeit von der Strahlzeit aufgetragen. Der Überdeckungsgrad steigt dabei exponentiell mit der Strahlzeit an. Um eine optimale Überdeckung zu erzielen sollte die Strahlzeit im Bereich zwischen 16 und 20 s liegen. Dies ist natürlich abhängig von der Form und Größe des zu bestrahlenden Werkstücks. In diesem Zusammenhang interessiert aber nur die Korrelation zwischen Überdeckung und dem Parameter der Strahlzeit. Zusammenfassend lassen sich folgende technische Kenngrößen ableiten:

- Oberflächenrauheit
- Dauerfestigkeit
- Eigenspannungsverteilung
- Werkstoffhärte
- Prozesszeit bzw. Strahlzeit.

Abbildung 5-8 zeigt schematisch den Kugelstrahlprozess mit den jeweiligen Einzelprozessen, den Einfluss der Prozessparameter und die Kenngrößen.

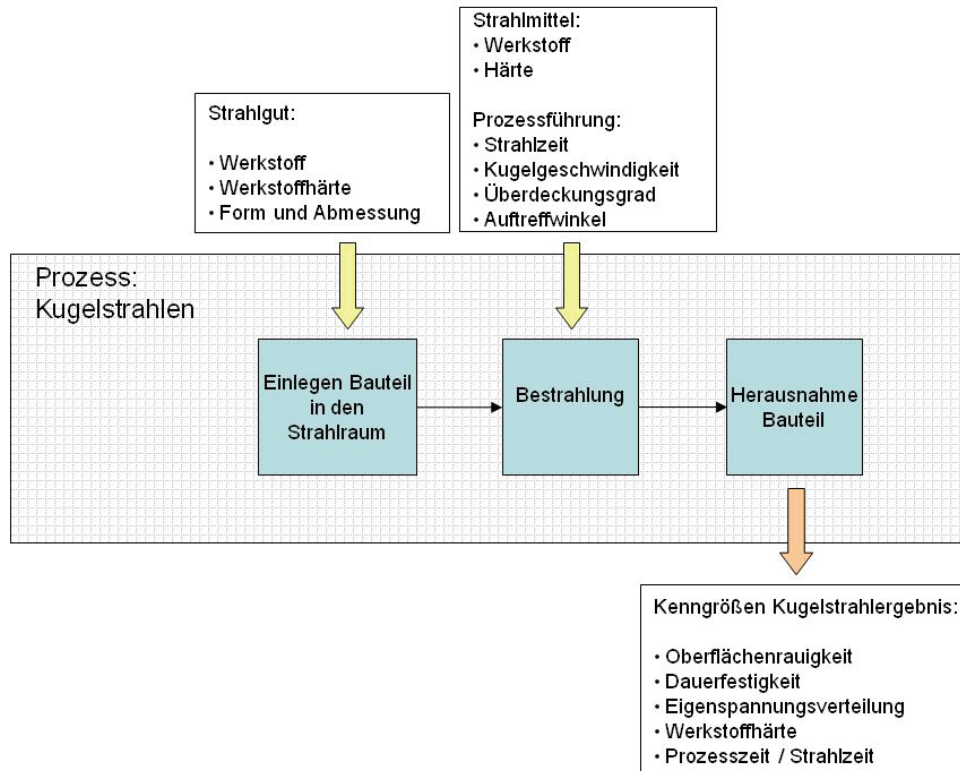


Abb. 5- 8 Kugelstrahlen mit Einfluss- und Kenngrößen

5.2 Betrachtete Messtechnik zur Verifikation des Modells

Zur Verifikation des Gesamtmodells müssen die Oberflächenrauheiten lasergesinterter Bauteile bestimmt werden. In der Messtechnik wird hierzu die Oberfläche mit einem so genannten Tastschnittgerät abgetastet [Sorg 2000]. Rauheitskenngrößen werden, falls nicht anders angegeben, an Einzelmessstrecken definiert. Ergebnisse werden generell als Mittelwerte aus mehreren Einzelmessstrecken angegeben. Fünf Einzelmessstrecken sind Standard, andernfalls wird die Anzahl der Einzelmessstrecken angegeben. Für die Rauheitsauswertung ist eine genormte Bezugslinie erforderlich, die in der DIN 4762 als eine mittlere Gerade innerhalb einer Einzelmessstrecke dargestellt wird. Die bedeutendsten Rauheitskenngrößen sind [Mennig 1995]:

- R_a als arithmetisches Mittel der Abweichungen des Rauheitsprofils von der Mittellinie,
- R_z ist das arithmetische Mittel aus fünf Einzelrautiefen. Dabei wird der größte Abstand zwischen der höchsten Spitze und dem tiefsten Tal berücksichtigt,
- R_{max} ist die größte Einzelrautiefe innerhalb der Gesamtmessstrecke,
- R_t ist die größte Höhendifferenz zwischen Spitze und Tal der Gesamtmessstrecke.

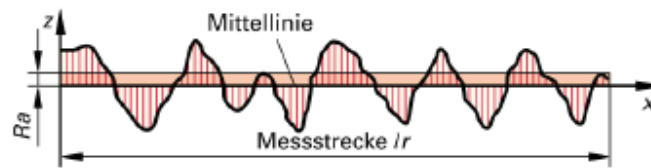


Abb. 5- 9 Mittenrauwert R_a [Fachkunde Metall]

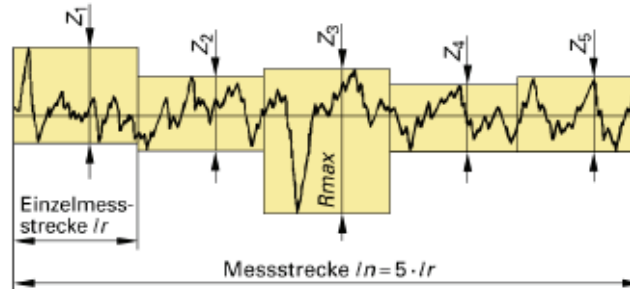


Abb. 5- 10 Rauheitsprofil nach DIN 4168 [Fachkunde Metall]

Unabhängig davon, welches Messgerät verwendet wird, muss bei Rauheitsmessungen nach dem Tastschnittverfahren besonders die Wahl der geeigneten Taststrecke berücksichtigt werden. Als Taststrecke wird diejenige Strecke bezeichnet, die der Messtaster auf dem Werkstück abfährt.

6 Methodischer Ansatz zur gekoppelten Modellierung technischer und betriebsorganisatorischer Kennzahlen

In dieser Arbeit wird ein Modell erarbeitet, welches ermöglicht, technische Toleranzen und betriebsorganisatorische Kennzahlen eines Fertigungssystems gekoppelt abzubilden und deren Abhängigkeiten und Wirkzusammenhänge herauszuarbeiten und zu klassifizieren. Hierzu müssen alle notwendigen Kenngrößen, Parameter und Schnittstellen zu den betrachteten Prozessfolgen, Maschinen und Anlagen definiert werden. Nach einer Erläuterung der Methode zur gekoppelten Betrachtung werden im nachfolgenden Kapitel alle relevanten Freiheitsgrade, Kenngrößen und Parameter erarbeitet. Anschließend wird der Aufbau und die Struktur der geplanten Abbildung mittels Support Vektor Maschinen beschrieben.

Zu einer gekoppelten Modellierung können prinzipiell die folgenden Ansätze betrachtet werden:

- Zur Kopplung der technischen Modelle untereinander werden alle physikalisch-chemischen Effekte und Teilprozesse, die mit gleichem numerischem Ansatz lösbar sind, in einem gemeinsamen Rechenmodell zusammengefasst und in nur einem Rechnernetz gegebenenfalls parallel gelöst. Ein Beispiel hierfür ist die allgemeine Transportgleichung, mit der sich die Vorgänge der Strömungsmechanik, Elektrodynamik, Wärmeleitung und dem Stofftransport beschreiben lassen. Die einzelnen Koeffizienten der allg. Transportgleichung können individuell und dynamisch im Programmcode auf das jeweilige Problem konfiguriert werden. Die Maxwell-Gleichungen stellen ein Beispiel für die Kopplung elektrischer und magnetischer Effekte dar.

Durch das gemeinsame Rechnernetz vereinfacht sich die Durchführung von Prozesskettensimulationen. Die Entwicklung von gemeinsamen Rechenmodellen auf technischer Ebene ist nicht Bestand dieser Arbeit.

- Die Modelle der Geschäftsprozesssimulation beruhen nicht auf Differenzialgleichungen, wie die meisten Prozessmodelle, sondern auf zeitdiskreten bzw. ereignisorientierten Ansätzen. Dennoch besitzen beide Simulationsansätze gemeinsame Prozesspara-

meter und somit Eingangs- und Ausgangsgrößen. Diese können als Schnittstellen genutzt werden (z.B. Prozesszeiten, Qualitätsdaten usw.).

Innerhalb dieser Arbeit wird das gekoppelte Modell mittels eines neuen Ansatzes zur ganzheitlichen Modellierung durch die vektorielle Abbildung aller betrachteten Kenngrößen in einem mehrdimensionalen Raum ermöglicht. Innerhalb des so geschaffenen mehrdimensionalen Raumes lassen sich dann Teilräume und Gebiete definieren, die den aktuellen Zustand des Fertigungssystems abbilden und mit deren Hilfe sowohl die technischen Prozesse als auch betriebsorganisatorische Abläufe bewertet werden können. Mittels einer intelligenten Klassifizierung des Gesamtraumes in Teilräume können einzelnen Zuständen (Räumen) gesamtzielführende Maßnahmen zugeordnet werden. Hierfür wird die Klassifizierung mittels Support Vektor Maschinen durchgeführt. Mittels der Support Vektor Methode lassen sich erfasste Daten (betrachtete Zielgrößen) im Hinblick auf resultierende Maßnahmen klassifizieren und so Maßnahmenräume definieren. Diese Methode erlaubt es, nicht nur die vorgegebenen Daten zu beschreiben, sondern durch eine gute Generalisierung können Prognosen für neue Beobachtungen und entsprechende Maßnahmen generiert werden.

Das gesamte Fabrikssystem (Produktion) $PS(t)$ lässt sich in Abhängigkeit von dem Fertigungssystem $FS(t)$, dem Ablaufsystem (Logistik) $LS(t)$ und der Zeit beschreiben zu

$$PS(t) = f(FS(t); LS(t)). \quad (6-1)$$

Das Fertigungssystem beinhaltet die beteiligten Maschinen $M(t)$, bzw. Anlagen und Prozesse $P(t)$

$$FS(t) = f(M1(t), M2(t), \dots, Mn(t); P1(t), P2(t), \dots, Pn(t)). \quad (6-2)$$

Das Logistiksystem enthält die Auftragsfolge $AF(t)$ pro Prozess und die entsprechenden Lager $LA(t)$:

$$LS(t) = f(AF1(t), AF2(t), \dots, AFn(t); LA1(t), LA2(t), \dots, LAn(t)). \quad (6-3)$$

Die einzelnen Prozesse und Maschinen lassen sich wiederum durch einzelne Parameter beschreiben. Die Auftragsfolge hängt von der Durchlaufzeit und der Liefertreue ab. Lagergrößen lassen sich in Abhängigkeit von der Durchlaufzeit, den Kapitalkosten und dem Platzbedarf beschreiben. Alle diese Parameter und Zielgrößen sind zeitvariabel.

Die Output-Größen werden hierbei zu diskreten Zeitpunkten nach jedem Prozessschritt, also ereignisorientiert, betrachtet. Somit kann zwischen den einzelnen Prozessschritten in das System eingegriffen und auf entsprechende Varianzen reagiert werden. Im nächsten Schritt wäre es weiter denkbar mittels In-Situ Messtechnik bereits während des Prozesses die Output-Größen zu erfassen und entsprechend anzupassen. Hierzu wäre eine kontinuierliche Betrachtung des Produktionssystems erforderlich.

Mit einem derartigen ganzheitlichen Modellansatz können die Wechselwirkungen zwischen den Abläufen auf technischer und organisatorischer Ebene aufgezeigt und berücksichtigt werden. Sowohl die technischen Toleranzen als auch die betriebsorganisatorischen Kennzahlen spannen über der Prozessfolge einen Toleranz- und Kennzahlenkanal auf (Bild 6-1), innerhalb dessen sich alle Output-Daten, wie z.B. Maß, Form, Lage, Rauheit, Welligkeit, Auslastung, Kapazität, Durchlaufzeit, und Liefertreue jedes Prozessschrittes bewegen sollten um so den geeigneten Input, wie z.B. die Prozessparameter und die Auftragsfolge für den Folgeprozess zu definieren.

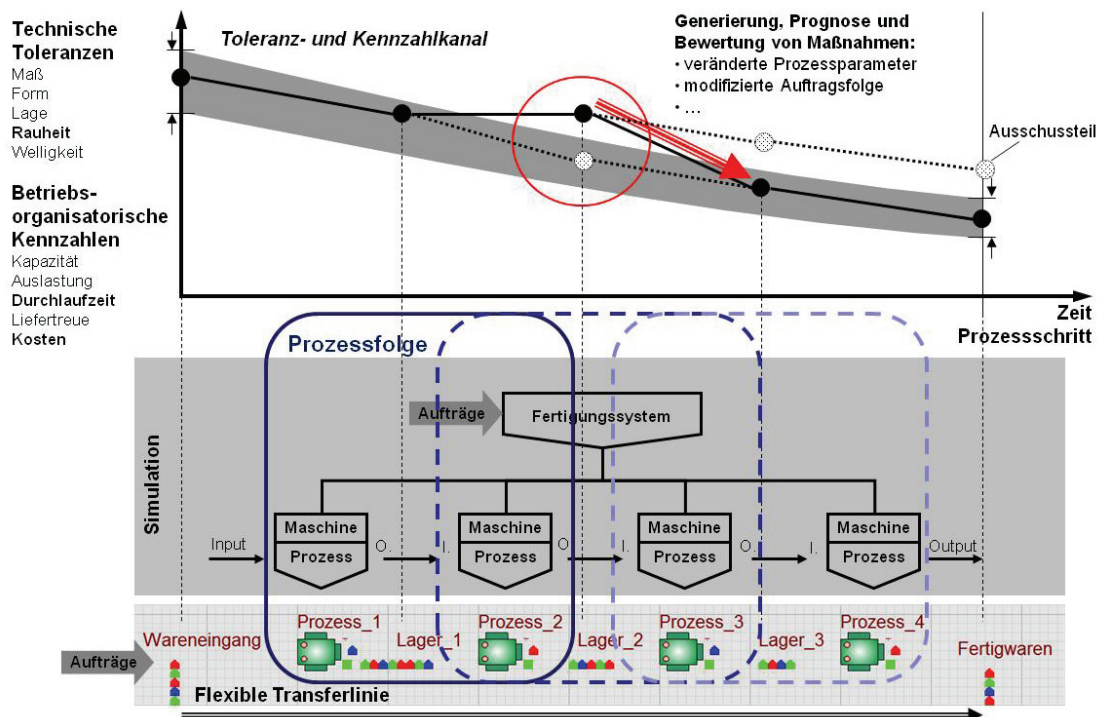


Abb. 6- 1 Nutzen einer gekoppelten Abbildung technischer und betriebsorganisatorischer Kennzahlen

Ziel des Fertigungssystems ist es mindestens nach dem letzten Prozessschritt (Fertigwaren) die geforderten Werte zu erfüllen. Weicht auf dem Weg dorthin eine Prozessfolge von diesen Vorgaben ab, können mit Hilfe des ganzheitlichen Modellansatzes entsprechende Maßnahmen, wie z.B. angepasste Prozessparameter oder eine veränderte Auftragsfolge, generiert und bewertet werden. Diese neuen Rahmenbedingungen wirken somit direkt auf den Prozess und steuern diesen wieder zurück in den Zielgrößenkanal.

Mit dieser Vorgehensweise lassen sich z.B. die Effekte der Prozessfähigkeit der einzelnen Fertigungsprozesse bereits im Vorfeld für neue Produkte und Varianten auf die Durchlaufzeit, Nacharbeitsraten und die resultierenden Stückkosten abbilden und mit Produkt- oder Prozessoptimierungen beeinflussen. Als Beispiel soll an dieser Stelle die Art des Angusses, also die Gestaltung der Einspritzöffnung beim thermoplastischen Spritzguss genannt werden. Dieser beeinflusst in hohem Maße zum einen die Formfüllung und Befüllungsdauer des Spritzgusswerkzeugs und zum anderen direkt die Eigenschaften des Produkts durch eine Ausrichtung der Moleküle in Fließrichtung. Durch einen gezielt auf die Befüllungsgeschwindigkeit bezogenen optimierten Anguss lassen sich kurze Prozesszeiten erreichen, was sich direkt auf die Kapazitätsplanung und den Materialfluss auswirkt. Auf der anderen Seite reduziert ein im Hinblick auf die im Werkzeug vorherrschenden Strömungsrichtungen beim Befüllen optimierter Anguss die Nacharbeitszeiten auf Grund der gesteigerten Produktqualität, was ebenfalls die Auslastung und den Materialfluss beeinflusst. Als weiteres Beispiel lässt sich das Elektronenstrahlschweißen von Blisk-Scheiben in der Verdichterfertigung für Flugzeugturbinen nennen. Durch den Einsatz einer verbesserten Strahlsteuerung kann hier die Qualität der Schweißnaht deutlich verbessert werden. Durch dieses neue Beam-Monitoring Verfahren werden aber die Prozesszeiten verlängert, was sich direkt auf die Kapazitätsplanung und den Materialfluss auswirkt. Auf der anderen Seite reduzieren sich die Nacharbeitszeiten auf Grund der gesteigerten Prozessqualität, was ebenfalls die Auslastung und den Materialfluss beeinflusst. Im operativen Einsatz lässt sich ein Beispiel aus dem Rapid Manufacturing nennen. Bei der Prozessfolge Lasersintern – Strahlspanen unterliegt die Zielgröße Rauheit im Lasersinterprozess einer starken Varianz. Durch Freiheitsgrade im anschließenden Strahlprozess kann diese Varianz ausgeglichen werden. Diese Freiheitsgrade wirken sich aber direkt auf organisatorische Zielgrößen aus, was z.B. zu einer Nichteinhaltung der Stückkosten oder der Durchlaufzeit führen würde (Abb. 6-2). Eine Generierung von IST-situationsangepassten Maßnahmen und eine entsprechende Anpassung der Prozessparameter des Folgeprozesses auf die

veränderten Rahmenbedingungen der Gesamtlinie mittels ganzheitlicher Prognose garantiert die Einhaltung der Zielgrößen Gesamtdurchlaufzeit, Produktqualität und Stückkosten.



Abb. 6- 2 Nutzen einer gekoppelten Modellierung am Beispiel der Prozessfolge Lasersintern - Kugelstrahlen

7 Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge

Langfristig verfolgt jedes Unternehmen das Ziel, Gewinne zu erwirtschaften. Aber auch die anderen Interessen aus Sicht der Kapitalgeber, der Mitarbeiter, des Kunden bzw. des Marktes und nicht zuletzt der Öffentlichkeit bestimmen die wesentlichen Leistungsziele. Sie stellen das Dreieck aus *Kosten*, *Qualität* und *Zeit* dar. Natürlich ist es in Bezug auf Rentabilität und Gewinn des Unternehmens extrem wichtig, die Kosten zu senken, aber insbesondere in den letzten Jahren wurden die Faktoren Qualität und Zeit immer bedeutender für die langfristige Erfolgssicherung eines Unternehmens [Westkämper2005_2].

7.1 Technische Zielgrößen

Technische Zielgrößen definieren die Eigenschaften eines Bauteils und können prinzipiell zwei Gruppen zugeordnet werden, der Grob- und der Feingestalt eines Werkstücks. Die Grobgestalt umfasst die Parameter Maß, Form und Lage, während zur Feingestalt Welligkeit und Rauheit gehören. Jedes Werkstück weist Abweichungen von der geometrisch idealen Gestalt auf, die durch Toleranzen eingeschränkt werden [DIN 4760]. Diese konstruktionsbedingten Maßgrößen bezeichnen eine zulässige Abweichung vom Nennmaß und geben die Differenz zwischen dem oberen und unteren Grenzmaß, der Toleranz (Toleranzfeld) an. Innerhalb einer Toleranz kann das Istmaß eines Werkstücks vom jeweiligen Nennmaß ohne Beeinflussung der Eigenschaften und Funktion abweichen. Neben diesen Fertigungstoleranzen müssen weiter Form- und Lagetoleranzen, mit deren Hilfe die fertige Gestalt eines Bauteils im Montage- und Funktionszusammenhang toleriert wird, Berücksichtigung finden.

7.2 Betriebsorganisatorische Zielgrößen

Betriebsorganisatorische Zielgrößen lassen sich als Interessensviereck mit den Eck- und somit Zielpunkten kurze Durchlaufzeit, hohe Kapazitätsauslastung, hohe Termintreue und niedrige Bestände an Materialvorräten und Sachanlagen zusammenfassen. Schon allein die Betrachtung der betriebsorganisatorischen Zielgrößen zeigt schnell, dass hier Abhängigkeiten bestehen, die eine Optimierung des Gesamtsystems erschweren.

Eine Terminuntreue eines internen oder externen Lieferanten verlängert direkt die Durchlaufzeit eines herzustellenden Produktes. Dies führt wiederum zu einer niedrigeren Kapazitätsauslastung der Produktionsanlagen und im Hinblick auf niedrige Bestände zu einem Bestandsnullpunkt, welcher einer Lieferverzögerung beim Endkunden hervorruft. Dieses vereinfachte Folgeschema macht schnell deutlich, dass Abweichungen einer der Zielgrößen erhebliche Hindernisse bei der Erfüllung der restlichen Zielgrößen bewirken können.

7.3 Zielkonflikt - Wirkzusammenhänge

Seit Mitte der achtziger Jahre gab es im Bereich der Qualitätssicherung bzw. des Qualitätsmanagements viele strukturelle Veränderungen. Zuverlässige Fertigungsprozesse und die Vermeidung von Fehlern durch geeignete Konstruktion und durch eine Optimierung der Produktionsprozesse bis zu „Null-Fehlern“ und minimalem Ausschuss haben zu einem sehr hohen Qualitätsniveau geführt.

Eine ähnliche Entwicklung ergibt sich heute bei den „Zeitzielen“. Die dynamischen Märkte verlangen immer kürzere Zeiten für die Entwicklung, die Fertigung und Auslieferung. Eine Just-in-Time-Lieferung und minimale Ressourcen und Umlaufbestände an Material im Unternehmen, sind ohne ein exaktes Einhalten der Liefertermine nicht denkbar.

Die Durchlaufzeit von Einzelteilen setzt sich aus verschiedenen Einzelzeiten zusammen und ist die Summe aus Vorbereitungs- und Organisationszeiten, Rüstzeiten, Prozesszeiten, Prüfzeiten, Transport- und Liegezeiten sowie Nebenzeiten, wie z.B. zum Verpacken, Beschriften, Etikettieren usw.

Die Durchlaufzeit ist in erster Linie von der Organisation der Abläufe im Unternehmen und von Kapazitäten und Auslastungen der betroffenen Bereiche im Unternehmen abhängig.

Eine dritte Zeitbetrachtung betrifft die Arbeits- und Prozesszeiten der Werkstücke. Auch dabei geht es um die Reduzierung der Zeiten für die einzelnen Arbeitsvorgänge mit Hilfe der besten Fertigungsverfahren.

Mit einer Verkürzung der Zeiten sinken die Kosten. Gleichzeitig besteht aber die Gefahr höherer Qualitätsverluste. Es ist oft auch so, dass eine höhere Qualität im Grundsatz zu längeren Zeiten und zu höheren Kosten führt. Hier wird noch einmal umso deutlicher, dass zur Bewertung von Maßnahmen innerhalb einer Fertigung nicht nur die Zeiten, sondern auch die er-

zeugte Qualität betrachtet werden muss. Eine gekoppelte Abbildung der technischen und betriebsorganisatorischen Zielgrößen stellt hierfür einen geeigneten Ansatz dar.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode wird anhand eines Prognosemodells für die Prozessfolge Lasersintern - Kugelstrahlen verifiziert. Die für dieses Modell erforderlichen Zielgrößen und deren Wirkzusammenhänge wurden bereits in Kapitel 5 ausführlich erarbeitet.

8 Das gekoppelte Prognosemodell

Voraussetzung für eine durchgängige Analyse und Optimierung der Produktion ist eine bereichsübergreifende Betrachtungsweise des gesamten Produktionsprozesses, um auf Basis der digitalen Prozessplanung, Produktionsmodellierung und Simulation bereits frühzeitig das Gesamtsystem begreifen zu lernen und optimieren zu können. Hierzu sind neue und erweiterte Planungs- und Modellierungsansätze und -werkzeuge erforderlich.

8.1 Grundstruktur des Modells

Wie zuvor dargestellt, ist die gegenwärtige Problematik für den Einsatz der Simulationstechnik die fehlende Durchgängigkeit der Betrachtungen, besonders bei der Abbildung von Prozessfolgen. Das Ziel des hier entwickelten Prognosemodells ist eine möglichst ganzheitliche Verknüpfung der verschiedenen Zielgrößen in einem Modell.

Ein wesentlicher Vorteil durch den Einsatz einer durchgängigen Modellierung ist allgemein betrachtet eine Qualitätsverbesserung der Planung und Steuerung und damit der Prozesse und des Produktes selbst. Die Fertigungs- und Logistikabläufe können prozessübergreifend analysiert und optimiert werden (Abb. 8-1).

Innerhalb dieser Arbeit sollen keine neuen Prozessmodelle, weder auf technischer noch auf organisatorischer Ebene, entwickelt werden. Ziel ist es vielmehr, durch einen geeigneten Modellansatz (Support Vektor Maschinen), eine ganzheitliche Modellierung technischer Toleranzen und betriebsorganisatorischer Kennzahlen zu entwickeln. Das so entstandene Prognosemodell soll die Lücke zwischen den technischen Prozessmodellen und den ereignisorientierten Ablaufmodellen schließen. Hintergrund dieses Ansatzes ist der in Abbildung 6-1 dargestellte Zielgrößenkanal. Betrachtet wird jeweils der Istzustand des Fertigungssystems für jede Prozessfolge nach dem ersten Prozessschritt. Neben den Qualitätsmerkmalen des erzeugten Bauteils (technische Toleranzen) werden auch betriebsorganisatorische Kenngrößen wie Zeiten und Kosten erfasst und mit in die Bewertung einbezogen. Diese Daten können im operativen Bereich direkt insitu in der realen Fertigung erfasst oder in der Planung mittels Simulationsmodellen auf Prozess- und Logistikebene generiert werden.

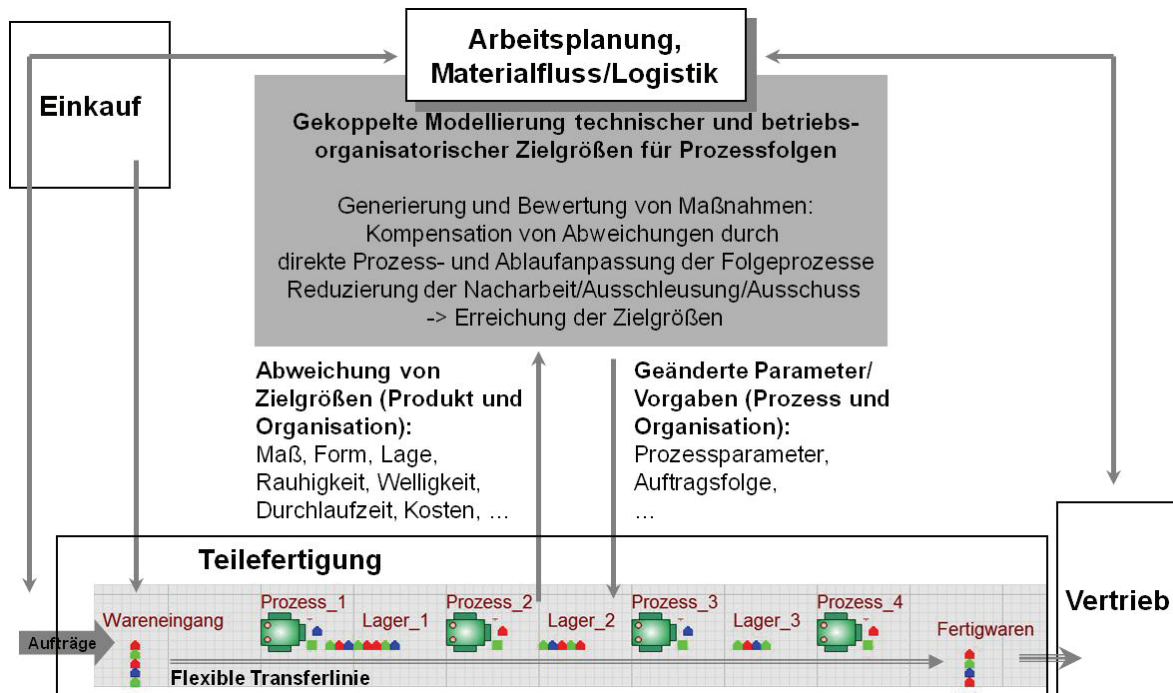


Abb. 8- 1 Einsatz und Nutzen der gekoppelten Betrachtung

Das in dieser Arbeit entwickelte ganzheitliche Modell auf Basis der künstlichen Intelligenz der Support Vektor Maschinen klassifiziert die erfassten Kenngrößen in ihrem Gesamtzusammenhang. Es ordnet den aktuellen Prozessfolgenzustand einer Klasse zu, welche diesen im Hinblick auf die Gesamtzielgrößen, also dem Endergebnis bewertet. Diesen Klassen sind wiederum Maßnahmen für die Folgeprozesse zugeordnet, welche zur Erreichung der Gesamtzielgrößen erforderlich sind. In Abbildung 8-2 ist diese Grundlogik des gekoppelten Prognosemodells graphisch dargestellt.

Die Eingangsgrößen des Modells stellen sowohl die betrachteten Qualitätsmerkmale des zu fertigen Produkts, als auch betriebsorganisatorischen Kennzahlen des Fertigungssystems dar. Das Modell bewertet auf Grund dieser Informationen den aktuellen Istzustand des Fertigungssystems und generiert Maßnahmen für den Folgeprozess der Prozessfolge zur Erreichung der Gesamtzielgrößen nach Fertigstellung des Produkts. Basis für die Zuordnung einer Maßnahme ist das dem Modell mittels Lerndaten antrainierte Prozesswissen und Verständnis der Wirkzusammenhänge. Sich ändernde Rahmenbedingungen können jederzeit durch erneutes Trainieren des Modells implementiert werden. Ist bei der Betrachtung von Grenzbereichen eine auf den Spezialfall angepasste Feinjustierung des Modells erforderlich, so kann diese auch durch eine manuelle Modifikation des Modells realisiert werden.

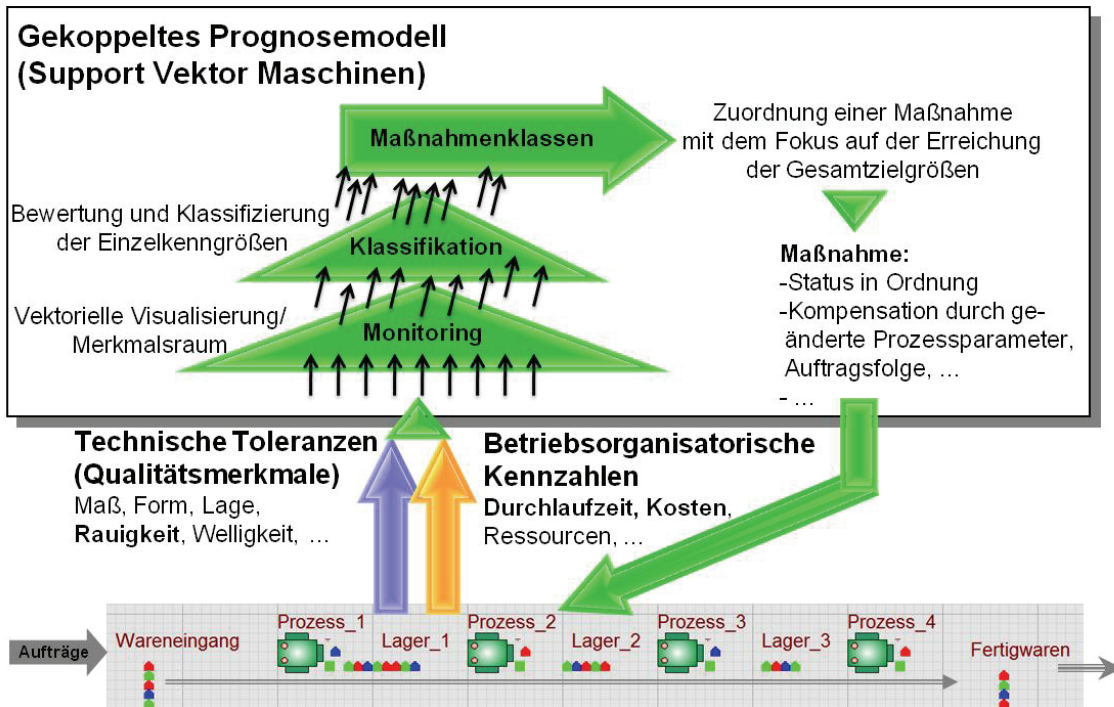


Abb. 8- 2 Grundlogik des gekoppelten Modells

Der Kern dieses Modells ist die Support Vektor Methode. Deren mathematischen Hintergrund, aktuelle Einsatzgebiete sowie der in dieser Arbeit entwickelte methodische Einsatz in der Fertigung wurden bereits behandelt. Im Folgenden wird nun ein Modell zur monetären Betrachtung erarbeitet und der Aufbau und die Struktur des Gesamtmodells dargestellt.

8.2 Methodischer Ansatz zur monetären Betrachtung

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell hat das Ziel, technische und betriebsorganisatorische Zielgrößen gekoppelt abzubilden. Zu den betriebsorganisatorischen Leistungszielen zählen die im Unternehmen anfallenden Kosten. Verlangt ein Fertigungssystem die Betrachtung des monetären Flusses und dessen Berechnung, stellt die Maschinenstundensatzrechnung hierfür ein geeignetes Werkzeug dar. Die Maschinenstundensatzrechnung findet ihr Anwendungsgebiet insbesondere dann, wenn in einer Kostenstelle unterschiedliche Maschinen zum Einsatz kommen. Beim Einsatz unterschiedlich kostenintensiver Maschinen mit unterschiedlicher Beanspruchung innerhalb der gleichen Kostenstelle würde das Arbeiten mit einem einzigen Gemeinkostenzuschlagsatz, berechnet aus dem Verhältnis aller Fertigungsgemeinkosten und den Fertigungslöhnen, zu einem nicht erwünschten „kalkulatorischen Ausgleich“ führen.

Folglich werden bei der Maschinenstundensatzrechnung die maschinenabhängigen Kosten von den Fertigungsgemeinkosten getrennt. Auf die Kostenträger können somit die anfallenden Kosten entsprechend der Inanspruchnahme der Maschine verrechnet werden.

Die Maschinenkosten setzen sich zusammen aus [Joos-Sachse 2006]:

1. *Kalkulatorische Abschreibungen* K_A . Diese ergeben sich aus dem Wiederbeschaffungswert und der voraussichtlichen Nutzungsdauer. Dabei ist der Wiederbeschaffungswert der geschätzte Preis, der aufgrund von Preissteigerungen, zum heutigen Zeitpunkt für die Maschine bezahlt werden muss. Die Nutzungsdauer der Maschine ist die Zeit, in der die Maschine betrieblich genutzt wird.
2. *Kalkulatorische Zinsen* K_Z sind Zinsen, die für das im Unternehmen gebundene Fremdkapital erwirtschaftet werden könnten.
3. *Instandhaltungskosten* K_I beinhalten Kosten für die Reparatur und Wartung zum Erhalt der Funktionsfähigkeit der Maschinen. Auch maschinenabhängige Betriebsstoffe, wie z.B. Schmierstoffe für die Zerspanung, gehören zu den Instandhaltungskosten.
4. *Raumkosten* K_R sind kalkulatorische Kosten und entstehen durch die Nutzung von Grund- und Nebenflächen durch die Maschine.
5. *Energiekosten* K_E . Dies sind Kosten die durch den Verbrauch von Strom, Gas, Benzin, Wasser usw. entstehen. Ermittelt werden die Kosten aus den Jahresdurchschnittswerten vergangener Jahre.

Die folgenden Formeln dienen zur Berechnung des Maschinenstundensatzes (MSS):

$$MSS = \frac{K_A + K_Z + K_I + K_R + K_E}{\text{Planbeschäftigung}} \quad (8-1)$$

Für die Berechnung der Planbeschäftigung, auch Nutzungszeit, muss die tatsächlich erreichbare Stundenzahl ermittelt werden, d.h.:

Kalendertage (365)

- (Samstage), Sonntage, Feiertage
- Urlaubstage, Krankheitstage
- = Tagesanzahl X * Arbeitsstunden pro Tag
- = Stundenanzahl Y
- x % Gemeinkostenzeiten durch Wartezeiten und Störungen
- = Planbeschäftigung (Nutzungszeit)

Die oben beschriebenen einzelnen Kosten lassen sich folgendermaßen ermitteln [Plinke 2006, Joos-Sachse 2006]:

$$K_A = \frac{\text{Wiederbeschaffungskosten}}{\text{Nutzungsjahre}} \quad (8-2)$$

$$K_Z = 0,5 * \text{Wiederbeschaffungskosten} * \text{Zinssatz} \quad (8-3)$$

$$K_I = \text{Wiederbeschaffungswert} * \text{Instandhaltungssatz} \quad (8-4)$$

$$K_R = \text{Flächenbedarf} * \text{Verrechnungssatz} * 12 \quad (8-5)$$

$$K_E = \text{Energiebedarf} * \text{Kosten je Energieeinheit} * \text{Leistungsausnutzung} \quad (8-6)$$

Die alleinige Berechnung des Maschinenstundensatzes ist bei gewünschter Betrachtung des Zusammenhangs zwischen qualitativ und quantitativ geforderten Zielgrößen, deren verursachten Kosten und dem Gewinn der Produktion, nicht zielführend. Somit bedarf es einer Kombination zwischen diesen Faktoren.

Die allgemein gültige betriebswirtschaftliche Formel:

$$\text{Gewinn} = \text{Erlöse} - \text{Kosten}$$

stellte die Basis der Überlegungen dar. Die Erlöse können hierbei noch aufgeteilt werden in:

$$\text{Erlöse} = \text{Stückzahl} * \frac{\text{Preis}}{\text{Stück}}$$

Wobei sich die Stückzahl in folgende Komponenten gliedert:

$$\text{Stückzahl} = \text{gefertigte Teile} - \text{Ausschussteile} - \text{Nachbearbeitungsteile}$$

Die Kostenzusammenhänge für ein Fertigungssystem sind in den in Abbildung 8-3 dargestellten Kreisläufen verdeutlicht.

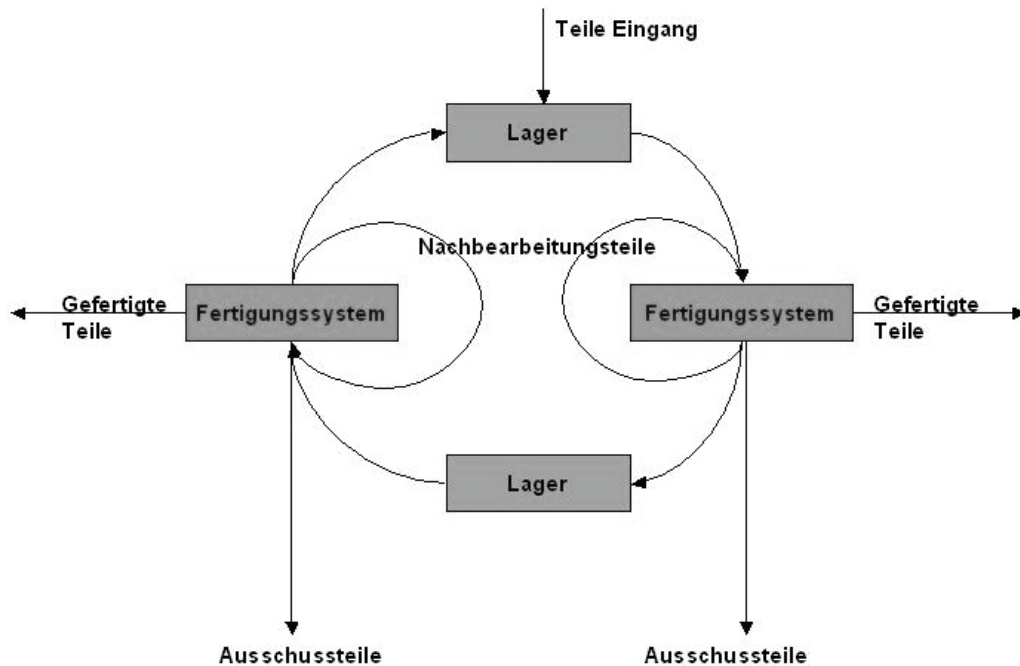


Abb. 8- 3 Gedankenskizze Kreisläufe im Fertigungssystem

Aus obiger Abbildung wird deutlich, dass die Kosten in einem Produktionssystem durch die Fertigungsanlagen, die Lager, der im Lager und Umlauf vorhandene Bestand, sowie durch den Transport der Teile zu/von den Lagern oder zu/von den Fertigungseinrichtungen, verursacht werden. Bei der Aufstellung der Kosten wird der zuvor beschriebene Maschinenstundensatz (Gleichungen 8-1 bis 8-6) aktiv. Die Kosten setzen sich somit folgendermaßen zusammen:

$$\begin{aligned} \text{Kosten} &= \text{Maschinenkosten} \\ &+ \text{Lagerkosten} \\ &+ \text{Transportkosten} \\ &+ \text{Bestandskosten} \end{aligned}$$

Mit M: Maschine, L: Lager, T: Transport und B: Bestand zu:

$$\begin{aligned}
\text{Kosten} = & \left[\frac{K_{AM} + K_{ZM} + K_{RM} + K_{EM} + K_{IM}}{\text{Plannutzungszeit}} \right] \\
& + \left[\frac{K_{AL} + K_{ZL} + K_{RL} + K_{EL} + K_{LL}}{\text{Plannutzungszeit}} \right] \\
& + \left[\frac{K_{AT} + K_{ZT} + K_{RT} + K_{ET} + K_{IT}}{\text{Plannutzungszeit}} \right] \\
& + [K_{AB} + K_{ZB}]
\end{aligned} \tag{8-7}$$

Unter Berücksichtigung der Personalkosten erweitern sich die Maschinenkosten zu Anlagenkosten. Jeder einzelnen Maschine wird unter Berücksichtigung der zur Fertigung des Produkts an der Maschine nötigen Arbeitszeit, hier Plan-Nutzungszeit Personal , und der individuellen Qualifikation jeden Arbeiters, die Personalkosten zugerechnet. Die persönliche Qualifikation gibt eine Aussage über den Kosten pro Stunde, den ein Arbeiter an dieser Maschine verursacht. Daraus ergibt sich folgende neue Kostenformel:

$$\begin{aligned}
\text{Kosten} = & \left[\left(\frac{K_{AM} + K_{ZM} + K_{RM} + K_{EM} + K_{IM}}{\text{Plannutzungszeit}} \right) \right. \\
& \left. + (\text{Plannutzungszeit}_{\text{Personal}} * \text{Qualifikation}_{\text{Personal}}) \right] \\
& + \left[\frac{K_{AL} + K_{ZL} + K_{RL} + K_{EL} + K_{LL}}{\text{Plannutzungszeit}} \right] \\
& + \left[\frac{K_{AT} + K_{ZT} + K_{RT} + K_{ET} + K_{IT}}{\text{Plannutzungszeit}} \right] \\
& + [K_{AB} + K_{ZB}]
\end{aligned} \tag{8-8}$$

Die oben stehende Formel beinhaltet zugleich die Möglichkeit, die zuvor beschriebenen variablen logistischen Zielgrößen kurze Durchlaufzeiten, hohe Kapazitätsauslastung und niedrige Bestände, rechnerisch zu erfassen. So erhöhen sich beispielsweise die kalkulatorische Abschreibung und die kalkulatorischen Zinsen, wenn sich der Bestand in den einzelnen Lagern, wie Haupt- oder Zwischenlager erhöht. Dies geschieht aufgrund der Kapitalbindung. Noch nicht ausgelieferte Fertigteile verursachen für das Unternehmen Kosten, da sie noch keinen Erlös erwirtschaftet haben. Weiter liegen diese Teile im Lager, was zusätzlich Lagerkosten verursacht und über einen längeren Zeitraum den Verkaufswert des Produkts mindert.

8.3 Aufbau und Struktur des Gesamtmodells

In Kapitel 8.1 wurde bereits zum besseren Verständnis die prinzipielle Grundlogik des in dieser Arbeit entwickelten Modells erläutert. Nachdem in Kapitel 4 der notwendige mathematische Hintergrund zur Support Vektor Methode und in Kapitel 8.2 ein Ansatz zur monetären Bewertung des Fertigungssystems erarbeitet wurden, gibt dieses Kapitel einen zusammenfassenden Überblick über die Gesamtstruktur des ganzheitlichen Modellierungsansatzes und dessen Implementierung in ein Fertigungssystem. Zunächst zeigt Abbildung 8-4 die Anwendung und Übertragung der in Kapitel 8.1 vorgestellten Grundlogik auf ein Fertigungssystem.

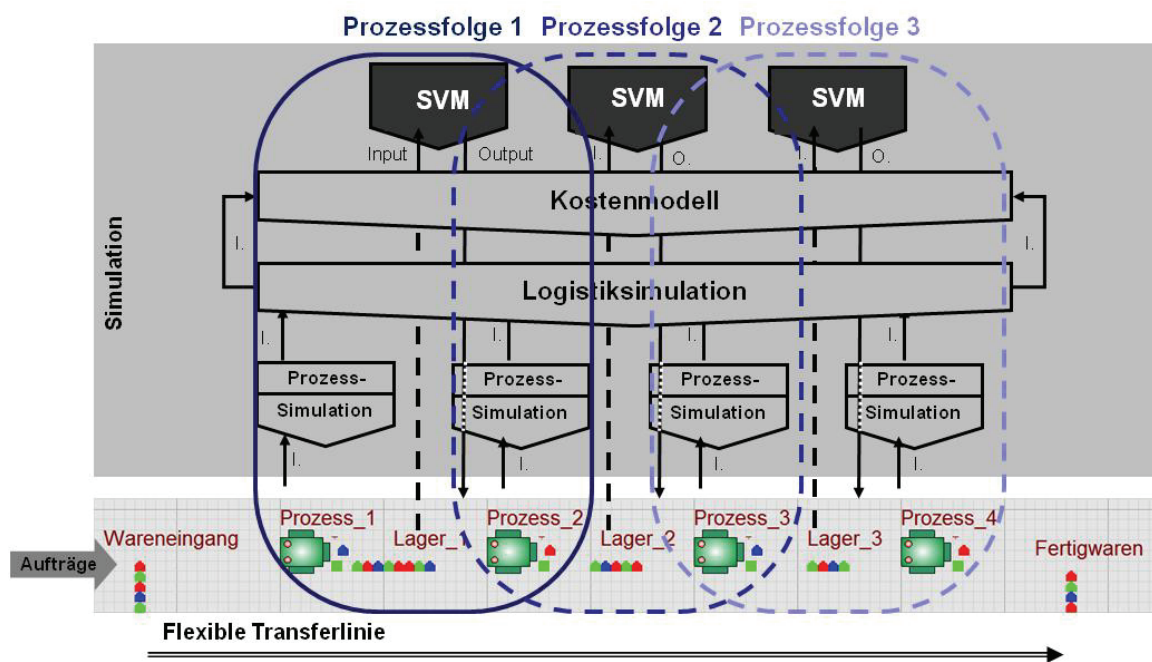


Abb. 8- 4 Grundlogik des Gesamtmodells

Für jede Prozessfolge innerhalb des Fertigungssystems wird ein Prognosemodell entwickelt und auf die entsprechenden Einzelprozesse mit ihren Parametern und Wirkzusammenhängen adaptiert. Neben der realen Linie sind hierin ebenfalls die Verknüpfungen zu den einzelnen Prozessmodellen, dem Logistikmodell und dem Kostenmodell dargestellt. Zentrale Elemente stellen in dieser Gesamtstruktur die SVM-Modelle dar. In ihnen laufen alle Einzelinformationen der jeweiligen Prozessfolge zusammen und bilden die Basis für eine ganzheitliche Klassifizierung. Alle betrachteten Merkmale werden im SVM-Modell gekoppelt betrachtet und bewertet. Nur so lässt sich der aktuelle Istzustand im Hinblick auf die Gesamtzielsetzungen bewerten, klassifizieren und Maßnahmen zuordnen. Support Vektor Maschinen erlauben einen permanenten Lernprozess und ermöglichen so eine stete Anpassung an Änderungen im Ferti-

gungssystem. Änderungen im realen Prozess, neue Erkenntnisse aus den Prozesssimulationen der einzelnen Fertigungsprozesse, Veränderungen im Fabriklayout, Modifikationen der Logistikabläufe oder der Organisation fließen direkt bzw. über die Logistiksimulation in das SVM-Modell ein. Das an diesen Input gekoppelte Kostenmodell liefert angepasste Kostenwerte.

Im Folgenden wird eine detailliertere Beschreibung zum Aufbau und der Anwendung der gekoppelten Simulation mittels der Support Vektor Methode anhand einer Prozessfolge durchgeführt. Diese ist in Abbildung 8-5 dargestellt.

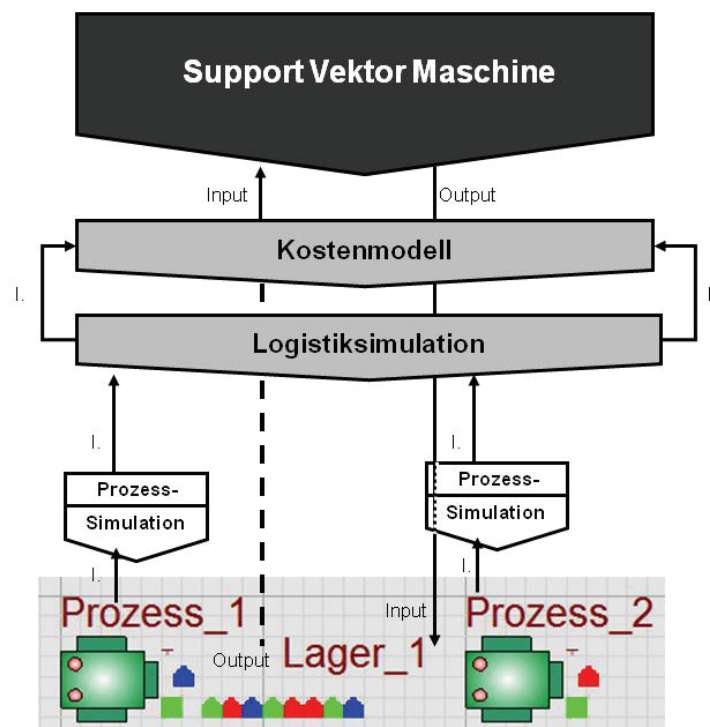


Abb. 8- 5 Modellstruktur für eine Prozessfolge

Basis für die hier erarbeitete ganzheitliche Modellierung mittels SVM sind Lerndaten. Mittels dieser Daten ermittelt das Modell die entsprechenden Klassengrenzen. Den einzelnen Klassen sind wiederum die entsprechenden Maßnahmen zugeordnet. Diese Basisdaten können sowohl aus der realen Prozesskette, als auch aus den Prozess- und Logistiksimulationen stammen. Das ganzheitliche Simulationsmodell auf SVM-Basis bietet somit, wie bereits in Kapitel 6 diskutiert, sowohl Einsatzmöglichkeiten in der Arbeits- und Prozessplanung, als auch im operativen Betrieb zur Steuerung der Fertigung.

Im Umfeld der Arbeits- und Prozessplanung werden die für die geplanten Produkte notwendigen Arbeitspläne und auf Basis des Produktionsprogramms und der vorhandenen Ressourcen

die Fertigungsaufträge erstellt. Anhand von Simulationsmodellen der technischen Prozesse, lassen sich die Prozessparameter für jeden Einzelprozess hinsichtlich der geforderten Qualitätsmerkmale optimieren. Ablauf- und Logistiksimulationen liefern wiederum, basierend auf diesen Prozesszeiten, ein entsprechendes Linienlayout mit den benötigten Lager- und Transportelementen, sowie deren Dimensionen und resultierenden Durchlaufzeiten. Hierbei wird jeder Einzelprozess für sich sowie die logistischen Abläufe ohne Betrachtung der technischen Prozesse optimiert. Wirkzusammenhänge und Potentiale die sich aus einer ganzheitlichen Betrachtung der Fertigungslinie ergeben, können bisher nicht untersucht und für eine Gesamtoptimierung herangezogen werden. Das in dieser Arbeit entwickelte Konzept schließt diese Lücke. Alle betrachteten Kenngrößen der jeweiligen Prozessfolge fließen im SVM-Modell zusammen und werden ganzheitlich bewertet (Abbildung 8-6).

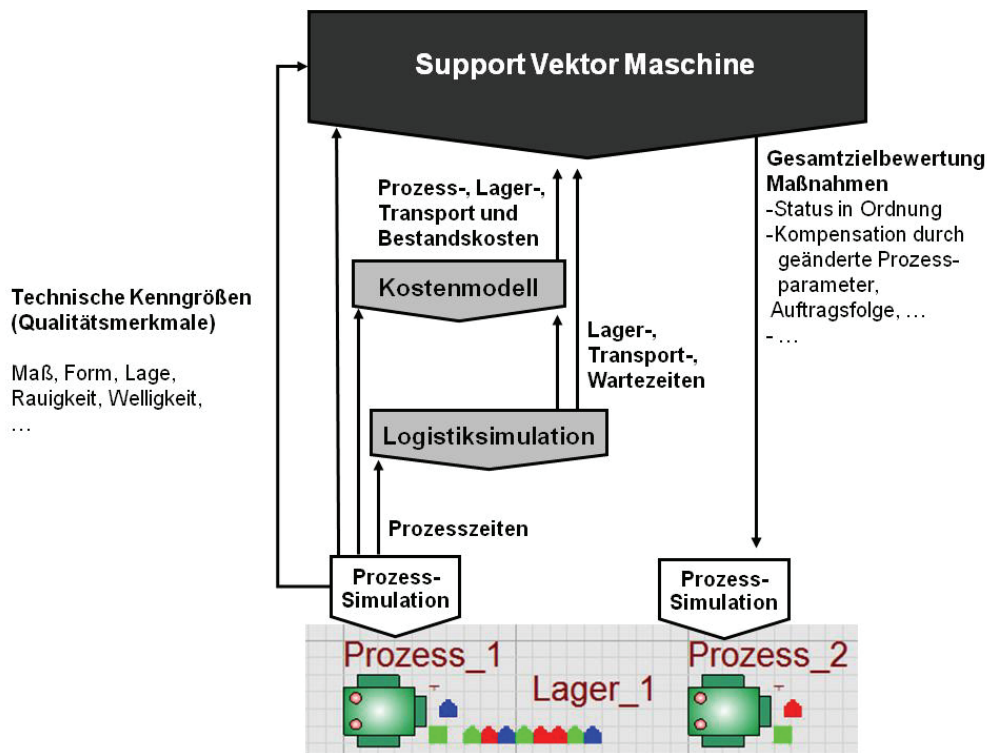


Abb. 8- 6 Detaillierter Modellaufbau in der Arbeits- und Prozessplanung

Die einzelnen Prozesssimulationen liefern zum einen als Ergebnisse die simulierten Qualitätsmerkmale, also technischen Kenngrößen, zum anderen die hierfür als Eingangsgrößen angesetzten Prozesszeiten. Die technischen Kenngrößen fließen direkt in das SVM-Modell, während die Prozesszeiten auch in der Logistiksimulation und im Kostenmodell verarbeitet werden. Das Logistikmodell ermittelt hieraus entsprechende Lager-, Transport- und Wartezeiten, die sowohl in das SVM-Modell, als auch in das Kostenmodell einfließen. Die im Kos-

tenmodell errechneten Prozess-, Lager-, Transport- und Bestandskosten werden schließlich ebenfalls im SVM-Modell erfasst und alle betrachteten Kenngrößen ganzheitlich bewertet. Auf diese Weise klassifiziert das SVM-Modell den aktuellen Istzustand und ordnet dem Folgeprozess entsprechende Maßnahmen zu.

Im operativen Einsatz kommen die erfassten Kenngrößen aus der Betriebsdatenerfassung direkt aus der Fertigung. Die Qualitätsmerkmale der einzelnen Bauteile werden nach dem Prozess messtechnisch erfasst und gehen als direkter Input in das SVM Modell. Die Prozess-, Lager-, Transport- und Wartezeiten werden ebenfalls in der Prozessfolge erfasst und fließen in das Modell. Das zwischengeschaltete Kostenmodell liefert die notwendigen Kostenwerte. Die Klassenzuordnung der Support Vektor Maschine stellt die zugeordneten Maßnahmen dem nachgelagerten Folgeprozess zur Verfügung. Abbildung 8-7 zeigt den operativen Einsatz der gekoppelten Simulation mit seinen Elementen und Informationsflüssen.

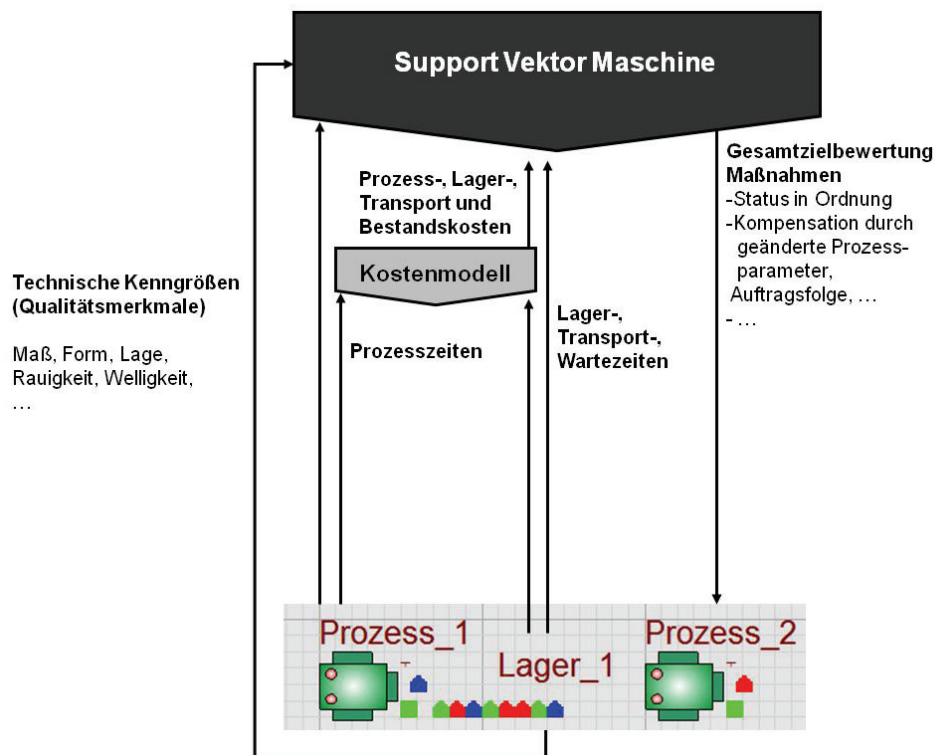


Abb. 8- 7 Detaillierter Modellaufbau für den operativen Einsatz

In der Praxis sind auch Mischformen aus den beiden beschriebenen Einsatzfällen möglich, in denen teilweise Daten in der realen Prozessfolge erfasst und teilweise simulativ bestimmt

werden. Das in diesem Kapitel prinzipiell vorgestellte Gesamtmodell wird nun im Folgenden beispielhaft an einer Prozessfolge umgesetzt.

8.4 Umsetzung und Anwendung des Konzepts anhand einer beispielhaften Prozessfolge aus dem Rapid Manufacturing

In dieser Arbeit wurde ein methodischer Ansatz zur ganzheitlichen Modellierung von technischen und betriebsorganisatorischen Kenngrößen für Prozessfolgen entwickelt. Der Kern dieses Konzepts bildet die Support Vektor Methode, die zur Klassifikation und somit Bewertung der Ist-Situation und Maßnahmengenerierung eingesetzt wird. Nach Zuordnung zu den entsprechenden Klassen können automatisiert Maßnahmen generiert werden. Weiter beinhaltet der Ansatz ein Kostenmodell zur monetären Betrachtung. Die Umsetzung und Verifikation des Konzepts soll im Folgenden anhand einer beispielhaften Prozessfolge des Rapid Manufacturing erfolgen. Hierzu wird der erarbeitete Ansatz auf die beispielhafte Prozessfolge adaptiert.

Der Begriff Rapid Manufacturing bezeichnet Methoden und Produktionsverfahren zur schnellen und flexiblen Herstellung von Bauteilen und Serien, mittels werkzeugloser Fertigung, direkt aus den CAD Daten. Verwendete Materialien sind Metalle, Keramiken und Kunststoffe. Rapid Manufacturing ist im Bereich der parallelen Herstellung von Mikrobauteilen aus Kunststoff bereits seit Mitte der 90er Jahre im Einsatz und wird für größere Bauteile u.a. in der Luftfahrt [Illston 2006; De Grange 2006] ebenfalls seit mehreren Jahren eingesetzt [Zäh 2006_1]. Neue Felder sind im Bereich der Dentalmedizin und der Hörgeräte Technik entstanden. Es kann als Weiterführung des Rapid Prototyping und Rapid Tooling bezeichnet werden. Nicht allein Muster, Prototypen und Vorserien werden im Rapid Manufacturing mittels generativer Fertigungsverfahren hergestellt, sondern vielmehr das Produkt für den Endkunden [Zäh 2006].

Die zuvor entwickelte allgemeingültige Methode zur ganzheitlichen Modellierung betriebsorganisatorischer und technischer Zielgrößen wird im Folgenden auf die Prozessfolge Lasersintern – Strahlspanen übertragen und beispielhaft umgesetzt.

8.4.1 Betrachtete technische Kenngrößen

Die Umsetzung des zuvor erarbeiteten und vorgestellten methodischen Ansatzes in einem Prognosemodell erfolgt innerhalb dieser Arbeit beispielhaft für die Prozessfolge Lasersintern – Strahlspanen (Kugelstrahlen). Für viele technische Anwendungen ist speziell die Be-

schaffenheit der Oberfläche von Bedeutung. Hierbei spielen bei lasergesinterten Bauteilen oft die Kenngrößen Rauigkeit und Härte eine entscheidende Rolle. Beide Kenngrößen unterliegen im Lasersinterprozess einer prozessbedingten Varianz. Als technische Kenngröße wird für die Verifikation des Prognosemodells die Oberflächenrauigkeit R_a betrachtet.

8.4.1.1 Modellbasis - technische Kenngrößen

Im Bereich des maschinellen Lernens, zu dem auch Support Vektor Maschinen gehören, bilden Trainingsdaten die Grundlage für das spätere Training dieser SVM. Dieses Kapitel zeigt die Ermittlung der technischen Kenngrößen aus realen Versuchen. Diese Daten bilden zusammen mit den betriebsorganisatorischen Kenngrößen die Datenbasis für das Training der SVM.

8.4.1.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Ermittlung der technischen Kenngrößen werden zunächst Versuchsproben mittels Lasersintern hergestellt. Im Anschluss wird die Oberflächenrauheit dieser Teile ermittelt (Messung 1). Die Bauteile werden nun mit drei unterschiedlichen Kugeldurchmessern und mit drei unterschiedlichen Strahlzeiten gestrahlt. In der abschließenden Messung 2 wird die Differenz zu den in Messung 1 ermittelten Werten bestimmt und dokumentiert. Abb. 8-8 zeigt schematisch die Vorgehensweise zur Ermittlung der technischen Kenngrößen.

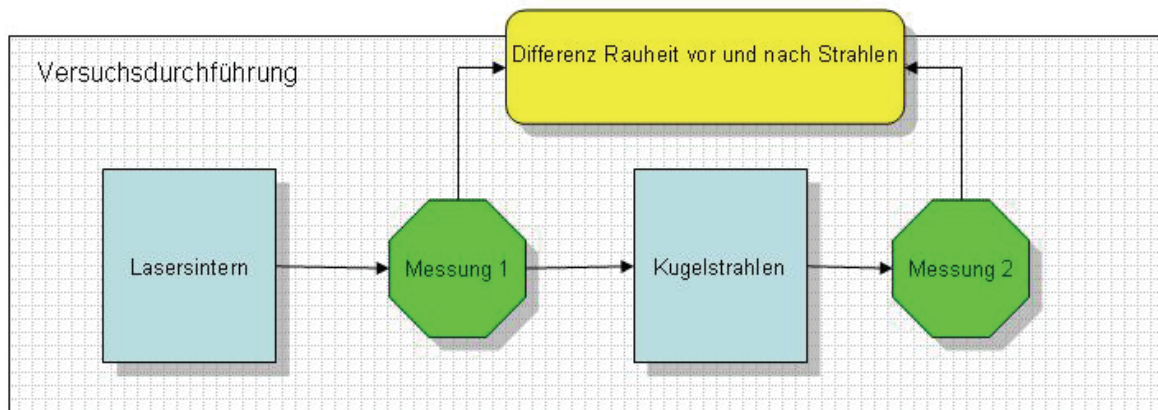


Abb. 8- 8 Vorgehensweise bei der Ermittlung der technischen Kenngrößen

Zur Herstellung der Versuchsproben kam die Lasersinteranlage EOSINT M 250 der Fa. EOS GmbH am Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) zum Einsatz (Abb. 8-9).



Abb. 8- 9 Lasersinteranlage EOSINT M 250 am IFF

Mit der Anlage lässt sich ein Baufortschritt von etwa 2 bis 20 mm³/s realisieren. Sie ermöglicht Schichtdicken zwischen 20 und 100 µm. Ferner besitzt sie einen 200 W Yb-Farblaser mit Präzisionsoptik (F-Thetalinse, Hochgeschwindigkeits-Scanner). Es können Scangeschwindigkeiten von bis zu 7 m/s mit einem variablen Fokussdurchmesser von 100 bis 500 µm erreicht werden. Die Leistungsaufnahme beträgt maximal 5,5 kW. Alle Versuchsproben wurden mittels derselben Parameter durch Lasersintern hergestellt.

Anschließend wurden die Oberflächenrauheiten der Bauteile bestimmt. Zur qualitativen Bestimmung der Oberflächenrauheit kommt im Rahmen dieser Arbeit das Tastschnittgerät Hommel Tester 8000 (Abb. 8-10) der Fa. Hommel am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) zum Einsatz.

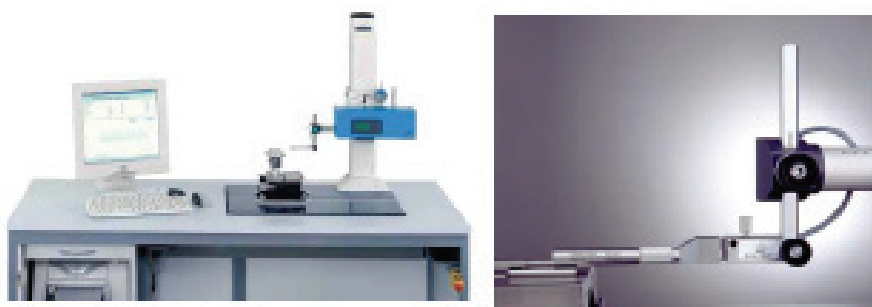


Abb. 8- 10 Tastschnittgerät: Hommel Tester 8000 am Fraunhofer IPA

Die Oberfläche wird dabei mit einer Tastspitze (Tastnadel) ertastet. Das Messgerät erfasst das Oberflächenprofil und berechnet die Kenngrößen. Digitale Tastschnittgeräte und seine Komponenten sind in der DIN 4772 definiert.

Das Messergebnis hängt stark von der geometrischen Ausführung der Tastnadel ab. Bei der Messung wurde das sog. Bezugsflächentastsystem bzw. das Einkufentastsystem verwendet, wie in Abb. 8-11 schematisch dargestellt.

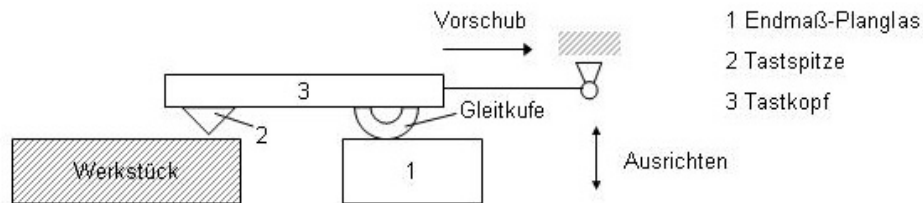


Abb. 8- 11 Messung der Oberflächenrauheit mittels Einkufentastsystem

Es ist durch ein Gelenk mit der Vorschubeinrichtung verbunden und stützt sich mit einer Gleitkufe auf der Werkstückoberfläche ab. Hierbei werden die Auslenkungen der Tastnadel induktiv aufgenommen. Durch diese Anordnung wird das Tastsystem hauptsächlich durch die Gleitkufe und in geringem Maße durch die Vorschubeinheit geführt [Pfeifer 1998]. Daher muss die Vorschubeinheit parallel zur zu prüfenden Oberfläche ausgerichtet werden. Der Vorteil dieser Ausführung ist ein sehr geringer Platzbedarf am Prüfling, wodurch auch die Prüfung kleiner Werkstücke möglich ist.

Abb. 8-12 zeigt schematisch eine Versuchsprobe in der Draufsicht. Gemessen werden die maximale Rautiefe R_{\max} , die gemittelte Rautiefe R_z , der Mittenrauwert R_a und die Rautiefe R_t in Längs- und Querrichtung der Probe.

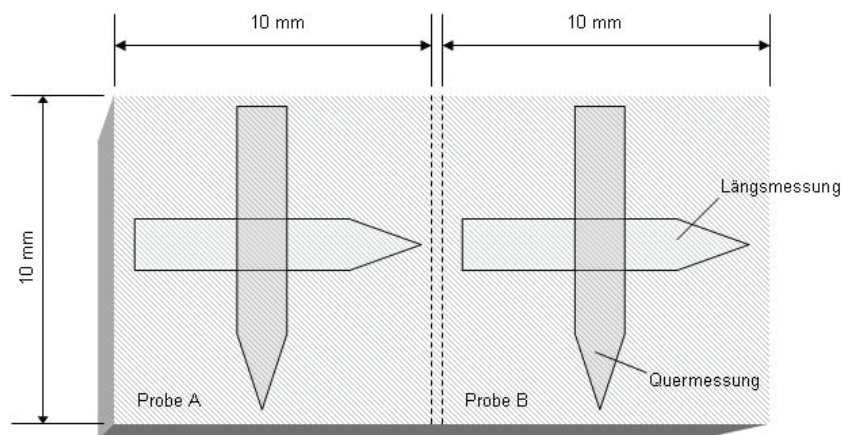


Abb. 8- 12 Schematische Darstellung der Versuchsprobe

Die folgende Abbildung zeigt die Streuung der ermittelten Oberflächenrauigkeit R_a [μm]. Da die vermessenen Proben alle mit identischen Prozessparametern gesintert wurden, zeigt das Diagramm deutlich die Varianz, der die Kenngröße Rauigkeit im Lasersinterprozess unterliegt.

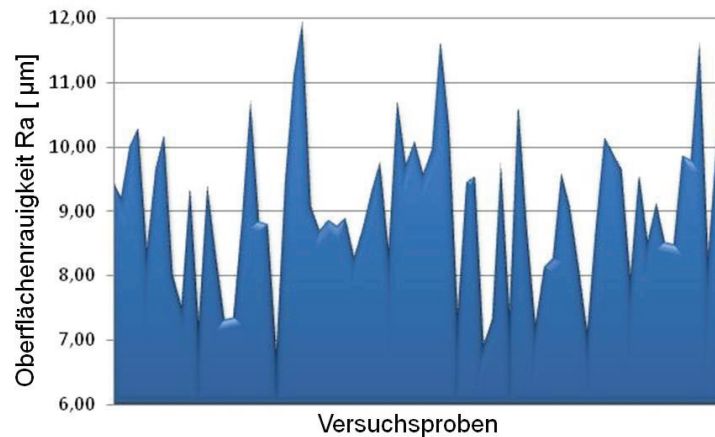


Abb. 8- 13 Varianz der Rauigkeit R_a [μm] der lasergesinterten Proben

Im Mittel wurde eine Oberflächenrauigkeit R_a von $9,09 \mu\text{m}$ erzeugt. Dies entspricht den in der Literatur angegebenen Werten für die verwendete Anlagentechnik und den verwendeten Werkstoff *Direct Metal 20 Bronze-Nickel* der Firma EOS von $9 \mu\text{m}$ [EOS 2004].

Die lasergesinterten Proben werden nach der ersten Rauheitsmessung mit Glasperlen unterschiedlichen Durchmessers und mit drei verschiedenen Strahlzeiten gestrahlt. Aufgrund der geringen Abmessungen der Proben kommt hierzu eine Mikrostrahlkabine für die Durchführung der Versuchsreihen zum Einsatz. Es wird hierfür die Strahlkabine MJ/S der Fa. Huber GmbH & Co. KG (Abb. 8-14) am IFF genutzt.

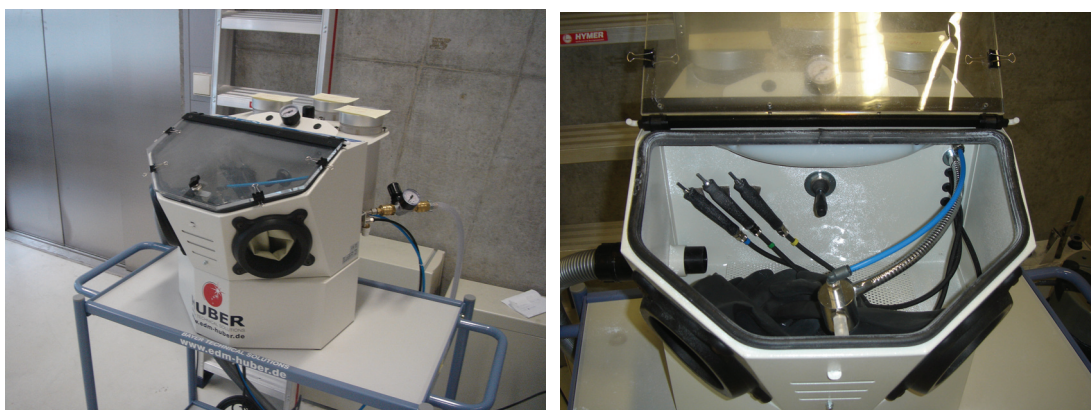


Abb. 8- 14 Kugelstrahlanlage MJ/S am IFF

Als Strahlmittel werden Glasperlen der Fa. Kuhmichel Abrasiv GmbH mit den drei Durchmesserklassen

- D1: 40 – 70 μm
- D2: 70 – 110 μm
- D3: 90 – 150 μm

verwendet.

Die Strahlzeit beträgt jeweils $T1 = 10\text{s}$, $T2 = 20\text{s}$, und $T3 = 60\text{s}$. Hieraus ergeben sich neun Strahlkombinationen:

- Kombination 1: T1 & D1
- Kombination 2: T2 & D1
- Kombination 3: T3 & D1
- Kombination 4: T1 & D2
- Kombination 5: T2 & D2
- Kombination 6: T3 & D2
- Kombination 7: T1 & D3
- Kombination 8: T2 & D3
- Kombination 9: T3 & D3

Bei neun Kombinationen und jeweils vier Versuchswiederholungen werden insgesamt 36 Proben benötigt um die Versuchsreihe zu komplettieren. Mit zwei Hälften je Probe sowie eine Längs- und eine Quermessung, ergeben sich 144 Messwerte für das anschließende SVM-Training. Im Anhang (A 2) sind die Messwertverteilungen für die jeweiligen Parameterkombinationen grafisch zusammengefasst. Aufgrund der Messgenauigkeit stehen für das SVM-Training 135 Werte zur Verfügung. Abb. 8-15 zeigt beispielhaft vier Versuchsproben. Die Proben sind von links nach rechts mit aufsteigender Strahlzeit bei gleichem Strahlgut angeordnet: ungestrahlt, 10s gestrahlt, 20s gestrahlt, 60s gestrahlt.

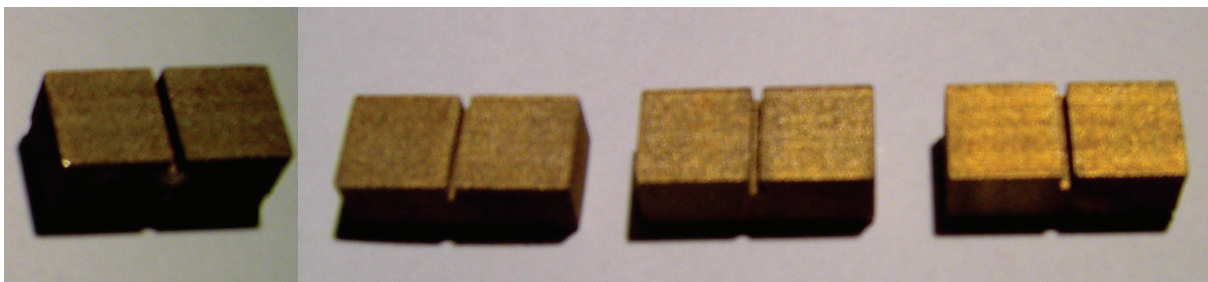


Abb. 8- 15 Beispiele für Versuchsproben

8.4.2 Betrachtete betriebsorganisatorische Kenngrößen

Auf betriebsorganisatorischer Ebene werden für die in dieser Arbeit betrachtete Prozessfolge die Durchlaufzeit sowie die Stückkosten je Bauteil untersucht. Im Hinblick auf die Prozessfolge Lasersintern - Strahlspanen zeigt Abbildung 8-16 die Aufteilung der gesamten Durchlaufzeit in jeweilige Nutzungs- bzw. Lager- oder Wartezeiten. Auf eine detaillierte Betrachtung der technisch bedingten Ausfallzeiten (Störungen, Wartung) sowie Beschäftigungszeiten des Personals (Schichtbetrieb, Pausen usw.) wird an dieser Stelle nicht eingegangen, ist aber rein technisch in das Modell integrierbar.

In der Prozessfolge Lasersintern und Kugelstrahlen müssen Bearbeitungszeiten, Nebenzeiten und ggf. Umrüstzeiten berücksichtigt werden. Zwischen beiden Prozessen werden die lasergesinterten Proben kurz zwischengelagert. Hierbei sind Transportzeiten zum Zwischenlager und zum Kugelstrahlprozess, sowie die Einlagerungszeit im Zwischenlager mit zu berücksichtigen.

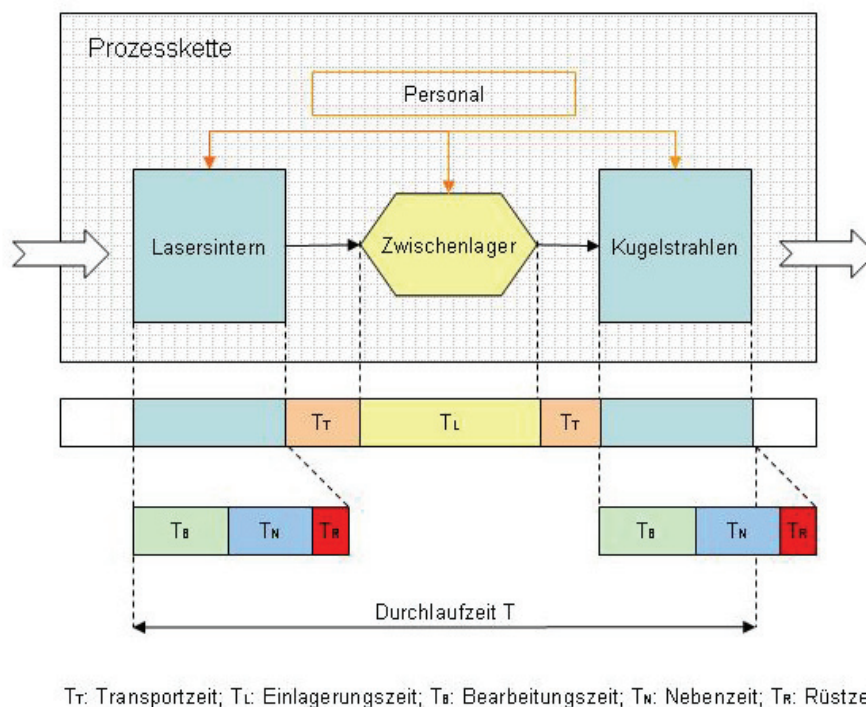


Abb. 8- 16 Schematische Darstellung der Prozessfolge mit den zeitlichen Kenngrößen

Da der Faktor Zeit einen erheblichen Einfluss auf den Kostenfaktor ausübt, stellt dieser die herausragende Kennzahl für die Rentabilität einer Prozesskette dar. Letztendlich gilt es, die Gesamtkosten für die Herstellung eines Produkts so niedrig wie möglich zu halten. Bezüglich der zu untersuchenden Prozessfolge sind die Kosten für das Lasersintern, die Lagerkosten, die Kosten für das Kugelstrahlen und natürlich die Personalkosten von großer Wichtigkeit im

Hinblick auf die Stückkosten für jedes einzelne Bauteil. Die Ermittlung der Kosten geschieht mittels des in Kapitel 8.2 erarbeiteten Kostenmodells.

8.4.2.1 Modellbasis - betriebsorganisatorische Kenngrößen

Betrachtet man die im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchende Prozessfolge, setzen sich die Gesamtkosten folgendermaßen zusammen:

$$\begin{array}{r}
 \text{Maschinenkosten der Lasersinteranlage} \\
 + \text{ Lagerkosten des Zwischenlagers} \\
 + \text{ Maschinenkosten der Kugelstrahlanlage} \\
 + \text{ Bestandskosten der hergestellten Proben} \\
 \hline
 = \text{ Gesamtkosten der Prozessfolge}
 \end{array}$$

Die Planbeschäftigung beträgt bei 220 Arbeitstagen im Jahr, 7 Arbeitsstunden pro Tag und 20 % Gemeinkostenzeiten, etwa 1509 Arbeitsstunden pro Jahr. Für die Maschinenstundensatzrechnung wird ein Zinssatz von aktuell etwa 3 % und ein Instandhaltungssatz von 2,5 % verwendet. Der Preis pro kWh Strom beträgt laut Angabe der EnBW 0,1942 € (Stand 03/2007). Die Leistung der Maschinen soll zu 100% ausgenutzt werden. Jede Maschine soll eine Nutzungszeit von 10 Jahren aufweisen. Damit ergeben sich folgende Maschinen- und Lagerkostensätze (detaillierte Darstellung im Anhang A 3):

- Maschinenkostensatz Lasersinteranlage : $MSS_{LS} = 33 \text{ €/h}$
- Lagerkostensatz Zwischenlager: $MSS_{LG} = 0,03 \text{ €/h}$
- Maschinenkostensatz Kugelstrahlanlage: $MSS_{KS} = 0,3 \text{ €/h}$

Die Kosten, die für die verschiedenen Kugelstrahlkombinationen anfallen, können über den Materialverbrauch und die Strahlzeit ermittelt werden.

Aus MSS_{KS} und den Kosten für jede Kugelstrahlkombination werden nun die Kosten zur Vervollständigung der Datenbasis für das SVM-Training ermittelt. Mit 1,50 € pro Kg Glasperlen, den drei verschiedenen Strahlzeiten und einem Materialverbrauch während der gesamten Versuchsphase von insgesamt 300 g Glasperlen D1, 350 g Glasperlen D2 und 400 g Glasperlen D1, ergeben sich die in Abb. 8-17 grafisch dargestellten Strahlkostensätze.

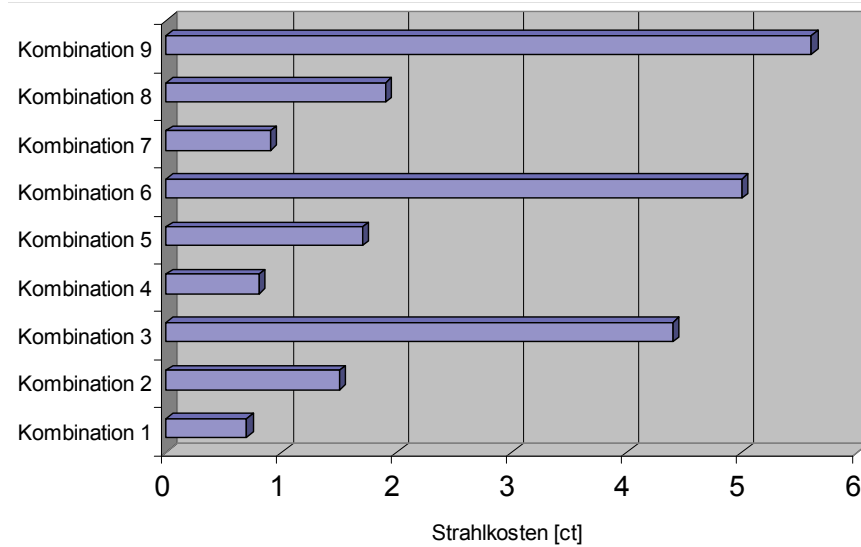


Abb. 8- 17 Kostensätze der einzelnen Strahlkombinationen

Aus Abb. 8-17 geht deutlich hervor, dass die längste Strahlzeit die höchsten Kosten verursacht. Die Kostenunterschiede der einzelnen Glasperlendurchmesser fallen im Vergleich deutlich geringer aus, als es bei den Strahlzeiten der Fall ist. Dies hängt damit zusammen, dass jede Durchmesserklasse die gleichen Materialkosten aufweist und die Verbrauchsunterschiede relativ gering ausfallen.

Die mit den Kosten vervollständigte Datentabelle (Anhang A 4) wird nun als Basis für das SVM-Training verwendet.

8.4.3 Der Gesamtaufbau

Für die Verifikation des Gesamtaufbaus wird im Folgenden eine virtuelle Prozessfolge (Lasersintern – Kugelstrahlen) aufgebaut und das in dieser Arbeit entwickelte Modell zur ganzheitlichen Modellierung integriert (Abb. 8-18). Im Wesentlichen besteht das Gesamtmodell aus den beiden Teilmodellen *SVM* (Yale) und der *Virtuellen Linie* (Witness). Das Witness-Modell beinhaltet eine Fertigungszelle „Lasersintern“ mit drei Lasersinteranlagen, einem Zwischenlager sowie eine Fertigungszelle „Kugelstrahlen“ mit einer Kugelstrahlanlage. Beide Modelle sind über das Zwischenlager miteinander verknüpft. Zum Simulationszeitpunkt, an dem die Bauteile das Zwischenlager verlassen, um zum Prozessschritt Kugelstrahlen zu gelangen, werden die Kenngrößen Rauheit, Durchlaufzeit und Stückkosten erfasst und an das SVM-Modell exportiert. Zur Ermittlung der Stückkosten wurde das erarbeitete Kostenmodell in das Witness-Modell integriert. Die trainierte SVM im Yale-Modell ermittelt durch Zuordnung der Datenvektoren eine Maßnahmenklasse und steuert mit den so definierten Prozesspa-

parametern den Kugelstrahlprozess im Witness-Modell. Im Folgenden wird auf die beiden Teilmodelle detaillierter eingegangen.

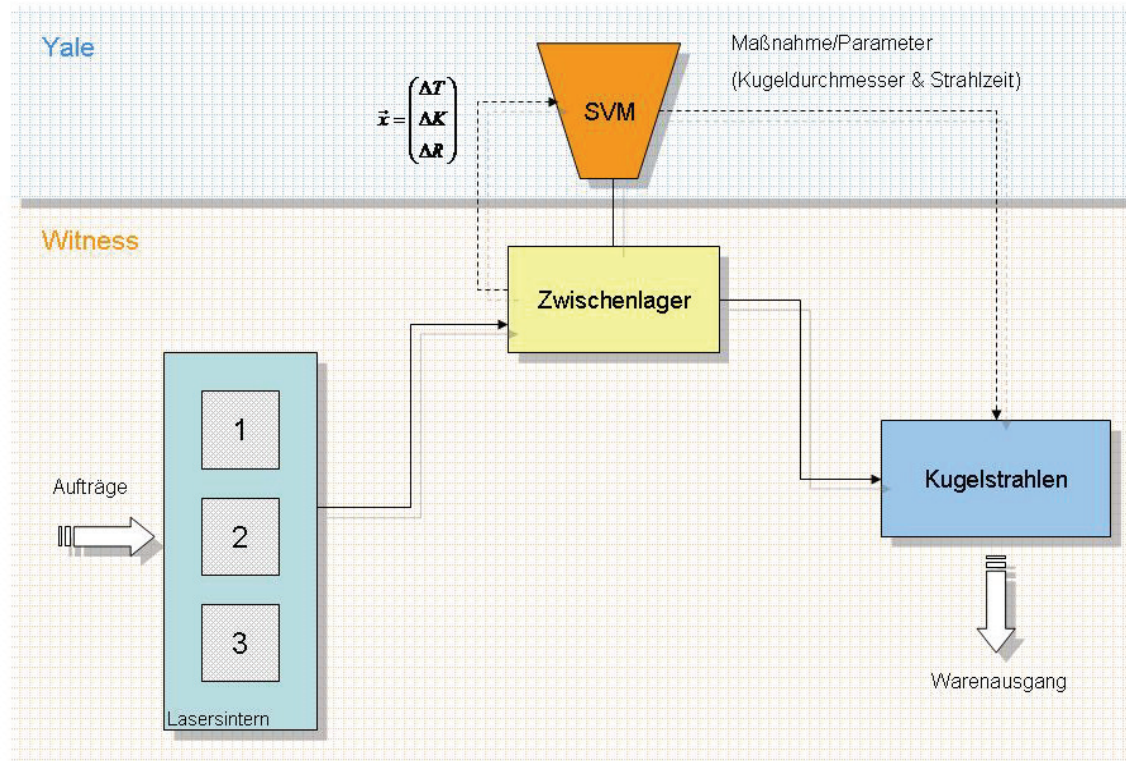


Abb. 8- 18 Gesamtmodell für die Prozessfolge Lasersintern – Kugelstrahlen

8.4.3.1 Das SVM - Modell

Das SVM - Modell wird mit Hilfe des Softwaretools Yale 3.4. erstellt. Das Training der SVM erfolgt mit den im realen Versuch ermittelten Rauigkeitsdifferenzen und Prozessparametern. Die Kosten werden mittels einer Maschinenstundensatzrechnung für jede Parameterkombination des Kugelstrahlens ermittelt. Abb. 8-19 zeigt schematisch, wie aus der Datenbasis über die Trennung mittels SVM ein Merkmalsraum aufgespannt und Merkmalsteilräume in Form von Klassen definiert werden. Durch die Prozessmerkmale ΔR_i , ΔT_i , ΔK_i wird ein dreidimensionaler Merkmalsraum aufgespannt, in dem die einzelnen Datenvektoren vom Ursprung aus in den Merkmalsraum hineinragen. Diese Vektoren definieren die jeweilige Klasse, welche die Maßnahmen für die Kugelstrahlparameter Strahlzeit und Kugeldurchmesser abbildet. Nach Abschluss der Trainingsphase kann auf diese Weise das SVM-Modell die Prozessparameter des Strahlprozesses, individuell bezogen auf den aktuellen Istzustand, für jedes Bauteil festlegen.

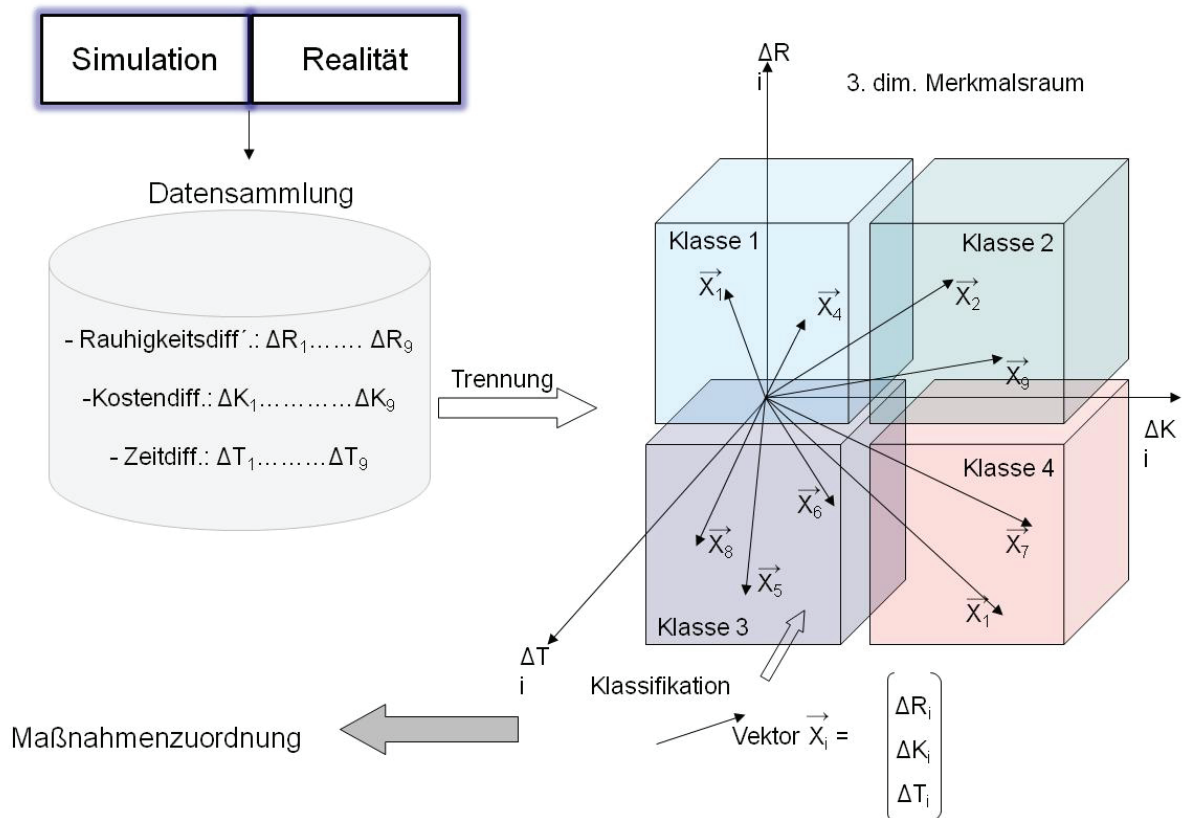


Abb. 8- 19 Schematischer Aufbau des SVM-Modells

Die Datensammlung (Anhang A 4) wird als so genannte „ExcelExampleSource“ in Yale 3.4 importiert. Die Klassifikation und Auswertung der Daten erfolgt auf Basis von LIBSVM, das von Chih-Jing Lin entwickelt wurde und vollständig in Yale 3.4 implementiert ist. LIBSVM ermöglicht bei der Multiklassifikation eine Klassifikation auf Basis der One-Against-One-Methodik (OAO). Diese Methodik ist der One-Against-All-Methodik (OAA) vorzuziehen, da sie die Trennung auf Basis gleichgroßer bzw. gleichwertiger Gruppen vollzieht (siehe auch Kapitel 4). Gerade bei einer größeren Anzahl an Gruppen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit erwartet wird, macht sich die Größe einer Klasse bemerkbar und kann durch den Einsatz von OAO vermieden werden [Monien 2005]. Aus diesem Grund fiel die Wahl des SVM-Learners auf LIBSVM.

Die Einstellungen im Bereich des LIBSVM-Learners beschränken sich bei der Verwendung einer Radial Basis Kernfunktion im Wesentlichen auf den Kernparameter γ und den Güteparameter C . Diese werden im Folgenden durch das Gridsearch-Verfahren für den hier behandelten Anwendungsfall und die vorliegende Datenbasis ermittelt.

8.4.3.1.1 Gridsearch - Ermittlung der optimalen Parameterkombination γ , C

Die Bestimmung der optimalen Parameter ist einer der wichtigsten Schritte für das SVM-Training im Hinblick auf das Klassifikationsergebnis. Um eine gute Prognosegüte zu erreichen, müssen die Parameter so bestimmt werden, dass sie eine hohe Trefferquote ermöglichen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden innerhalb des Gridsearch-Verfahrens die Werte für den Güteparameter C und den Kernparameter γ jeweils im Bereich von 0,001 bis 1000 variiert und die Trefferquote für jede Kombination aus C und γ ermittelt (Anhang A 5). Die höchstmögliche Trefferquote liegt hierbei bei 91% und kann mit mehreren Kombinationen erreicht werden (Abb. 8-20).

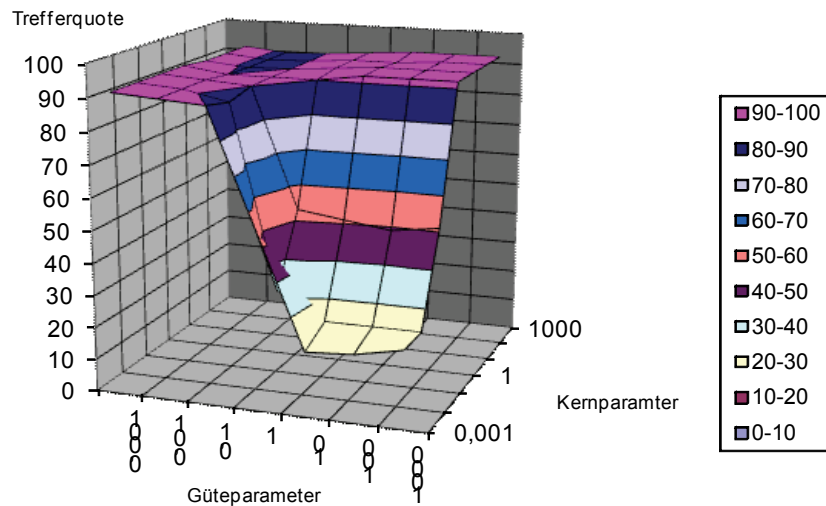


Abb. 8- 20 Darstellung der Trefferquoten in Abhängigkeit der Parameter γ und C

8.4.3.1.2 Auswertung der Ergebnisse des SVM-Modells

Abbildung 8-21 zeigt die Visualisierung der Trennebenen mit der Klassenzuweisung der einzelnen Datenvektoren in Yale 3.4. Diese Ergebnisse wurden mittels der Radialbasis-Kernfunktion mit $C = 0,001$ und $\gamma = 1000$ auf LIBSVM ermittelt. Zur Visualisierung wird der dreidimensionale Merkmalsraum mit seinen Vektoren und Trennflächen in den zweidimensionalen Raum projiziert. Diese Projektion kann man sich auch als Abwicklung einer Kugel in die Ebene vorstellen.

Die markierten Punkte stellen falsch klassifizierte Vektoren dar, die zur Ermittlung der Trefferquoten herangezogen werden. Aus dieser Darstellung lässt sich außerdem die Verteilung der Datenvektoren innerhalb der eigenen Klasse analysieren. Es zeigen sich wenige Bereiche auf, in denen Vektoren sehr nahe an der Trennebene oder sogar innerhalb dieser liegen. Für diese kann die Klassenzuweisung nicht eindeutig erfolgen. Da jede Klasse stellvertretend

eine Maßnahme der Kugelstrahlparameter darstellt, müssen diese Vektoren im Rahmen der sich anschließenden Verifikation genauer untersucht werden, um somit die genaue Klasse bzw. Kugelstrahlmaßnahme festzulegen.

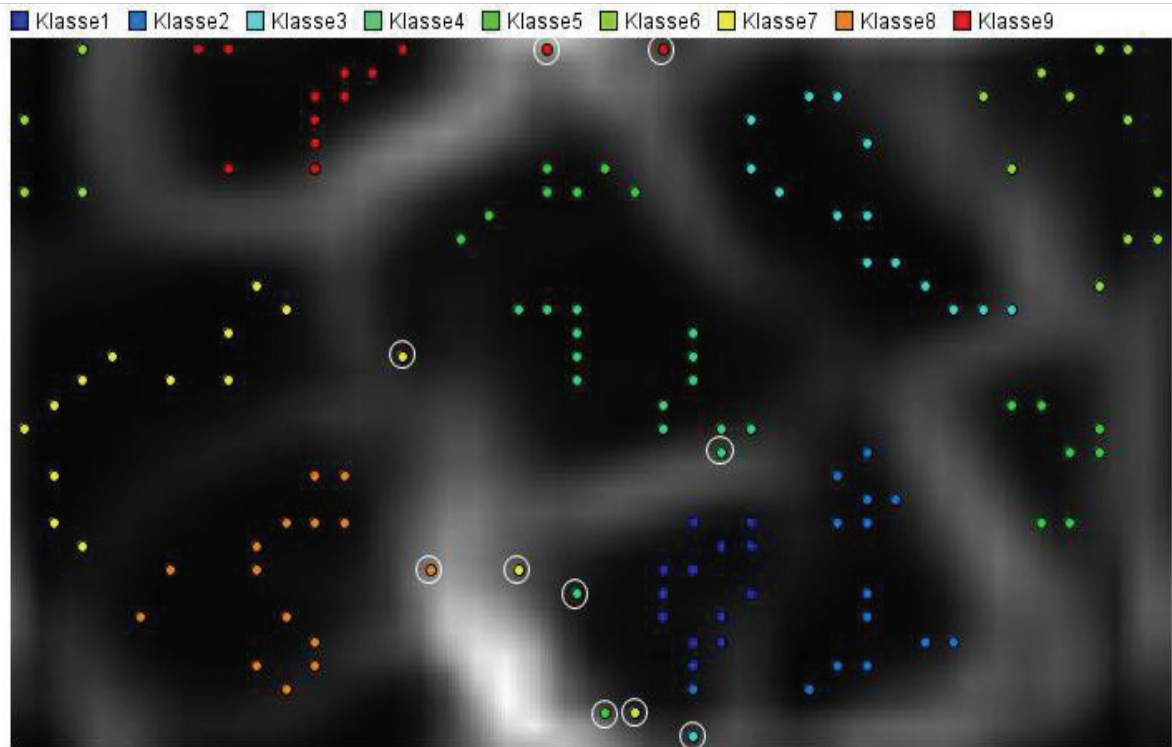


Abb. 8- 21 Visualisierung der Trennebenen und der Klassentrennung

Zur anschaulicheren Visualisierung im zweidimensionalen Raum sind in den folgenden Abbildungen jeweils zwei der betrachteten Kenngrößen einander gegenübergestellt und mit den in der SVM ermittelten Maßnahmenklassen farblich hinterlegt.

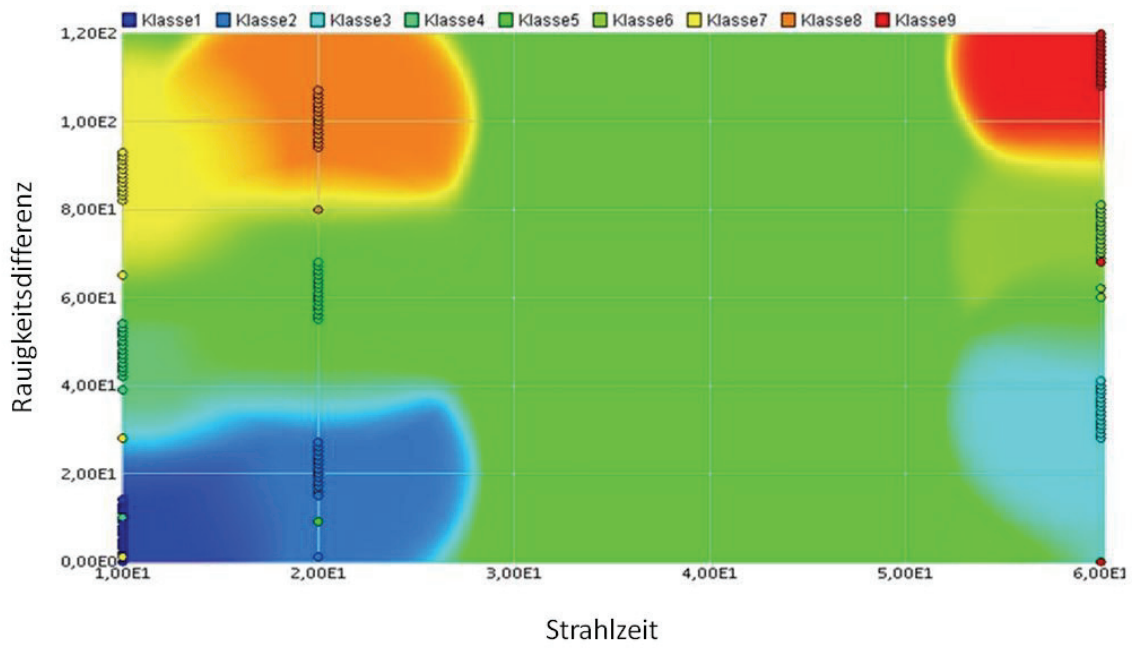


Abb. 8- 22 Klassenausprägungen der trainierten SVM: Rauheit - Zeit

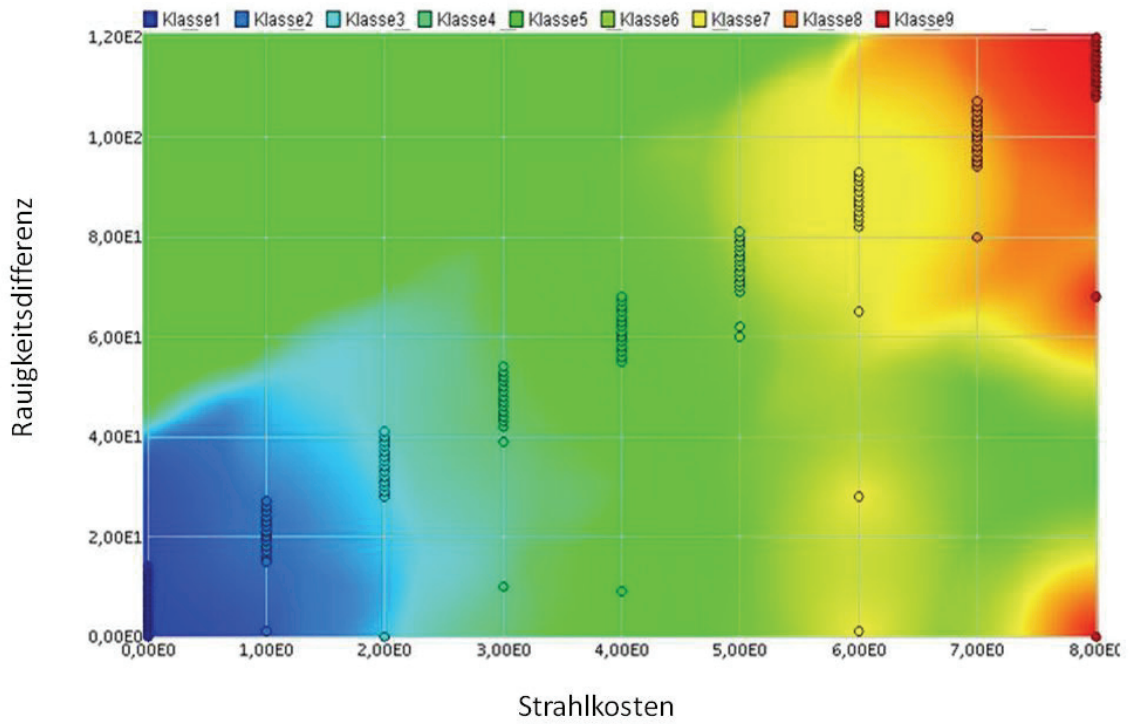


Abb. 8- 23 Klassenausprägungen der trainierten SVM: Rauheit – Kosten

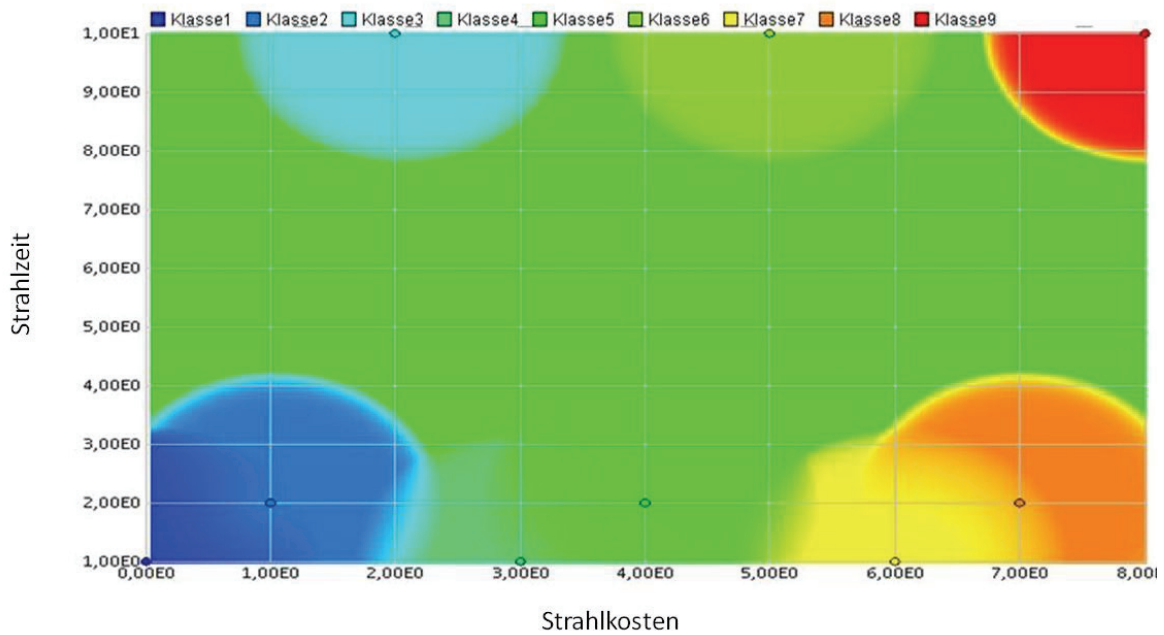


Abb. 8- 24 Klassenausprägungen der trainierten SVM: Zeit - Kosten

8.4.4 Das Gesamtmodell in „Witness“ – die virtuelle Prozessfolge

Der Gesamtaufbau zur Verifikation wurde als Simulationsmodell mit der Software „Witness“ der Fa. Lanner erstellt und bildet die beispielhaft im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Prozessfolge ab. Im ersten Schritt wird hierbei jedes einzelne Element der Prozessfolge definiert und mit den benötigten Informationen und Zusammenhängen versorgt. Abb. 8-25 zeigt zunächst die Kernelemente der Prozessfolge, wie sie in Witness aufgebaut wurde.



Abb. 8- 25 Darstellung der Kernelemente des Witness-Modells

Das gesamte Modell wird über das Einspeisen von Aufträgen gesteuert. Diese folgen einem hinterlegten Produktionsprogramm. Jeder Auftrag startet bei freien Kapazitäten automatisch den Produktionsablauf in der Fertigungszelle „Lasersintern“. Diese wird durch drei Lasersinteranlagen abgebildet. In Witness wird diese Fertigungszelle durch drei Mehrzyklusmaschinen definiert. Weiter steht ein Mitarbeiter zur Maschinenführung zur Verfügung, der zusätzlich die lasergesinterten Bauteile zum Zwischenlager und zur Strahlanlage transportiert. Jede Maschine arbeitet in folgenden drei Zyklen:

- Zyklus 1: Programmladen und Bauprozess starten (Mitarbeiter erforderlich)
- Zyklus 2: Bauprozess (ohne Mitarbeiter)
- Zyklus 3: Bauteileentnehmen und Anlage rüsten (Mitarbeiter erforderlich).

Entsprechende Bearbeitungs- und Rüstzeiten sind für jeden Zyklus hinterlegt. Zur Identifikation ist jedem Bauteil ein Attribut zugeordnet, welches die Teilenummer beinhaltet. Weiter besitzt jedes Bauteil die Attribute *Rauheit*, *Durchlaufzeit* und *Stückkosten*. Verlassen die Bauteile die Fertigungszelle Lasersintern wird der Attributwert *Rauheit* definiert. Hierzu ist in Witness eine Verteilung möglicher Rauheitswerte mit entsprechenden Wahrscheinlichkeiten und Parameterkorrelationen hinterlegt. Diese wurden zuvor experimentell ermittelt (siehe hierzu auch Abb. 8-13). Weiter wurde das in Kapitel 8.2 dargestellte Kostenmodell in Witness integriert, so dass die Stückkosten ebenfalls im Modell berechnet werden können. Sowohl die Berechnung der Stückkosten als auch der Durchlaufzeiten erfolgt im Witness-Modell automatisiert. Die entsprechenden Werte werden jedem Bauteil über seine Attribute mitgegeben. Die fertiggesinterten Bauteile kommen nun in das Zwischenlager. An dieser Stelle erfolgt die Kopplung zum SVM-Modell. Die Simulation stoppt. Der nächste Schritt besteht darin die Rauheitswerte, Durchlaufzeiten und Stückkosten bis zu diesem Zeitpunkt zu erfassen und mit den Sollwerten abzugleichen. Hieraus ergeben sich die Eingangsvektoren für das SVM-Modell. Ein Eingangsvektor setzt sich folgendermaßen zusammen:

Eingangsvektor:
$$x = \begin{pmatrix} \Delta R \\ \Delta K \\ \Delta T \end{pmatrix}$$

mit

$$|\Delta R| = R_{soll} - R_{ist} , \quad (8-9)$$

$$|\Delta K| = K_{soll} - K_{Laser \sin t.} - K_{Lager} - K_{Bes \tan d} , \quad (8-10)$$

$$|\Delta T| = DLZ_{soll} - DLZ_{ist} \quad \text{mit} \quad DLZ_{ist} = DLZ_{Laser \sin t.} + DLZ_{Lager} . \quad (8-11)$$

Aus dem SVM-Modell folgen auf Basis des Istzustands individuell für jedes Bauteil entsprechende Maßnahmen (Parameterkombinationen für den nachfolgenden Kugelstrahlprozess). Über ein weiteres Attribut *Maßnahmenklasse* sind diese Informationen anschließend jedem Bauteil im Witness-Modell hinterlegt. Bei der Ankunft der Bauteile in der Fertigungszelle Kugelstrahlen wird mit den vorgesehenen Parametern und Kostensätzen automatisiert in Witness weitersimuliert. Die Fertigungszelle Kugelstrahlen besteht aus einer Kugelstrahlanlage mit Rüst- und Bearbeitungsprozessen. Für alle Prozessschritte ist ein Mitarbeiter erforderlich. Im Modell ist hier der bereits oben für die Fertigungszelle Lasersintern erwähnte Mitarbeiter verknüpft (Mehrmaschinenbedienung). Die Rüst- und Bearbeitungszeiten sowie die Kostensätze sind als Variablen im Modell hinterlegt und werden über das Bauteilattribut *Maßnahmenklasse* gesteuert.

Die fertigbearbeiteten Bauteile werden in den Warenausgang befördert. An dieser Stelle können nun die Stückkosten für jedes Bauteil sowie die Gesamtdurchlaufzeit abgefragt und mit den Soll- bzw. Zielwerten verglichen werden. Die Verifikation des Gesamtmodells wird nun im Folgenden anhand dieses Gesamtaufbaus mit 20 Testbauteilen aufgezeigt.

8.4.5 Verifikation des Gesamtmodells

Die Verifikation des in Kapitel 8.3 vorgestellten Gesamtmodells erfolgt mittels 20 Testdatenvektoren. Zunächst wurden Referenzläufe ohne eine Kopplung zum SVM-Modell simuliert und ausgewertet. Da die im Modell realisierte Varianz über Zufallszahlenreihen gesteuert wird, können über mehrere Läufe hinweg vergleichbare Ergebnisdaten erzeugt werden. Auf diese Weise wird ein identischer Simulationslauf (Rahmenbedingungen) mit und ohne SVM-Modell und somit eine Vergleichbarkeit gewährleistet.

Im SVM-Modell werden diesen Testdatenvektoren Maßnahmenklassen für die Kugelstrahlparameter Strahlzeit und Kugeldurchmesser (Strahlkombinationen) anhand der trainierten SVM mit Yale 3.4 zugeordnet (Abb. 8-26).

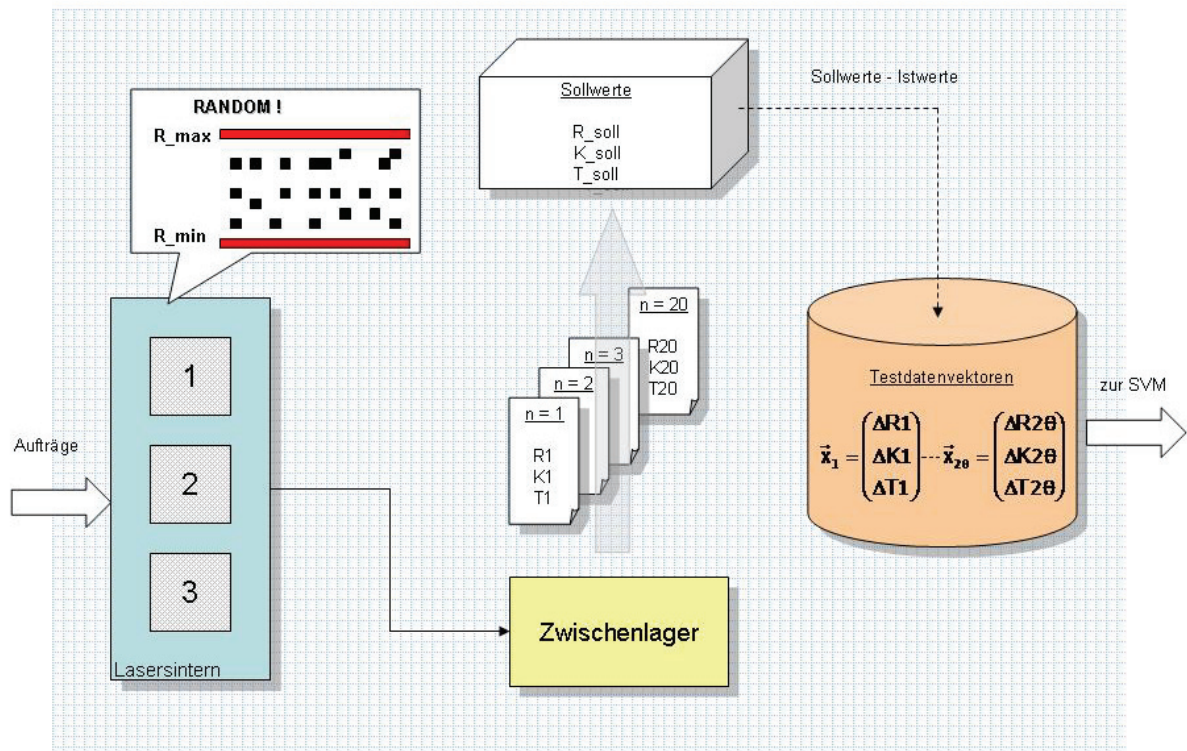


Abb. 8- 26 Gesamtaufbau zur Verifikation - Ermittlung Testdatenvektoren

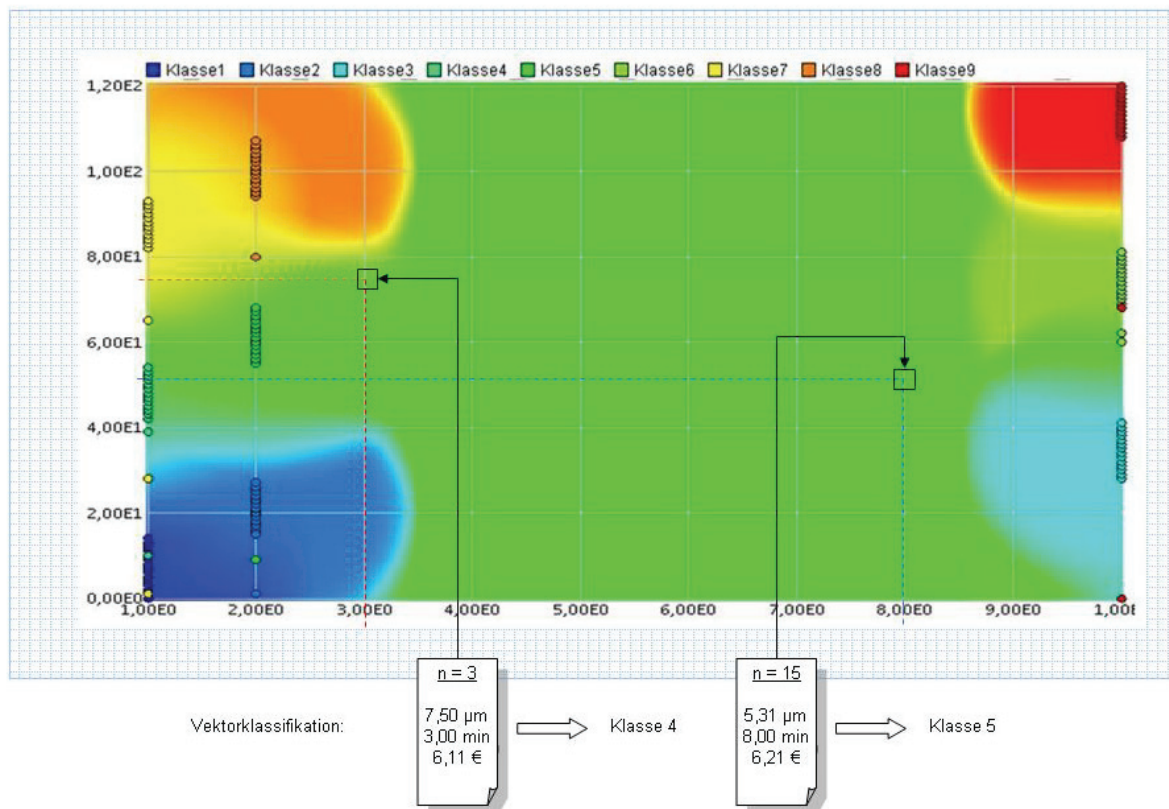


Abb. 8- 27 Beispielhafte Vektorklassifikation und Maßnahmenzuordnung

Abbildung 8-27 zeigt schematisch diesen Klassifikationsvorgang am Beispiel der Vektoren der Testbauteile Nr.3 und Nr.15. Anhand der ermittelten Rauigkeitsdifferenzen ΔR_i , Durchlaufzeitdifferenzen ΔT_i sowie den Stückkostendifferenzen ΔK_i lassen sich Maßnahmenklassen ableiten. Im Falle des Bauteils Nr.3 wird im nächsten Schritt die Simulation in Witness mit der Parameterkombination Strahlzeit $T_1 = 10$ s und Glasperlendurchmesser $D_2 = 70-110$ μm (Klasse 4) durchgeführt, um die vorgegebenen Ziel- bzw. Sollwerte einhalten zu können. Die Klassifikation der restlichen 19 Bauteile erfolgt in analoger Weise. Besondere Betrachtung sollte solchen Vektoren geschenkt werden, welche in einem Übergangsbereich beispielsweise zwischen Klasse 6 und Klasse 7 liegen. Hierbei sollten beide Kombinationen später in der Simulation berücksichtigt werden, um die wirkungsvollste Parameterkombination zu identifizieren.

Die Verifikation des Gesamtmodells erfolgte anhand der definierten Ziel- bzw. Sollgrößen. Im Rahmen dieses Modells werden folgende Zielgrößen definiert:

- Sollrauheit R_{Soll} : 2,5 μm
- Gesamtdurchlaufzeit T_{Soll} : 208 min
- Stückkosten K_{Soll} : 116 €

Die Bestimmung der Zielgrößen orientiert sich zum Einen an den Messwerten der experimentellen Versuchsreihen, so dass eine technisch realisierbare Dimension der Zielgrößen gewährleistet bleibt. Zum Anderen wurde darauf Wert gelegt, mit im industriellen Umfeld realistischen Zielgrößen zu agieren. So wird z.B. für die Rauigkeit R_a von lasergesinterten Bauteilen des Materials *Direct Metal 20 Bronze-Nickel* in der Literatur eine durch Mikrostrahlen mögliche Einebnung auf $R_a = 2-5$ μm angegeben [Gerth 2006, EOS 2004].

Tabelle 8-1 zeigt in einer Übersicht alle 20 Testdatenvektoren und deren Klassenzuordnung nach dem obigen Prinzip.

Bauteil-Nr.	ΔR [μm]	ΔT [min]	ΔK [€]	Maßnahmenklasse
1	8,90	18,00	6,41	7
2	7,49	8,00	6,21	5
3	7,50	3,00	6,11	4
4	9,24	18,00	6,41	8
5	8,28	18,00	6,41	7
6	6,85	8,00	6,21	5
7	8,34	18,00	6,41	7
8	6,58	18,00	6,41	6
9	6,69	8,00	6,21	5
10	5,07	18,00	6,41	4
11	8,08	18,00	6,41	7
12	5,58	8,00	6,21	5
13	8,85	18,00	6,41	7
14	7,73	18,00	6,41	6
15	5,31	8,00	6,21	5
16	9,06	18,00	6,41	7
17	7,00	18,00	6,41	5
18	5,22	8,00	6,21	5
19	7,11	18,00	6,41	5
20	6,41	18,00	6,41	5

Tab. 8- 1 Tabellarische Übersicht der Testvektoren und Maßnahmenzuordnung

Abbildung 8-28 zeigt die Verifikation des Modells bezüglich der Stückkosten. Mit dem Einsatz des SVM-Modells liegen 90% der Stückkosten deutlich unterhalb der in der Grafik rot markierten definierten Zielgrenze. Ohne SVM-Modell wird diese Zielgrenze von allen Bauteilen überschritten. Durch den neuen ganzheitlichen Ansatz lässt sich somit in diesem Beispiel eine Stückkostenreduzierung um etwa 5 % erreichen.

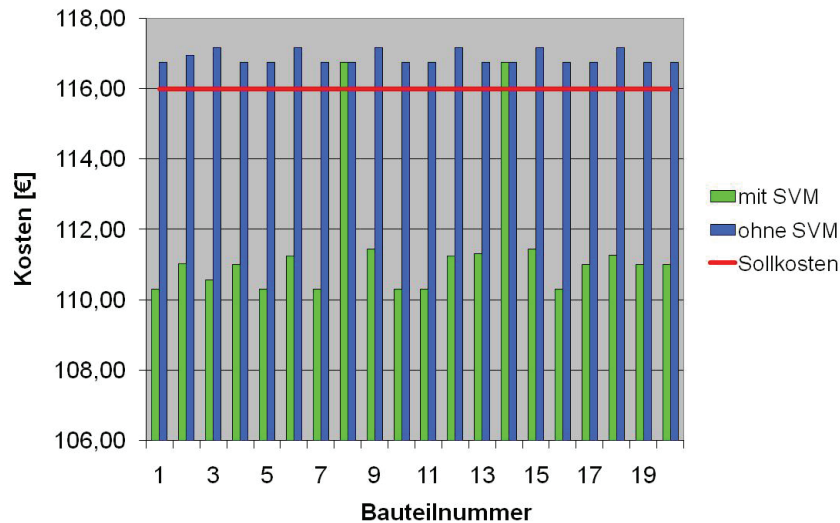


Abb. 8- 28 Stückkosten mit bzw. ohne SVM-Modell

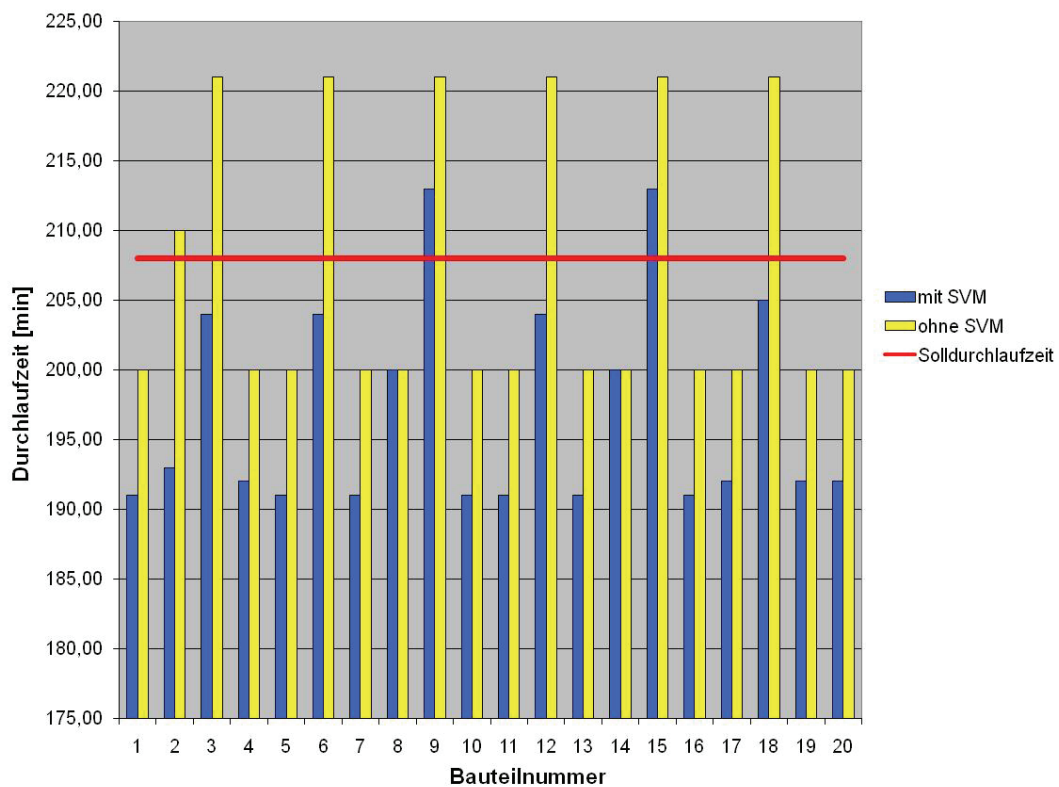


Abb. 8- 29 Gesamtdurchlaufzeiten mit bzw. ohne SVM-Modell

Im Falle der Gesamtdurchlaufzeit ergibt sich ein ähnliches Bild (Abb. 8-29). Auch hier liegen 90% aller Bauteile unterhalb der Zielgrenze bei Anwendung des SVM-Modells. Ohne eine ganzheitliche Betrachtung liegen 65% aller Bauteile unterhalb der Zielgrenze.

Für die Zielgröße Rauheit liefert das Modell den gewünschten Zielwert von $R_a = 2,5 \mu\text{m}$. Lediglich Bauteil Nr.1 liegt $0,04 \mu\text{m}$ über der Sollgrenze, womit aber dennoch eine Trefferquote von 95% realisiert werden kann. Abb. 8-30 zeigt einen Vergleich der Rauheitswerte der Versuchsproben nach dem Lasersintern und nach dem Mikrostrahlen. Das Diagramm zeigt deutlich, wie mittels der gezielten Maßnahmen aus dem ganzheitlichen Prognosemodell, unter Berücksichtigung aller betrachteten Zielgrößen die Varianz der Oberflächenrauigkeit durch den Kugelstrahlprozess ausgeglichen und auf den Zielwert gebracht werden konnte. Der Zielwert $R_a = 2,5 \mu\text{m}$ ist durch eine rote Linie gekennzeichnet.

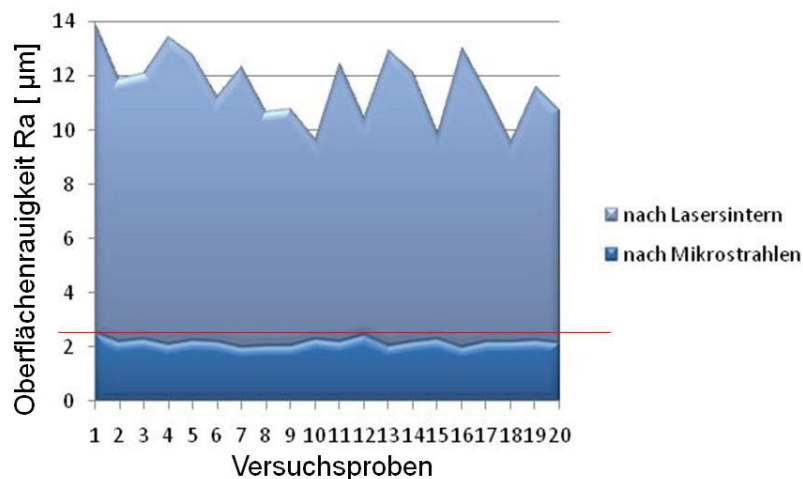


Abb. 8- 30 Vergleich der Oberflächenrauigkeiten vor und nach dem Kugelstrahlen

Zusammenfassend überzeugt bei der oben beschriebenen Umsetzung der Einsatz des ganzheitlichen Prognosemodells bei der Optimierung von Prozessfolgen mit sehr guten Ergebnissen. Die Kopplung des Witness-Modells mit dem SVM-Modell unterschreitet mit einer Trefferquote von 90% die neu definierten Zielwerte deutlich, während das herkömmliche Modell ohne Kopplung diese nicht erreichen kann. Das in dieser Arbeit entwickelte Modell ermöglicht durch die ganzheitliche Abbildung von technischen und betriebsorganisatorischen Kenngrößen eine istsituationsabhängige Echtzeitoptimierung auf Basis einer zuvor trainierten Support Vektor Maschine. Varianzen in den Prozessen und daraus direkt resultierende Varianzen in den Produkteigenschaften lassen sich somit ganzheitlich betrachten. Der in dieser Arbeit

entwickelte Ansatz ermöglicht es somit, für voneinander abhängige Prozessfolgen, auf Varianzen der Einzelprozesse durch gezielte Steuerung der Prozessfolge effektiv zu reagieren.

Weitere Anwendungsbeispiele wären Prozessfolgen aus spanender Bearbeitung mit anschließender Beschichtung. Varianzen in der Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität im spanabhebenden Prozess können anschließend gezielt durch geeignete Maßnahmenklassen z.B. in einer galvanischen Beschichtung ausgeglichen werden. Für komplexe Geometrien bietet diese Methode die Möglichkeit kritische Bereiche zu definieren und diesen für eine Zielgröße jeweils einen eigenen Kennwert zuzuordnen. Innerhalb des Modells werden so unterschiedlich kritische Bereiche an Bauteilen separat bewertet und entsprechende Maßnahmen zugeordnet. Beispiele hierfür wären lokale Überbeschichtungen bei der galvanischen Beschichtung oder lokale Rauigkeitsspitzen aufgrund einer ungünstig gewählten Belichtungsstrategie beim Lasersinterprozess.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Der globale Wettbewerb und eine immer transparentere Marktsituation verlangen heute mehr denn je eine Ausschöpfung aller Potentiale über die gesamte Wertschöpfungskette in der Produktion. Die vorliegende Arbeit hat am Beispiel einer varianzbehafteten Prozessfolge aus dem Rapid Manufacturing gezeigt, dass die ganzheitliche Betrachtung technischer und betriebsorganisatorischer Kenngrößen deutliche Optimierungspotentiale eröffnet. Der Einsatz der Support Vektor Methode ermöglicht diese ganzheitliche Analyse und Bewertung des Ist-Zustands und erlaubt durch die direkte Generierung von Maßnahmen im Hinblick auf anvisierte Zielgrößen die Kompensation von Varianzen.

Hierzu wurde zunächst im ersten Teil der Arbeit der Stand der Simulationstechnik im industriellen Umfeld beleuchtet und im Hinblick auf eine ganzheitliche Betrachtungsweise untersucht. Sowohl auf technischer als auch betriebsorganisatorischer Ebene existieren heute eine Vielzahl an Prozessmodellen und softwaretechnischen Umsetzungen. Ansätze einer ganzheitlichen Betrachtung halten heute in führenden PPS- und ERP-Systemen Einzug. Eine direkte Kopplung technischer und betriebsorganisatorischer Kennzahlen und die Berücksichtigung von Varianzen in den Einzelprozessen und deren Wirkzusammenhänge wurden bisher noch nicht realisiert.

In dieser Arbeit wurde eine Methode entwickelt, welche zunächst mittels einer vektoriellen Darstellung ein ganzheitliches Monitoring aller betrachteter Zielgrößen erlaubt um anschließend die so entstandenen Merkmalsräume mit Hilfe eines Ansatzes aus der künstlichen Intelligenz analysieren und klassifizieren zu können. Auf Grund der sehr guten Prognosefähigkeit dieser Support Vektor Methode erlaubt dieser Ansatz eine auf die Istsituation angepasste und auf die Gesamtzielgrößen ausgerichtete Generierung von Maßnahmen. Nach der Beschreibung dieses prinzipiellen Ansatzes wurde auf die betrachteten Einflussgrößen und Wirkzusammenhänge sowie die Grundstruktur des Gesamtmodells eingegangen.

Im Anschluss an eine kurze Einführung in die Methoden und Werkzeuge der künstlichen Intelligenz zur Klassifizierung wurde im speziellen die Support Vektor Methodik und deren mathematischer Hintergrund erarbeitet sowie aktuelle Anwendungsfelder der SVM aufgezeigt. Die Entwicklung eines Kostenmodells komplettierte die ganzheitliche Betrachtungs-

weise und erlaubte eine vollständige Beschreibung der Struktur und des Aufbaus des Gesamtmodells.

Abschließend wurde der erarbeitete Ansatz auf eine beispielhafte Prozessfolge aus dem Rapid Manufacturing übertragen und die Methode verifiziert. Hierbei wurde die Prozessfolge Lasersintern – Strahlspanen (Kugelstrahlen) betrachtet. Zunächst wurden für die technischen Kenngrößen und Prozessparameter experimentell 135 Testvektoren bestimmt. Auf deren Basis generierte das Modell neun unterschiedliche Maßnahmenklassen bzw. Merkmalsräume. Die gesamte Prozesskette wurde im Anschluss als Simulationsmodell in der Software Witness abgebildet und mit dem erarbeiteten Modell gekoppelt. Durch abschließende Verifikation wurde gezeigt, dass mittels dieses Gesamtmodells eine Trefferquote im Hinblick auf die neu definierten Zielgrößen von über 90 % erreicht werden konnte, was z.B. eine Reduzierung der Stückkosten von etwa 5 % ermöglichte. Der dominierende Zielwert Rauigkeit von mindestens $R_a = 2,5 \mu\text{m}$ wurde mit einer Ausnahme (Abweichung $0,05 \mu\text{m}$) in allen Proben erreicht bzw. unterschritten. Das entwickelte Prognosemodell war somit in der Lage, die im Lasersinterprozess auftretenden Varianzen in der Zielgröße Oberflächenrauigkeit durch gezielte Steuerung des Folgeprozesses Kugelstrahlen unter Einhaltung der Zielgrößen Stückkosten und Durchlaufzeit zu kompensieren.

Diese Arbeit beschreibt den entwickelten methodischen Ansatz zur ganzheitlichen Modellierung technischer und betriebsorganisatorischer Kenngrößen für varianzbehaftete Prozessfolgen mit gemeinsamen Kenngrößen. Eine beispielhafte Übertragung auf eine ausgewählte Prozessfolge zeigte hierbei die Funktionsweise und diente zur Verifikation. Im Hinblick auf eine industrielle Umsetzung muss diese Methodik in anschließenden Arbeiten auf weitere Prozessketten adaptiert und erprobt werden. Die Implementierung der einzelnen Teilmodelle in eine Simulationsplattform mit einer einheitlichen Benutzeroberfläche wäre ein weiterer denkbarer Schritt um die Anwendung im industriellen Alltag anwenderfreundlicher und effektiver zu gestalten.

10 Summary

Integral modeling of technical and business organizational characteristic quantities for measure generation by means of support vector machines in manufacturing systems

The base for an effective planning and optimization in production is the understanding of working connections between process parameters, product qualities and the business organizational putting levers. The customer-oriented alignment of a production line with the target figures product cost, product quality and delivery time can be reached by means of classification methods. Thereby one can show and classify each relevant control variable of the production line, both on a technical and organizationally level. Through this a coupled analysis of the working connections, with regard to the result at the end of the process consequence and an assignment of measures is made possible. Aim of this dissertation was to create such an integral model by the use of support vector machines.

More than ever the global competition and a more and more transparent market situation require the exhaustion of all potentials each about the complete value-added chain in the production. This dissertation has shown, by using a variance full process consequence of rapid manufacturing, that the integral analysis of technical and business organizational characteristic quantities opens clear optimization potentials. The support vector method makes this integral analysis and assessment of the actual state possible, and permits the direct generation of measures with regard to envisaged aim sizes use.

For this, the stand of the simulation technique in the industrial environment was examined in the first part of the work with regard to an integral philosophy. A variety of process models and software technical puttings into action today both on technical and business organizationally level exist. Approaches of an integral consideration find its way into leading PPS and ERP systems today. Until today, a direct coupling of technical and business organizational indicators and the consideration of variances in the individual processes and its working connections have not been realized.

In this dissertation a method was developed, which at first permits an integral monitoring of all aim sizes looked at by means of a vectorial representation to be able to analyze and to clas-

sify the feature rooms with the aid of an approach from the artificial intelligence. This approach permits a generation of measures adapted on the situation and aligned with the complete aim sizes support vector method due to the very good forecast ability of these. After the description of this general approach, the influence sizes, working connections and the basic structure of the complete model were looked at.

Following a short introduction to the methods and tools of the artificial intelligence for the classification, the support vector methodology and its mathematical background were worked out as well as current application pitches of the SVM. The development of a cost model completed the integral philosophy and permitted a complete description of the structure and the construction of the complete model.

In conclusion the method was transferred and the method verified on an exemplary process consequence. At first 135 test vectors were intended for the technical characteristic quantities and process parameters experimentally. On this basis the model generated nine different measure classes or feature spaces. Afterwards the complete process chain was shown in Witness as a simulation model coupled with the model worked out. By a final verification it was shown that by means of this complete model a hit ratio could be reached with regard to the newly defined aim sizes of over 90% which e.g. made possible a reduction of the unit costs of about 5%.

This work describes the developed general methodical attempt at the integral analysis and assessment of technical and business organizational characteristic quantities for variance full process consequences with common characteristic quantities. An exemplary assignment to a select process consequence showed in this connection the mode of operation and served for the verification. With regard to an industrial realization this methodology must be adapted and tested in following work on further process chains. The implementation of the individual sub models into a simulation platform with a unitary user interface would be another conceivable step to make the application more user friendly and more effectively in the industrial everyday life.

Literatur

- [Abe/Inoue 2002] Abe, S.; Inoue, T.: Fuzzy Support Vector Machines for Multiclass Problems, Proceedings of European Symposium on Artificial Neural Networks, 113-118, 2002.
- [Adam 1998] Adam, D: Produktionsmanagement. 9. Auflage. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1998.
- [Ayat et al. 2002] Ayat, N. E.; Cheriet, M.; Suen, C. Y.: A Two-Parameter SVM Kernel for Pattern Recognition, Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, Canada, IEEE Computer Society, 2002.
- [Bahlmann et al 2002] Bahlmann, C.; Haasdonk, H.: Online Handwriting Recognition with Support Vector Machines – A kernel approach. Proceedings of the 8th International Workshop on frontiers in Handwriting Recognition (IWFHR), S. 49-54, 2002.
- [Bähr 2004] Bähr, R.: Innovative Technologien zur Verbesserung der Gussteileigenschaften, Symposium anlässlich der Zuliefermesse Z2004, Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung, Universität Magdeburg, 2004.
- [Baum et al. 2006] Baum, H.; Krause, M.; Schütze, J.; Adler, M.; Doempke, S.: Me2Ko – Methode zur Modellierung von Kommunikations- und Koordinationsprozessen im KMU-Netzwerken. In: Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): Forschungsoffensive Software Engineering, Leipzig, 2006.
- [Bazarsuren/Filbert 2004] Bazarsuren, U.; Filbert, D.: Motor Fault Detection using Support Vector Machines. Surveillance 5 CETIM Senils, TU Berlin, 2004.
- [Bernhard 2002] Bernhard, J.; Wenzel, S.: Simulationsbasierte Systeme zur Integration logistischer und verfahrenstechnischer Entscheidungspro-

zesse - Arbeitsbereich 1: Leitszenario, Gesamtbericht Version 1.1, S. 25-32, 2002.

- [Bleicher 2004] Bleicher, K.: Das Konzept Integriertes Management. 7. Auflage. Frankfurt: Campus Verlag, 2004.
- [Braczyk 1997] Braczyk, H.-J. (Hrsg.): Innovationsstrategien im deutschen Maschinenbau – Bestandsaufnahme und neue Herausforderungen. Stuttgart: Akad. Für Technikfolgenabschätzung in Baden Württemberg, 1997.
- [Brecher 2005] Brecher, C. (Hrsg.); u.a.: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven 2005. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium, 2.-3. Juni. Aachen 2005.
- [Borgerding 1994] Borgerding B., (1994): „Zur Simulation von Temperatur- und Spannungsverteilungen in plasmagespritzten Schichtsystemen unter Berücksichtigung der thermophysikalisch relevanten Prozessdaten“, Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1994.
- [Börner 2001] Börner G., Eickmeyer D.: Off-line Simulation des Lackierprozesses mit Hochrotationszerstäubern und pneumatischen Zerstäubern, 8. DFO-Automobil-Tagung, Dresden, 14.-15. Mai 2001.
- [Boser et al. 1992] Boser, B. E.; Guyon, I. M.; Vapnik, V.: A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers. In: Haussler, D. (Hrsg.): Proceedings of the 5th Annual ACM Workshop on Computational Learning Theory. Pittsburgh, ACM Press, S. 144-152, 1992.
- [Brown et al. 2000] Brown, J.; Buckley, D.; Coulthard, A.; Dixon, A.; Dixon, J.; Easton, E.; Eeles, R.: Magnetic resonance imaging screening in women at genetic risk of breast cancer: imaging and analysis protocol for the uk multicentre study. Magnetic Resonance Imaging, 18: 765-776, 2000.
- [Burges 1998] Burges, C. J. C.: A tutorial on support vector machines for pattern recognition: Data Mining and Knowledge Discovery, 1998.

- [Chevan/Sutherland 1991] Chevan, A.; Sutherland, M.: Hierarchical partitioning. *The American Statistician* 45, 1991.
- [Christoph 2003] Christoph, F.: Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion. Bamberg : Meisenbach, 2003(Fertigungstechnik - Erlangen 140). Erlangen-Nürnberg, Friedrich-Alexander-Univ., Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Diss. 2003.
- [Christianini/Taylor 2006] Nello Cristianini, John Shawe Taylor: *Support Vector Machines and other kernel-based learning methods*. Cambridge University Press, 2000.
- [Dangelmaier 2003] Dangelmaier, W. (Hrsg.); Mueck, B.; Dittmann, N.: Marktanalyse: Materialflusssimulatoren. ALB/HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd. 11, Fraunhofer-Anwendungszentrum für Logistikorientierte Betriebswirtschaft, Paderborn, 2003.
- [De Grange 2006] De Grange, J. E.: Rapid process between dreams and reality – from the point of view of BOEING. Boeing USA, Euro-u Rapid 2006, Fraunhofer Allianz Rapid Prototyping, Frankfurt, 27.11.2006.
- [Dietterich/Bakiri 1995] Dietterich, T.; Bakiri, G.: Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes, *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol. 2, 263-286, 1995.
- [Domnick 1998] Domnick J., Scheibe A.: Berechnungsverfahren von Spritz- und Sprühvorgängen. In: Ondratschek, D.: Taschenbuch für Lackierbetriebe. Hannover: Vincentz Verlag, 1998, S. 281 - 296.
- [Domnick 1999] Domnick. J., Scheibe, A., Ye, Q.: Jet disintegration and droplet formation of high-speed rotary bell atomizers. 5th Annual Conference Liquid Atomization, Toulouse, France, July 1999.
- [Domnick 2000] Domnick, J., Scheibe, A., Steigleder, T., Weckerle, G., Ye, Q.: Simulation of the Electrostatic Spray Painting Process with High-Speed Rotary Bell Atomizers, 8th Int. Conf. on Liquid Atomiza-

tion and Spray Systems ICLASS 2000, Pasadena, CA, USA, July 2000.

- [Dössel 2001] Dössel K.-F.: Der Lackierprozess in der digitalen Fabrik, 8. DFO-Automobil-Tagung, Dresden, 14.-15. Mai 2001.
- [Duda et al. 2000] Duda, R. O.; Hart, P. E.; Stork, D. G.: Pattern Classification (2nd edition). John Wiley and Sons, 2. ed., 2000
- [Eichsleder 2004] Eichsleder, W.: Einfluss der Oberfläche auf die Schwingfestigkeit. Institut für allgemeinen Maschinenbau, Montanuniversität Leoben, 2004.
- [ElTobgy 2004] ElTobgy M.-S.; Ng E.; Elbestawi M.-A.: Three-dimensional elastoplastic finite element model for residual stresses in the shot peening process. Zeitschriftenaufsatz: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture) * Band 218 (2004) Heft 11, Seite 1471-1481, 2004.
- [EOS 2004] EOS: Direct Metal und Direct Steel Werkstoffe für EOSINT M250 Xtendent. In: Materialdatenblatt, 2004.
- [Eversheim 1989] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Band 4 – Fertigung und Montage. Düsseldorf: VDI Verlag, 1989.
- [Fachkunde Metall] Dobler, H.-D. u.a.: Fachkunde Metall. 54. Neubearb. Auflage. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel, 2003.
- [Fischer 2005] Fischer R.; Helfrich R.; Wulf C.: Integrated Optimisation in Static and Dynamic Structural Analysis, Proceedings of NAFEMS World Congress, May 17-20, Malta 2005.
- [Furey 2000] Furey, T.; Cristianini, N.; Duffy, N.; Bednarski, D.; Schummer, M.; Haussler, D.: Support Vector Machine Classification and Validation of Cancer Tissue Samples using Microarray Expression Data. Bioinformatics, Vol. 16, Nr. 10, S. 906-914, 2000.
- [Gebser et al. 2004] Gebser, D.; Decker, M.; Dürr, M.; Spieler, S.: Cost Leadership – Cost Reduction. Midterm Conference: Rolls Royce UK. Derby, England, 2004.

- [Gerth 2006] Gerth, C.: Ein Beitrag zur Optimierung von elektrochemisch hergestellten Oberflächen im Werkzeug- und Formenbau, Dissertation, Universität Stuttgart: Jost-Jetter-Verlag Heimsheim, 2006.
- [Ghouati 2005] Ghouati O.; Lanzerath H.; Schilling R.: Coupled Stamping-Crash-Analysis, Ford Werke AG & Ford Forschungszentrum Aachen GmbH, Germany, in „Why do a Multiphysics Analysis“, NAFEMS Book/Series, 2005.
- [Görz/Nebel 2003] Görz, G.; Nebel, B.: Künstliche Intelligenz. Fischer Verlag, Frankfurt, 2003.
- [Gruhn 1998] Gruhn H., (1998): „Finite Elemente Simulation gemessener Eigenspannungen in plasmagespritzten Mehrschichtsystemen“, Dissertation, Universität Bochum, Berichte des Forschungszentrums Jülich, Institut für Werkstoffe der Energietechnik, Jülich 1998, ISSN 0944-2952, 1998.
- [Guyon et al. 2002] Guyon, I.; Weston, J.; Barnhill, S.; Vapnik, V.: Gene Selection for Cancer Classification using Support Vector Machines. Machine Learning, 46, S. 389-422, 2002.
- [Günther 2005] Günther, H.-O.; Tempelmeier, H. : Produktion und Logistik. 6. Aufl. Berlin u.a.: Springer, 2005.
- [Gyldenfeldt 2003] Gyldenfeldt, C. ; Stroth, C.: CAM: automatisch, integriert, virtuell und einfach. In Zeitschrift: WB-Werkstatt und Betrieb, Ausgabe 9/2003.
- [Haberstroh 2000] Haberstroh, E., et al.: Prozessübergreifende Qualitätssicherung beim Ultraschallschweißen, Zeitschriftenaufsatz: Schweißen und Schneiden, Band 52 (2000) Heft 12, Seite 728-733, 2000.
- [Harms 1997] I.H. Harms: Modelling the dispersion of ^{137}Cs and ^{239}Pu released from dumped waste in the Kara Sea. J. Mar. Systems, Vol. 13, 1-19, 1997.

- [Hassani 2000] S.T.S. Al-Hassani: Mechanical aspects of residual stress development in shot peening. First Inter. Conf. On Shot Peening, Paris Sept. 2000 14.-17., Pergamon Press, 2000.
- [Henkel 2004] Heckel, T. ; Klein, F.: Simulation der Vorgänge beim Kokillengießen. In Zeitschrift: Giesserei-Praxis, Ausgabe 7/2004.
- [Hennings 2002] Hennings, D.; Fricke, N.: Strukturoptimierung und Rapid-Prototyping. Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Materialforschung, Bremen, 2002.
- [Hompel 2001] Hompel, M.; Siebel, L.: Logistik und E-Commerce – Konzepte für Ballungszentren, Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2001.
- [Hoerl/Kennard 1970] Hoerl, A. E.; Kennard, R. W.: Ridge regression: Biased estimation for nonorthogonal problems. *Technometrics*, 1970.
- [Hsu/Lin 2002] Hsu, C.-W.; Lin, C.-J.: A Comparison of Methods for Multi-class Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 13, No. 2, p. 415-425, 2002.
- [Illston 2006] Illston, T.: Rapid Manufacturing – selected applications in aerospace. Airbus UK, Euro-u Rapid 2006, Fraunhofer Allianz Rapid Prototyping, Frankfurt, 27.11.2006.
- [Jain et al. 2000] Jain, A. K.; Duin, R. P. W.; Mao, J.: Statistical Pattern Recognition: A Review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 1, January 2000.
- [Jankowski 2005] Jankowski U.: Investigation on mapping and element sizes in crash calculation, Proceedings of 6th MpCCI User Forum 2005, Februar 2005.
- [Joachims 2002] Joachims, T.: Learning to classify text using support vector machines. Boston, Kluwer, 2002.

- [Jodin/Hömberg 2005] Jodin, D.; Hömberg, K.: Datenbeschaffung für die Simulation eines Logistikzentrums. In: Jahrbuch der Logistik 2005. Verlag free beratung GmbH, S. 273-279, Korschenbroich, 2005.
- [Joos-Sachse 2006] Joos-Sachse, T.: Controlling, Kostenrechnung und Kostenmanagement. Grundlagen. Instrumente. Neue Ansätze. 3. überarb. Aufl. Karlsruhe: Gabler, 2006.
- [Kapp 2003] Kapp, R.; Löffler, B.; Wiendahl, H.-H.; Westkämper, E.: Der Logistik-Prüfstand: Skalierbare Logistiksimulation von der Lieferkette bis zum Arbeitsgang. In: wt Werkstattstechnik Nr. 93 - 1/2, S. 31-38, 2003.
- [Kindermann 2004] Kindermann, R. ; Kolb, U.: Realitätsnahe Simulation sorgt für hohe Qualität. In Zeitschrift: WB-Werkstatt und Betrieb, Ausgabe 9/2004.
- [Klein 2001] Klein R. et al., Asymptotic Adaptive methods for Multisacale Problems in Fluid Mechanics, J. Eng. Math., 39, 261-343, 2001.
- [Klemenz 2006] Klemenz, M.: Simulation des Einflusses der Bauteilgeometrie auf den Randschichtzustand nach dem Kugelstrahlen. Dissertation, Institut für Werkstoffkunde I, Universität Karlsruhe, 2006.
- [Klemm et al. 2006] Klemm, P.; Rüdele, H.; Weimer, T.: Durchgängiges Engineering von mechatronischen Systemen. Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart (FTK 2006). S. 101-131. Gesellschaft für Fertigungstechnik, 2006.
- [Koch 2005] Koch D., Tushtev K., Kuntz M., Knoche R., Horvath J., Grathwohl G.: Modelling of deformation and damage evolution of CMC with strongly anisotropic properties, Cocoa Beach Proceedings, 2005.
- [Kolossoff 2004] Kolossoff S.; Boillat E.; Glardon R.; Fischer P.; Romano V.: 3D finite element simulation of selective laser sintering. Dreidimensionale Finite-Elemente-Simulation des selektiven Laserstrahlsinterns. Konferenz-Einzelbericht: LANE, Laser Assisted Net Shape Engineering, 4 * (2004) Seite 457-464, 2004.

- [Krebel 1999] Krebel, U.: Pairwise Classification and Support Vector Machines, in: B. Schölkopf, C. Burges, A. Smola (Hrsg.): Advances in Kernel Methods: Support Vector Learning, Cambridge, MIT Press, 255-268, 1999.
- [Kuhlmann 2005] Kuhlmann A., Vetter R.-M., Lübbling Ch., Thole C.-A.: Data Mining on Crash Simulation Data, Lecture Notes on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition, Eds. Petra Pernert, 2005.
- [Kühn 2006] Kühn, W. (Hrsg.): Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2006.
- [Kumar 2005] Kumar, A. P.: Agent Based Diagnostic System for Defect Analysis during Chemical Mechanical Polishing (CMP). Dissertation, Universität Stuttgart, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2005.
- [Kunz 2001] Kunz, R.: Mathematische Modellierung des atmosphärischen Stofftransports und des Mikroklimas in bebauten Gebieten. Fortschrittberichte VDI, Reihe 15: Umwelttechnik, Band 236, S. 1-130, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [Lancu 1989] Lancu O.T., (1989): „Berechnung von thermischen Eigenspannungsfeldern in Keramik-Metall-Verbunden“, Dissertation, Universität Karlsruhe, in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 18, Band 74, VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN 3-18-147418-5, 1989.
- [Lukas 2001] Lukas, C.: Die konzentrierte Nutzenstrategie. Wiesbaden: BoD GmbH, 2001.
- [Majda 2003] Majda A. J., et al., Systematic multi-scale models for tropics, J. Atm. Sci., 60, 393-408, 2003.
- [Majzoobi 2005] Majzoobi G.-H.; Azizi R.; Alavi N.-A.: A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts. Zeitschriftenaufsatz: Journal of Materials Processing Technology * Band 164/165 (2005) Seite 1226-1234, 2005.

- [Mennig 1995] Mennig, G.: Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung. München, Wien: Karl Hanser Verlag, 1995.
- [Mercer 1909] Mercer, J.: Functions of positive and negative type, and their connection with the theory of integral equations. Philosophical Transactions of the Royal Society. London, 1909.
- [Meyer et al. 2006] Meyer, L.W.; Kuprin, C.; Halle, T.; Schuberth, S.: Bestimmung von Materialkenndaten bei höchsten Temperaturen für die Simulation von schnellen Umformvorgängen. Schriftenreihe Werkstoffe und werkstofftechnische Anwendungen, Band 24, S. 137-142, Chemnitz, 2006.
- [Minsky/Papert 1999] Minsky, M. L.; Papert, S. A.: Perceptrons. MIT Press, 1969. Expanded Edition, 1999.
- [Mitschang 2003] Mitschang, B.; Westkämper, E.; Constantinescu, C.; Heinkel, U.; Löffler, B.; Rantzau, R.; Winkler, R.: A Flexible Integration of Layout Planning and Logistics Simulation through Data Change Propagation. In: Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems (CIRP ISMS 2003), Saarland University, Saarbrücken, June 2003.
- [Mitchell 1997] Mitchell, T.: Machine Learning. McGraw-Hill, 1997.
- [Monien 2005] Monien, K.: Support Vektor Maschinen als Analyseinstrument im Marketing. Dissertation, Universität Bielefeld, 2005.
- [Müller 2002] Müller, N.: Rapid Prototyping und Rapid Tooling. Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen, Technische Universität Clausthal, 2000.
- [Müller 2004] Müller, C.: Support Vector Machine based detection of tumours in dynamic MRI mammographs. Master Thesis, Universität Bielefeld, 2004.
- [Müller et al. 2006] Müller, E.; Ackermann, J.; Horbach, S.: Collaborativ Planning in Competence-cell-based Networks. In: Proceedings of the 7th IFIP

Working Conferenz on Virtual Enterprises – PRO-VE'06. Helsinki, Finnland, 2006.

- [Müller/Wirth 2005] Müller, E.; Wirth, S.: Ganzheitliche Produktion in Netzen und Clustern – Strategien für die Zukunft. In: Strategien für die ganzheitliche Produktion in Netzen und Clustern – TBI'05, Tagungsband, Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF, Sonderheft 11, S. 26-40, Chemnitz, 2005.
- [Niebling 2004] Niebling F.; Otto A.; Geiger M.: Temperature and stress development in the DMLS process. Temperatur- und Spannungsverlauf beim direkten Laserstrahlsintern von Metallpulvern. Konferenz-Einzelbericht: LANE, Laser Assisted Net Shape Engineering, 4 * (2004) Seite 465-482, 2004.
- [Niebling 2005] Niebling F.: Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile. Deutsche Dissertation: Fertigungstechnik Erlangen * Band 156 (2005) Seite 1-148. Bamberg: Meisenbach, 2005.
- [Pedlosky 1987] Pedlosky J., Geophysical Fluid Dynamics, Springer, 2nd Edition, 1987.
- [Pfeifer 1998] Pfeifer, T: Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken, München-Wien Hanser, 1998.
- [Platt et al. 2000] Platt, J.; Cristianini, N.; Shawe-Taylor, J.: Large Margin DAGs for Multiclass Classification, Advances in Neural Information Processing Systems, Vol. 12, 547-553, 2000.
- [Plinke 2006] Plinke, W.: Industrielle Kostenrechnung - Eine Einführung. 7. bearb. Auflage. Berlin: Springer, 2006.
- [Pritschow/Klemm et al. 2003] Pritschow, G.; Klemm, P.; Brinzer, B.; Priese, J.: Produktionsregelung und Prozessplanung für die variantenreiche Serienproduktion. In: Zäh, R. (Hrsg.): Marktchancen Individualisierung. Berlin u. a.: Springer, 2003.

- [Radaj 1999] Radaj, D.: Schweißprozesssimulation – Grundlagen und Anwendungen. Düsseldorf, DVS-Verlag, 1999.
- [Rosenblatt 1959] Rosenblatt, F.: The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. Psychological Review, 1959.
- [Russell/Norvig 2004] Russell, S.J.; Norvig, P.: Künstliche Intelligenz - Ein moderner Ansatz. Pearson Studium Verlag, 2004.
- [Sauerwein 1998] Sauerwein, R.G.: Gruppenorientierte Fertigungsstrukturen im deutschen Maschinenbau. Wiesbaden: VS Verlag, 1998.
- [Saunders et al. 1998] Saunders, C.; Stitson, M. O.; Weston, J.; Bottou, L.; Schölkopf, B.; Smola, A.: Support Vector Machine – Reference Manual. Royal Holloway Technical Report, University of London, 1998.
- [SCAI 2005] Fraunhofer SCAI, ISD Uni Stuttgart, FAT AK 27: Verbesserung der Prognosefähigkeit der Crashsimulation aus höherfesten Mehrphasenstählen durch Berücksichtigung von Ergebnissen vorangestellter Umformsimulationen, Umform-Crash-Kopplung, FAT-Schriftenreihe, 2005.
- [Scheibe 2000] Scheibe, A.: Teilchenbahnberechnung zur Simulation von elektrostatischen Lackiervorgängen mit Hochrotationszerstäubern, Dissertation, Universität Stuttgart: Jost-Jetter Verlag Heimsheim, 2000.
- [Scheibe 2004] Scheibe, A.: Anwendung der Beschichtungssimulation in der Praxis. Simulation in der Lackiertechnik : Fraunhofer IPA - Workshop, 4. November 2004, Stuttgart, 2004.
- [Scheibe et al. 2006] Scheibe, Andreas; Decker, Markus; Constantinescu, Carmen; Westkämper, Engelbert: A Comprehensive and Holistic Approach of Multi-Scale Modelling and Simulation of Manufacturing Systems. In: Ueda, Kanji (Hrsg.) u.a.; CIRP u.a.: Proceedings of the 6th International Workshop on Emergent Synthesis - IWES '06 : August 18-19, 2006, Tokyo, Japan. Tokyo, 2006, S. 205-210, 2006.

- [Shiego 2005] Shiego, A.: Advances in Pattern Recognition. Springer-Verlag London Limited, 2005.
- [Schiffner 2001] Schiffner K.; Droste C.: gen. Helling Numerical simulation of shot peening. C.A. Brebbia, Wessex Institute of Technology, UK (Hrsg.), Surface Treatment V „Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Treatment Effects“, 20. – 22. Juni 2001, Sevilla. WITPRESS Southampton, Boston, ISBN 1-85312-872-4, S. 303 – 311, 2001.
- [Schmelzer 2006] Schmelzer, H.-J., Sesselmann, W.: Geschäftsprozessmanagement in der Praxis. Kunden zufrieden stellen – Produktivität steigern – Wert erhöhen. 5. vollst. überarb. Auflage. München u.a.: Carl Hanser, 2006.
- [Schneider 2005] Schneider, H.-M.; Buzacott, J.- A.; Rücker, T.: Operative Produktionsplanung und –steuerung. München: Oldenbourg. 2005.
- [Schölkopf 1997] Schölkopf, B.: Support Vector Learning. München, Oldenbourg, 1997.
- [Schölkopf/Smola 2002] Schölkopf, B.; Smola, A.: Learning with Kernels. Cambridge, MIT Press, 2002.
- [Schulte 2005] Schulte, M.: Angepasste Simulation ermöglicht Einschätzung der Werkstückeigenschaften beim Schleifen. In Zeitschrift: IDR-Industrie Diamanten Rundschau, Ausgabe II/2005.
- [Schulz 2003] Schulz J.: Geschwindigkeitskontrolliertes Kugelstrahlen und Kugelstrahlumformen. Rate-controlled shot peening and shot peen forming. Monographie: Umformtechnische Schriften * Band 111 (2003) Seite 1-201, 2003.
- [Sihn 2003] Sihn, W.; Richter, H.; Graupner, T.-D.: Projektierung von Fertigungssystemen durch Konfiguration, Visualisierung und Simulation. In: Schulze, Thomas (Hrsg.) u.a.; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg / Institut für Simulation und Graphik u.a.: Simulation und Visualisierung 2003 : Proceedings der Tagung am Institut für Simulation und Graphik der Otto-von-Guericke-

- Universität Magdeburg am 6. und 7. März 2003. Gent, Belgien : SCS Europe, S. 9-19, 2003.
- [Solomonoff 1964] Solomonoff, R. J.: A formal theory of inductive inference. 1964.
- [Spath 2002] Spath, D. (Hrsg.), u.a.: Werkzeugmaschine 2010: Voruntersuchung zum Thema Werkzeugmaschine 2010: Abschlussbericht Karlsruhe, 2002.
- [Stadtaus 2004] Stadtaus, M.: Fügeprozesssimulation– Innovative Anwendung der Informatik. Studie, Institut für Füge- und Schweißtechnik, Technische Universität Braunschweig, 2004.
- [Steinbusch 2004] Steinbusch, R.: Simulation im konstruktiven Maschinenbau. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004.
- [Stenke 2005] Stenke, A.: Stratosphärischer Wasserdampf in einem gekoppelten Klima-Chemie-Modell: Simulation, Trends und Bedeutung für die Ozonchemie, Dissertation, Universität München, Fakultät für Physik, 2005.
- [Straube 2004] Straube, A. M.: Modularer Ansatz zur Simulation verfahrensübergreifender fertigungstechnischer Prozessketten. Aachen: Shaker, 2004 (Berichte aus der Produktionstechnik 14/2004). Aachen, RWTH, Fakultät für Maschinenwesen, Diss. 2004 .
- [Svejda 2001] Svejda P.: Konsequente Automatisierung des Lackierprozesses am Beispiel der Karosserielackierung. In: Jahrbuch besser Lackieren! 2002. Vincent Network Verlag, Hannover, 2001.
- [Tushtev 2005] Tushtev K., Koch D., Grathwohl G.: Modellierung der orientierungsabhängigen Eigenschaften keramischer Faserverbundwerkstoffe mit "schwacher" Matrix, Technische Keramische Werkstoffe, Kap.4.4.1.8, Seite 1-22, J.Kriegesmann [Hrsg.]. Deutscher Wirtschaftsdienst Köln, 2005.

- [Tushtev 2005_2] Tushtev K., Koch D.: Finite-Element-Simulation der nichtlinearen Verformung von Carbon/Carbon-Verbundwerkstoffen, *Forschung im Ingenieurwesen* 69 (2005) 216-222, 2005.
- [Vapnik 1982] Vapnik, V.: Estimation of Dependences Based on Empirical Data. Englische Übersetzung: Springer-Verlag, 1982.
- [Vapnik 1995] Vapnik, V.: The Nature of Statistical Learning Theory. Springer-Verlag, 1995.
- [Vapnik 1998] Vapnik, V.: Statistical Learning Theory. Wiley, 1998.
- [VDW 2006] VDW Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabrikanten e.V.: Daten und Fakten 2005 (2006), <http://www.vdw.de>, 2006.
- [Verl 2006] Verl, A.: Automatisierungstechnik – der Schlüssel zum Erfolg. In: Eckelt, W. K. (Hrsg.); Eckelt Consultants Management- und Personalberater GmbH: Top Career Guide 2007 Automotive: Der Karriere- und Branchenführer für die Automobilindustrie. Stuttgart, 2006.
- [Verl et al. 2006] Verl, A.; Kremer, M.; Kircher, C.; Sekler, P.: Steuerungstechnik – Quo Vadis? Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart (FTK 2006). S.77-98, Gesellschaft für Fertigungstechnik, 2006.
- [Völkl 2004] Völkl, R. ; Schafstall, H.: FEM-gestützte Beanspruchungsanalyse. In Zeitschrift: Umformtechnik, Ausgabe 1/2004.
- [Wang 2005] Wang, L.: Support Vector Machines: Theory and Applications. Mathematics, Springer-Verlag, 2005
- [Wanner 2006] Wanner, M.-C.; Czarnietzki, R.: Simulationsunterstützter Fertigungsleitstand für die Produktion von Kühlsystemen. In: PPS Management 11 (2006), Nr. 2, S. 43-46, 2006.
- [Webb 2002] Webb, A. R.: Statistical Pattern Recognition. John Wiley & Sons, 2 ed., Jul. 2002
- [Weihrauch 2001] Weihrauch, K. (Hrsg.); Keller, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und –steuerung mit SAP. Einführung in die diskrete Fertigung und die Serienfertigung SAP PP. Bonn: Galileo Press, 2001.

- [Weinert 2005] Weinert, K. (Hrsg.): Spanende Fertigung. 4. Ausg. Essen: Vulkan-Verlag, 2005.
- [Wenzel 2000] Wenzel, S.; Noche, B.: Simulationsinstrumente in Produktion und Logistik – eine Marktübersicht. In: Mertins, K.; Rabe, M. (Hrsg.): The New Simulation in Production and Logistics, 9. ASIM-Fachtagung « Simulation in Produktion und Logistik », IPK Berlin, S. 423-432, 2000.
- [Wenzel 2002] Wenzel, S.: Simulation in der Automobilproduktion. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2002.
- [Westkämper 1996] Westkämper, E. (Hrsg.): Null-Fehler-Produktion in Prozessketten – Maßnahmen zur Fehlervermeidung und -kompensation. Springer-Verlag, 1996.
- [Westkämper et. al. 2002] Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Warnecke, H.: Neue Organisationsformen im Unternehmen. Ein Handbuch für das moderne Management. 2., neubearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2002.
- [Westkämper 2002] Westkämper, E.; Gottwald, B.; Gerth, C.: Multi-scaling modeling and simulation of manufacturing systems. Proceedings of the 4th International Workshop on Emergent Synthesis – IWES'02, Kobe, Japan, S. 25-31, 2002.
- [Westkämper 2004] Westkämper, E.: Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Ansatzpunkte für eine Neuorientierung des Industrial Management. Bodensee-Forum, 2004.
- [Westkämper 2005] Westkämper, E.; Kapp, R.; le Blond, J.: Fabrikstruktur und Logistik integriert planen, In: wt Werkstattstechnik 95, Nr. 4, S. 191-196, 2005.
- [Westkämper 2006] Westkämper, E.: Thesen zur Forschung für die Produktion – New Taylor. In: Forschung stärken Produktion sichern, Geißinger, J. (Hrsg.). Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2006.

- [Westkämper 2006_2] Westkämper, Engelbert; Decker, Markus (Mitarb.); Jendoubi, Lamine (Mitarb.): Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin u.a. : Springer, 2006.
- [Westkämper 2006_3] Westkämper, Engelbert; Warnecke, Hans-Jürgen; Decker, Markus (Mitarb.): Einführung in die Fertigungstechnik. 7. Aufl. Stuttgart : Teubner, 2006.
- [Westkämper/Verl 2007] Westkämper, E. (Hrsg.); Verl, A. (Hrsg.); Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA): Werkzeuge des Technologiemanagements. Fraunhofer IPA Workshop, Stuttgart, 2007.
- [Wiendahl 2006] Wiendahl, H.-P.; Klepsch, B.: Komplementäre Produkt- und Fabrikmodularisierung als Ansatz zur Komplexitätsbewältigung. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) Nr.6, S. 367-373, 2006.
- [Wildemann 2003] Wildemann, H. (Hrsg.): Variantenmanagement. 11. Auflage. München: TCW transfer-Centrum, 2003.
- [Wrobel et al. 2000] Wrobel, S.; Morik, K.; Joachims, T.: Maschinelles Lernen und Data Mining. In: Görz, G.; Rollinger, C.-R.; Schneeberger, J. (Hrsg.): Handbuch der künstlichen Intelligenz. 3. Auflage, München, Oldenbourg, S. 517-597, 2000.
- [Wu 2005] Wu W.; Zeng Y.; Huang X.; Li Z.-Q.: Finite element method simulation of shotpeening wing skin panel. Numerische Simulation zum Oberflächenverfestigungsstrahlen von Tragflächen mittels Finite Element Methode. Zeitschriftenaufsatz: Transactions of the Nonferrous Metals Society of China * Band 15 (2005) Heft 2, Seite 443-446, 2005.
- [Ye 2005] Ye, Q., Domnick, J., Scheibe, A.: Numerical simulation of electrostatic spray-painting processes in the automotive industry. In Krause, E.: High Performance Computing in the Science and Engineering 2004 : Transactions for the High Performance Computing Center, Stuttgart (HLRS) 2004. 7th HLRS results and review

workshop on October 4 - 5 at the HLRS, Berlin : Springer, 2005, ISBN 3-540-22943-4, S.261-275, 2005.

[Zäh 2006]

Zäh, M. F.; Branner, G.; Hagemann, F.: Einführung in generative Fertigungsverfahren und deren Anwendungsfelder. In: iwb Seminarberichte 81, Rapid Manufacturing, Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder, Herbert Utz Verlag, 2006.

[Zäh 2006_1]

Zäh, M. F.; Branner, G.; Hagemann, F.; Lutzmann, S.: Entwicklungstrends im Bereich Rapid Manufacturing. 3D-Erfahrungsforum Werkzeug- und Formenbau, Berlin (2006), S. 263-276, 2006.

Anhang

Anhang A1:

Übersicht und Vergleich der relevanten am Markt erhältlichen Logistiksimulatoren

Tool	Anbieter	Systeminformationen allgemein	Modellierungsphilosophie	Simulationsumgebung, -oberfläche	Bausteinbibliothek	Ergebnisdarstellung	Besonderheiten
Dosimis	Simulations-Dienstleistungszentrum GmbH	Simulator für diskrete Ereignisse durch Add-ons erweiterbar Transportmodul Module für Personaleinsatzplanung Kostensimulation 3-D Animation COM – Schnittstellen Unterstützung der gängigsten MS Windows Betriebssysteme	- objektorientiert - Objekte bewegen sich zw. einer oder mehreren Quellen und Senken - Objekte durch Bausteine transportiert, bearbeitet oder selektiert - Modellaufbau aus 6 Schritten - Quellenangaben legen Systemobjekte fest - Bausteingaben beschreiben, was mit den Teilen passiert	- einfügen von Bausteinen in gerasterte Windowsorientierte Simulationsoberfläche - Oberfläche besteht aus Symbolleisten, Modellierungsleiste, Animationsleiste, Ergebnispalette, umfangreiches Simulationsfenster mit Modell, Protokollfenster, Watchfenster, Digitalanzeige, Variablenfenster	- übersichtlich in separaten Palettenfenster - durch Piktogramme und drei Buchstaben gekennzeichnet - Ampelsystem für Bausteinstatus	- Ergebnisse visualisierbar durch animierte Betrachtung des Modells mit verschiedener Farbdarstellung durch manuell erzeugbare Informationsgraphiken	- objektorientierte (nach der Simulation animiert), abstrakte (Elemente lassen nicht auf ihre Funktion schließen) Ansicht - wählbare Geschwindigkeiten:
Enterprise Dynamics	Enterprise Dynamics	- Simulator für diskrete Ereignisse - unterstützt Windows Betriebssysteme 9x, 2000, NT, XP - spezielle Applikationen für Bereiche Logistik, Flughafen, Lehre - Applikationen mit weiteren Tooleigenschaften, wie Security-DLL-Kit, OPC-Tool	- Quelle-Senke-System - Modelle aus „Atomen“ aufgebaut - Atome programmierbar - eigene Toolsprache 4D-Script	- gerasterte Oberfläche kann beliebig bewegt und gezoomt werden - Oberfläche besteht aus Simulationskontrolle, Menüleiste, Speedbuttons, Bibliothek, Layoutfenster, Rasterpunktanzeige - Ansichtsteuerung ohne Menüwechsel mit Maus möglich	- Bausteine unterteilt in Atomgruppen - Atome sind in 2D-Ansicht durch Piktogramme dargestellt - Atome sind austauschbar - Atome haben Ein- und Ausgangskanäle und ein Datenkanal - Farbliche Darstellung der Zustände	- Darstellung in animierter 2-D-Ansicht, Atome objektorientiert 3-D-Ansicht, Atome sehr grob VR-Ansicht, realitätsnah - Ansichten auch nebeneinander positionierbar	- Wählbare Geschwindigkeiten - Simulationsgeschwindigkeit kann während der Simulation verändert werden
Micro Saint	Micro Analysis and Design Simulation Software Inc.	- Simulator für diskrete Ereignisse - unterstützt Windows Betriebssystemen 95,98, 2000, ME, XP, NT 4.0	- „task network modeling“ - Aktivitäten als Knoten dargestellt - Bausteindefinitionen als Boolescher-Ausdruck eingeben - beliebige Start- & Endbedingungen - Rücksetzen eines Flags - Analyser kann Modellparameter während des Simulationslaufes verändern	- stark gerasterte Windows orientierte Oberfläche mit Dropdown-Menüs und Bausteinimplementierung durch Drag&Drop - Bausteine nur an bestimmten Punkten einfügbar - Symbolleisten, Bausteinsymbole, Modell, Simulationsfenster, Simulationslaufzähler, - Netzwerk (= weitere Ebene) erzeugbar / Sprung in einzelne Ebenen möglich	- Bausteine als Piktogramme dargestellt und in Symbolleiste untergebracht - 4 Bausteine stehen zur Implementierung durch Undo, Kopieren, Einfügen, Finden, direktes Einsetzen zur Verfügung - Erweiterbarkeit nicht möglich	- animierte Simulation des Netzwerkes - realitätsnahe Action View-Ansicht - keine 3-D Simulation	- Veränderungen der Variablenwerte während der Simulationsdurchführung möglich

Tool	Anbieter	Systeminformationen allgemein	Modellierungsphilosophie	Simulationsumgebung, -oberfläche	Bausteinbibliothek	Ergebnisdarstellung	Besonderheiten
Sim-process	CACI Products Company Inc.	<ul style="list-style-type: none"> - Simulator für diskrete Ereignisse - Simulator zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen - unterstützt Windows Betriebssysteme 95, 98 und NT - Bereiche: Simulation, statistische Analyse, Activity based costing (ABC), Animation 	<ul style="list-style-type: none"> - Fünf Elemente: Prozesse & Aktivitäten Entitäten Ressourcen Verbindungen Blöcke - 18 Aktivitäten zur Erzeugung, Bearbeitung und Vernichtung der Entitäten - Modellierung in 3 Schritten: Modell abbilden Aktivitäten, Flüsse definieren Ressourcen, Verwendung festlegen 	<ul style="list-style-type: none"> - nicht gerasterte Windowsorientierte Oberfläche mit nur einem Fenster, Drop-down-Menü und Drag & Drop-Implementierung der Bausteine - individuelle Präferenzen des Anwenders festlegbar - Symbolleisten, Bausteinsymbole, Simulationsmodell, Modellierungsfenster, Graphik-Editor 	<ul style="list-style-type: none"> - als Symbolleiste mit Buttons - 18 vordefinierte Bausteine als Piktogramme abgebildet - Möglichkeit der Verwendung hierarchischer Bausteine - Definition und Verteilung der Entitäten im Bausteinmenü mit Auswahllisten - definierte Verteilungen können in ihrem Verlauf angezeigt werden 	<ul style="list-style-type: none"> - während der Simulation im Echtzeitgraph - nach der Simulation in verschiedenen Graphen - Simulation animiert und nicht-animiert möglich - 2-D Umgebung (keine 3-D Unterstützung) - Import von Graphiken (bmp, spx) möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Simulationsgeschwindigkeit variabel
Arena	Rockwell Software Inc.	<ul style="list-style-type: none"> - Simulator für kombiniert diskret-kontinuierliche Ereignisse - unterstützt Windows Betriebssysteme 95, 98, ME, NT 4.0, 2000, XP - Verknüpfungsmodule Arena RT 	<ul style="list-style-type: none"> - Quell-Senke-System Anordnung in Form einer Erzeugung (von Entitäten), Bearbeitung (Prozess), Beseitigung („Basic-Process“ Fenster - Rotierende Bausteine oder gesamtes Modell über alle drei Achsen 	<ul style="list-style-type: none"> - gerastertes Modellfenster - Rasterpunkt als Dezimalanzahl angegeben - Rasterung sichtbar im Hintergrund - Windows Oberfläche aus einem System mehrerer Fenster - Symbolleisten, Modellfenster, Templatefenster, Datenfenster, Statusbar, Rasterpunktangabe 	<ul style="list-style-type: none"> - Bausteine im Templatefenster unter Basic-Process untergebracht - Flowchart Modules (physische Bausteine) und Data Modules (Datenbausteine) vordefiniert - Create-Baustein - Bausteingruppen zusätzlich einfügbar - Bausteine abstrakt dargestellt 	<ul style="list-style-type: none"> - Animation auf zwei Arten: Modellbildungsansicht, 2-D perspektivische Ansicht, 2-D - Umfangreiche Statistiken nach der Beendigung der Simulation im Templatefenster - keine 3-D Ansicht 	<ul style="list-style-type: none"> - einfacher Modelllaufbau - umfangreiche Bausteinbibliothek
AutoMod	ProModel Corp.	<ul style="list-style-type: none"> - Simulator für kombiniert diskret-kontinuierliche Ereignisse - Applikationen für kontinuierliche Simulation - Rotation und Translation Selbststeuerung, Hersteilung, - Analysetool AutoStat - Optimierungstool ExpertFit 	<ul style="list-style-type: none"> - Modellerstellung in der Entwicklungsumgebung Simulation und 3-D Darstellung in der Simulationsumgebung - Prozess-System - Bewegungssystem(e) - simulator-eigene Syntax zur Modellprogrammierung - Schritte als Prozeduren programmiert 	<ul style="list-style-type: none"> - Windowsoberfläche - Symbolleisten mit Dropdown-Struktur - Drag&Drop Implementierung - Simulationsumgebung mit: Simulationsfenster, Statusanzeige, Informationsfenster mit Fehleranzeige - Work Area: Simulatormenü, Toolbar, Simulationsoberfläche, Modell 	<ul style="list-style-type: none"> - selbstgestellte oder importierte Objekte zur Implementierung - im Graphikeditor werden Objekte bearbeitet - Objektbibliothek - Graphikformate: VRML, Open Investor, sdk 	<ul style="list-style-type: none"> - drei Arten von Statistiken: zusammengefasste Statistik sortierte Statistiken Einzelstatistik - Statistiken dynamisch während der Simulation aufzeichnet und jederzeit abrufbar - Statistiken in Graphen darstellbar - 3-D animierte VR – Darstellung in Echtzeit - Film im AVI- oder MPEG- Format erstell- und exportierbar 	<ul style="list-style-type: none"> - einzigartiges Ansichtsmenü - stufenlose Zoomfunktion mit fast grenzenloser Vergrößerungs- und Verkleinerungsfunktion - Rotation und Translation um alle drei Achsen - Texte können an beliebigen Stellen eingefügt werden - Animationen können aufgezeigt und mit Programm AutoView abgespielt werden - freies zeitliches Vor- und Zurückspringen in der Simulation möglich

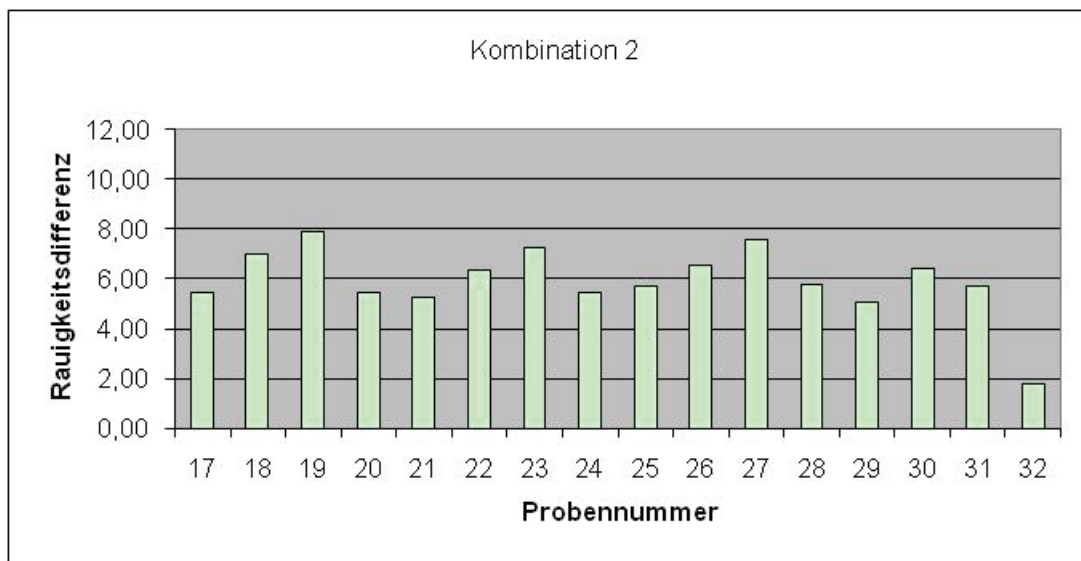
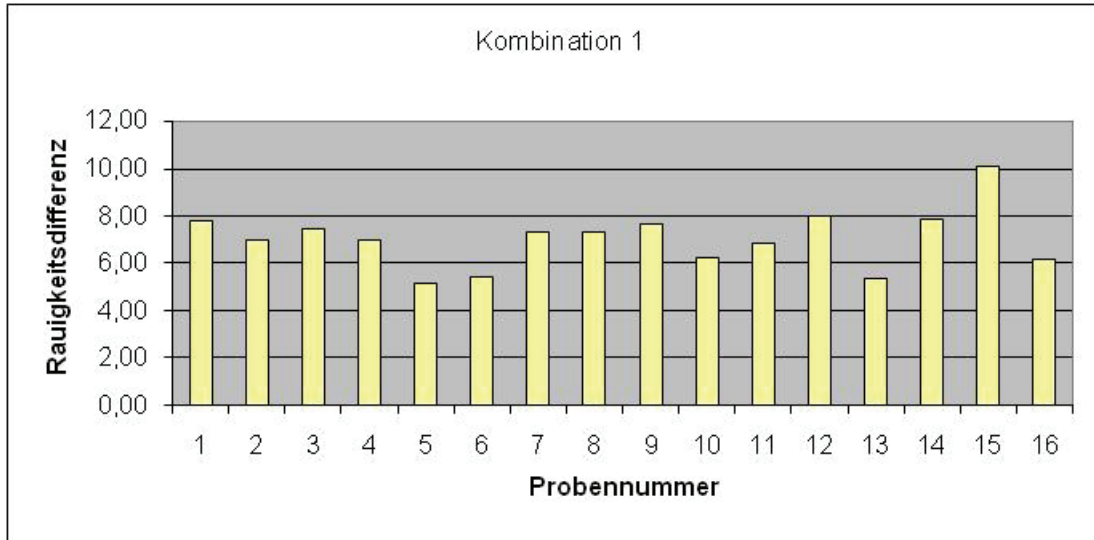
Tool	Anbieter	Systeminformationen allgemein	Modellierungs-philosophie	Simulationsumgebung, -oberfläche	Bausteinbibliothek	Ergebnisdarstellung	Besonderheiten
SIMUL 8	Simul8 Corp.	<ul style="list-style-type: none"> - Simulator für kombiniert diskret-kontinuierliche Ereignisse - Windows Betriebssysteme - OptQuest als Zukaufkomponente zur Optimierung 	<ul style="list-style-type: none"> - aus Bausteinen und Arbeitseinheiten - textuelle Programmierung möglich - einfaches Modell: Quelle, Arbeitsstation, Senke - VisualLogik fügt individuelle Regeln für Bausteine ein - Kopierfunktion - UNDO- und REDO Funktion 	<ul style="list-style-type: none"> - Windows orientierte Oberfläche aus drei Bereichen: Titel-, Symbol-, Menüleisten mit Buttons; graphisch oder textuell 	<ul style="list-style-type: none"> - wichtigste Bausteine in Symbolleiste dargestellt: Quellen (Work Entry Points), Lager (Storage Bin), Arbeitsstationen (Work Center), Fließbänder (Conveyor), Senken (Work Exit Points) - geringe Anzahl an Bausteinen - Bausteine können angepasst werden - Drag & Drop Programmierung - Entitäten (Work Items) nach Aussehen, Größe, Namen, Eigenschaften definierbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Darstellung einzelner Bausteine als Graph oder ausgewählter Bausteine im Gesamtbericht - 2-D-Animation - Ressourcen können unsichtbar gemacht werden - Export in Excel möglich - Bilder im dwg-, vdx-, xml-, bmp-, jpg-Format importieren 	<ul style="list-style-type: none"> - Pooling-Funktion - UNDO und REDO Funktion - Priorisierung
eM-Plant	Tecnomatrix Technologies Ltd.; Unigraphics Solutions GmbH	<ul style="list-style-type: none"> - Simulator für kombiniert diskret-kontinuierliche Ereignisse - Standardsoftware zur objekt-orientierten, graphischen und integrierten Modellierung, Simulation, Animation und Optimierung - unterstützt Windows Betriebssysteme NT 4.0, 2000, XP - unterstützt Vielzahl von Schnittstellen, wie SQL-, HTML-, COM-, ODBC- usw. 	<ul style="list-style-type: none"> - Quelle-Senke-System - Modellelemente in Simulationsfenster und automatische Verbindung - Vererbung der Eigenschaften der Bausteine - Ereignisverwalter bildet Abschluss der Modellierung und steuert und koordiniert die Durchführung der Simulation - Typologische Konventionen bei Speicherung und Namensgebung - toolinterne Sprache SimTalk 	<ul style="list-style-type: none"> - gerasterte Windowsoberfläche mit Drop-down Menüs und Drag&Drop - Bausteinimplementierung - Symbol- und Menüleisten auf Wünsche des Anwenders anpassbar - Hauptfenster: Bausteindateien verwalten - Organisation der Modelle - Bausteinpalette: Bausteine für Modell ablegen - Modelfenster: Modellerstellung - Klassenbibliothek - Hierarchisierung 	<ul style="list-style-type: none"> - Darstellung der Bausteine in Form von Piktogrammen - Menü zur Bausteinprogrammierung - Konstanten und lokale oder globale Variablen des Typs boolean, integer, real 	<ul style="list-style-type: none"> - animierte 2-D und 3-D Darstellung - Ansichten können parallel dargestellt werden, hin- und herschalten möglich - Zoomfunktion; 2-D - Freiflugansicht; 3-D - Objektorientierter Diagrammstil und Editor für 3-D - umfangreiche Objektbibliotheken - Videofilme im AVI-Format erzeugbar - Import (nicht maßstabstreu) von Graphiken (VRML, jpg, bmp, tif, img) und Texten möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Fehlerdefinition und prozentuale Verfügbarkeit - Zeitskalierung - Aufnahme von Videofilmen - Freier Flug durch 3-D Simulation - Übersetzer Deutsch-Englisch, Englisch-Deutsch

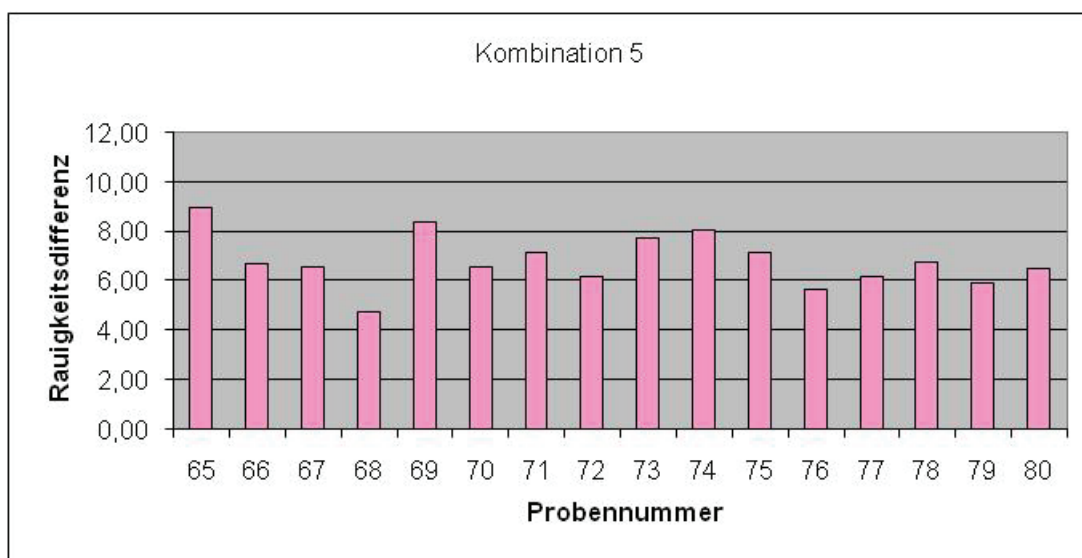
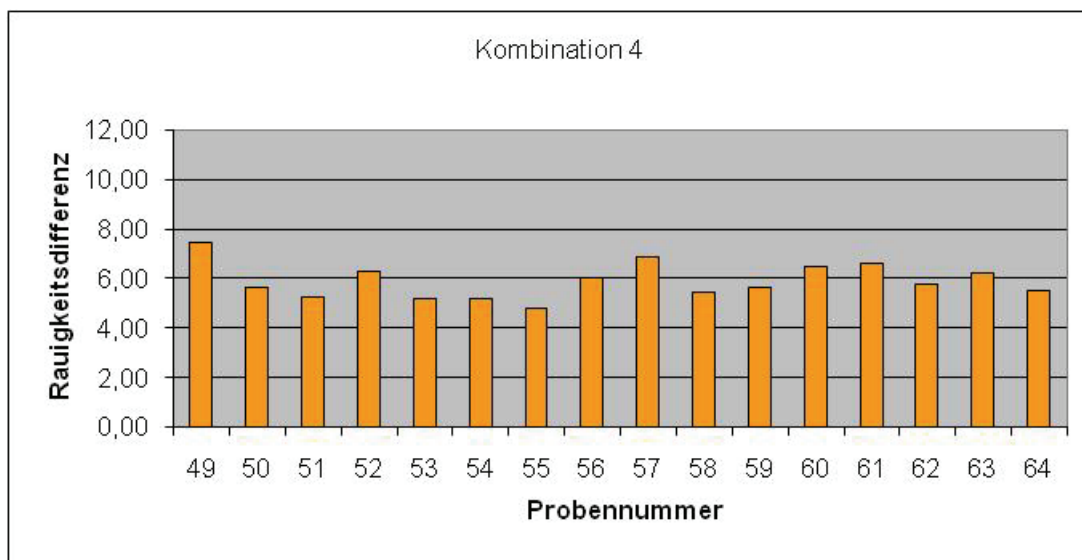
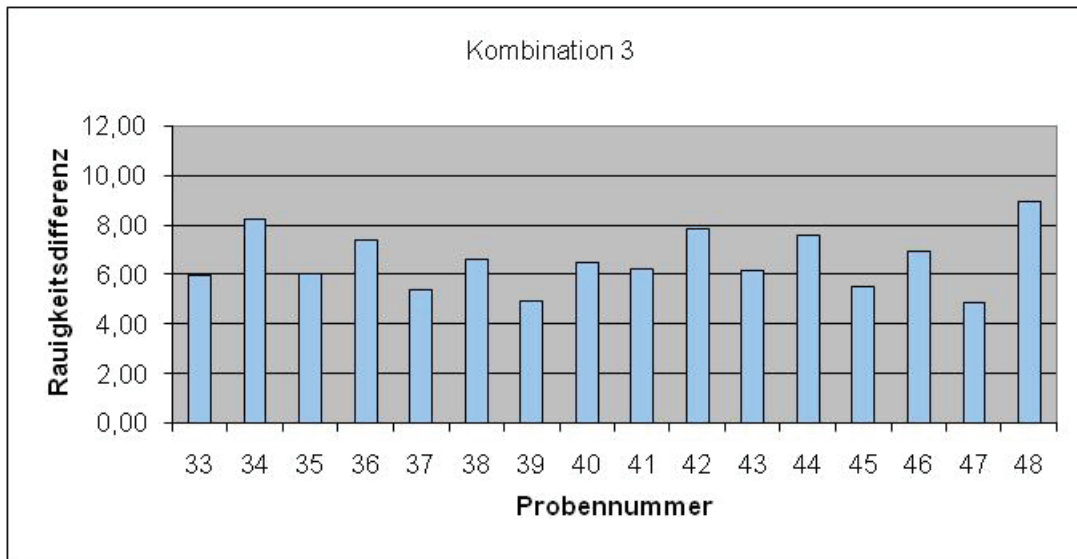
Tool	Anbieter	Systeminformationen allgemein	Modellierungsphilosophie	Simulationsumgebung, -oberfläche	Bausteinbibliothek	Ergebnisdarstellung	Besonderheiten
Extend	Imagine that Inc.	- Simulator für kombiniert diskret-kontinuierliche Ereignisse - unterstützt Windows und Power Mac Betriebssysteme - Erweiterungen: Proof Animation: automatisches Auffinden von statistischen Verteilungen ExpertFit: automatisches Auffinden der am besten geeigneten Verteilungen Stat.Fit: erzeugt automatisch Verteilungen	- auf Daten und Nachrichten basierende Architektur - Blockbibliothek unterteilt in verschiedene Bereiche, wie Discrete Event, Optimierung, Animation - UNDO-Funktion - REDO-Funktion - tooligene Sprache ModL (wie C) zur Block-Programmierung	- nicht gerasterte Windows-oberfläche mit Drop-down Menü und Buttons - drei Bedienelemente: Symbolleiste, Bausteinbibliothek, Modellierungsfenster - mehrere Blöcke durch Markierungsrahmen zu einem Block zusammenfassbar	- Bausteine durch Piktogramme dargestellt - umfangreiche Bausteinbibliothek - ist unbegrenzt erweiterbar - Klonen von Blöcken möglich	- Plot Blöcke werden an Blöcke individuell angebunden und wählen bereits bei der Modellerstellung Daten aus, die gesammelt werden sollen - tabellarische und graphische Darstellungsvarianten - Ergebnisse durch anklicken des Blockes - Schnittstellen: Paste Links: aktualisieren automatisch die Daten zw. Extend V5 und Microsoft Excel, Embedded ActiveX, OLE Objekte, ODBC, DLL - Einfügen von Graphiken und Texten möglich - 3-D Darstellung durch Extend Suite	- Höchstmaß an Flexibilität und Erweiterbarkeit - Eigenschaften und Variablen der Blöcke können während der Simulation verändert werden
Powersim Studio	Powersim Corp.	- Simulator für kombiniert diskret-kontinuierliche Ereignisse - beinhaltet Powersim Solver; Tool zur Optimierung und Durchführung von Sensitivitätsanalysen - Excel-, SAP-, Schnittstelle, - Simulationscockpit - Entwicklungspaket für Programmierer: Powersim Software Development Kit - unterstützt Windows Betriebssysteme 95, 98, MW, NT 4.0, 2000, XP	- Modell besteht aus Komponenten, Untermodellen, Ereignissen, Diagrammen, Einheiten, Bereichen - keine fertigungsspezifischen Faktoren existieren - Ausrichtung an physikalischen Einheiten und mathematischen Formeln - beliebige und permanente Variablen definierbar - Historie über Variablenwerte	- gerasterte Oberfläche mit Drop-down-Menüs und Drag&Drop Baustein-Implementierung - Symbolleisten, Projektfenster, Konstruktionsfenster, Diagrammleisten, Statusanzeige - Elemente in Baumstruktur dargestellt	- keine Bausteinbibliothek für vordefinierte Bausteine - Bezeichnung der Baustein-symbole frei definierbar durch physikalische Einheiten und mathematische Syntax - Bausteine: Konstante, Datenausgabeelement Level, Auxiliary, Variablen, Verbindungen (Flüsse), Wolke	- keine bekannte Animation, da Bewegung und Bearbeitung von Variablen - Animation von Zahlenwerten - Simulationslauf in Exportfile abspeichern oder importiert werden	- schließt keine Arten von Flüssen aus - zeigt keine Begrenzung im Umgang mit Flüssen - vielfältiges Einwirken auf die Entwicklung und Durchführung der Materialfluss-Simulation möglich
ProModel	ProModel Corp.	- Simulator für kombiniert diskret-kontinuierliche Ereignisse - SimRunner: Tool zur Optimierung - Stat.Fit: Tool zur graphischen Darstellung statistischer Auswertungen - unterstützt Windows Betriebssysteme 98, 2000, ME, NT, XP sowie Netware	- Verbindet Entwicklung von Modell und Animation - Modellierung komplett graphisch und objektorientiert - Variablenliste generiert und aktualisiert sich automatisch	- gerasterte Oberfläche - auf Windows basierende Applikation - graphisches Interface und objektorientierter Modellierungsstruktur - keine Programmiernotwendigkeit - Symbolleiste, Fenster mit Location-Daten, Fenster mit Graphik-Symbolen, Layoutfenster	- Bausteine repräsentieren physische (durch Namen oder Piktogramme dargestellt) oder logische Elemente - Bausteine als vordefiniertes dreidimensionales Bild eingefügt - Bibliotheksweiterung durch Importieren, Modifizieren und Auswählen von Bildern - Attribute, Variablen, Arrays, Macros, Unterprogramme, Sonderfunktionen, External Files; erstellen spezielle Entscheidungen oder Logiken	- tabellarische oder graphische Darstellung - Ergebnisse mehrerer Simulationsläufe in einem Graphen darstellbar - statistische Auswertung und Speicherung in Ergebnisdatenbank - 2-D und 3-D Graphiken mit Hilfe eines Editors zu erstellen und zu verändern	- COM Strukturen: Modelle von externen Subroutinen (Unterprogrammen) aus steuerbar - kann wie COM Objekt kontrolliert und von externen Applikationen (Excel, Powerpoint) gesteuert werden - Parallele Bearbeitung (mehrere Anwender am gleichen Modell) möglich, Erstellung des Gesamtmodells - Beurteilungsmöglichkeit nach Kostengesichtspunkten

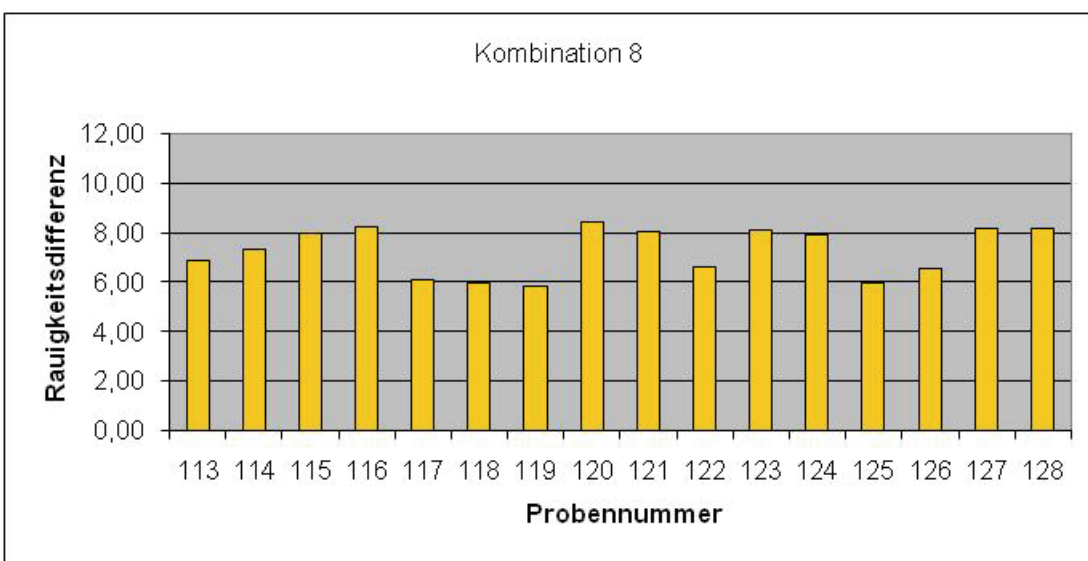
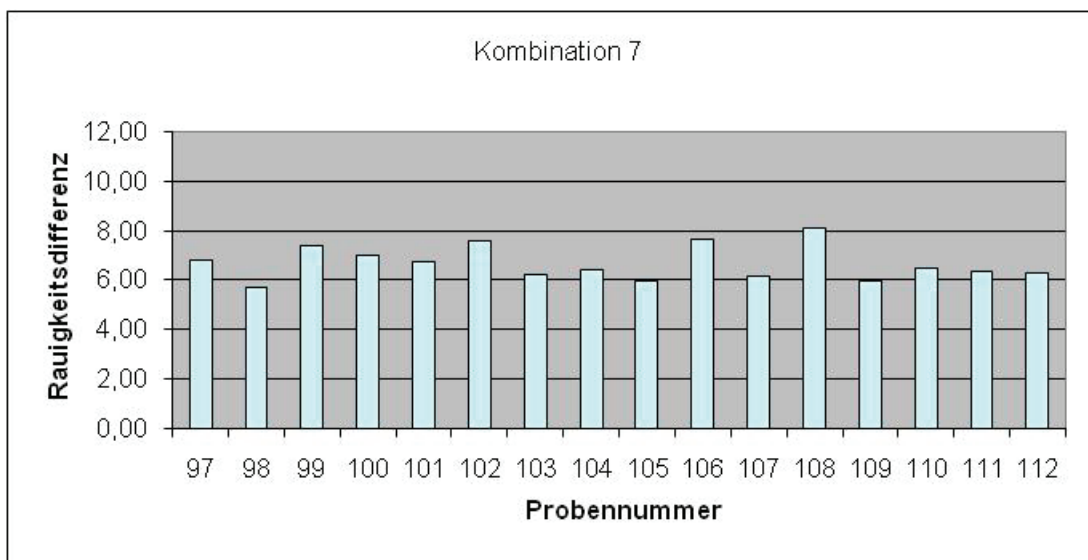
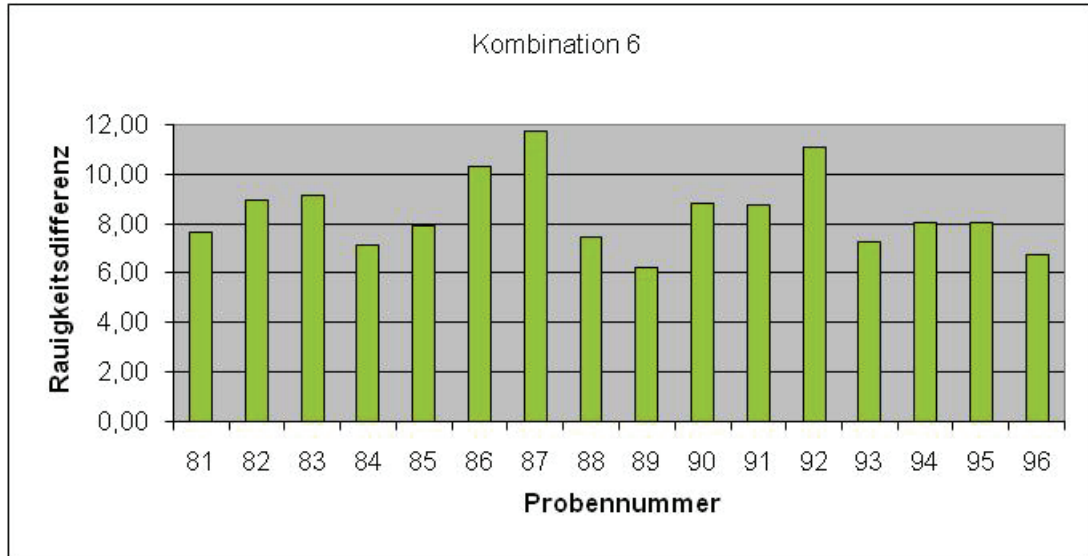
Tool	Anbieter	Systeminformationen allgemein	Modellierungsphilosophie	Simulationsumgebung, -oberfläche	Bausteinbibliothek	Ergebnisdarstellung	Besonderheiten
Quest	Delmia Corp.	<ul style="list-style-type: none"> - einfache Version: Quest Express - Systemanforderungen: Windows NT, UNIX - Erweiterung mit Simulationsmodellen aus anderen DELMIA-Modulen möglich - Anbindung an DELMIA Process Engineer zum „Product Life Cycle Management“ - OptQuest: stellt Algorithmen für effiziente Entwicklung von experimentellen Prozessen zur Verfügung - flexible, problemorientierte, strukturierte Quest-Sprache zur Modifizierung beliebiger Standardlogiken - Einsatz in MES-, ERP-, MRP-, PLC-Systemen etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - die Gesamtplattform ermöglicht eine komplette digitale Fabrikumgebung zur flexiblen objektorientierten und diskreten Ereignissimulation, Analyse, Visualisierung von Fertigungsflüssen - interaktive Optimierung der geplanten Anlage möglich - Simulation von Kosten (-verläufen) - Überprüfung, Analyse von Anlagenlayouts, Betriebsmittelzuteilung, Kanban, Dispositionsszenarien 	<ul style="list-style-type: none"> - Bedien-Buttons - Dialogfenster - kein interner Debugger - keine Hierarchiestufen und Teilmodelle - keine integrierte Entwicklungsumgebung 	<ul style="list-style-type: none"> - umfassende Bausteinbibliotheken (Fertigungsmittel, Fördermittel, Werker, Puffer, Lager, Verzweigungen, Zusammenführungen...) mit anwenderspezifischen Bibliotheken kombinierbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Modelle im PPR Hub (zentrale Datenbank) gespeichert - Simulationsergebnisse gleichzeitig mit Simulationslauf dargestellt - Darstellung als : Histogramm, Balken-, Kreisdiagramm, Zeitserienschaubilder, numerische Tabellen - Datenexport in Tabellenkalkulationen, Graphikpakete 	<ul style="list-style-type: none"> - Import- und Exportfunktionalitäten - 2-D Modelle - schnelle und einfache 3-D Modellierung - unmittelbare Visualisierung aller Modelländerungen
Witness	Lanner Group GmbH	<ul style="list-style-type: none"> - Simulator für kombinierte diskret-kontinuierliche Ereignisse - Witness Optimizer (Lösungsoptimierer), - Witness VR (3-D-Visualisierung) - Witness Miner (sucht nach Mustern und Regeln) - SIMBA (Verbesserung der Datenschnittstelle) - Witness Szenario Manager (automatisierte Durchführung von Szenarien) 	<ul style="list-style-type: none"> - vordefinierte Modelloberfläche - Elementebibliothek; Elemente definieren, selektieren, vordefinierte Darstellung wählen - Verknüpfungsregeln; Gruppe von Elementen durch Regeln miteinander verbunden; - Eingangsregeln, Ausgangsregeln, Werkerregeln - Regel-Dialog-Eingabe - Regel Editor - Interne Modellüberprüfung - Klonen von Modulen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - strukturierte vordefinierte Modelloberfläche - Microsoft Aufbauweise mit Drag&Drop Anordnung - Elementauswahl mit: Simulations-, Designer-, Systemelemente, Typ - Simulationsfenster, Uhr, Symbolleiste für Simulationslauf - Multilayer 	<ul style="list-style-type: none"> - umfangreiche Bausteinbibliothek: Diskontinuierliche Elemente, kontinuierliche Prozesselemente, angetriebene und freie Elemente, logische und graphische Elemente - Definition, Darstellung, Detaillierung eigener Elemente möglich - Simulationsverzeichnis aller Elemente besteht aus mehreren Ebenen in einer Baumstruktur - Elementarten: Designelemente, Systemelemente, Simulationselemente 	<ul style="list-style-type: none"> - Simulationsberichte für markierte Bausteine - Daten prozentual aufgelistet - Diagrammerstellung - 2-D- (und 3D-) Animation (Import von Graphiken (AutoCad...)) - eigene programminterne Graphiken erstellbar - Modell kann versandt werden - Simulationslauf kann im AVI-Format aufgenommen werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Schnelligkeit - Designbaukasten - Sprachenunterstützung: Englisch, Deutsch, Französisch, Japanisch - Im- und Exportmöglichkeiten (z.B. MS Excel, Access und allg. Textdateien)

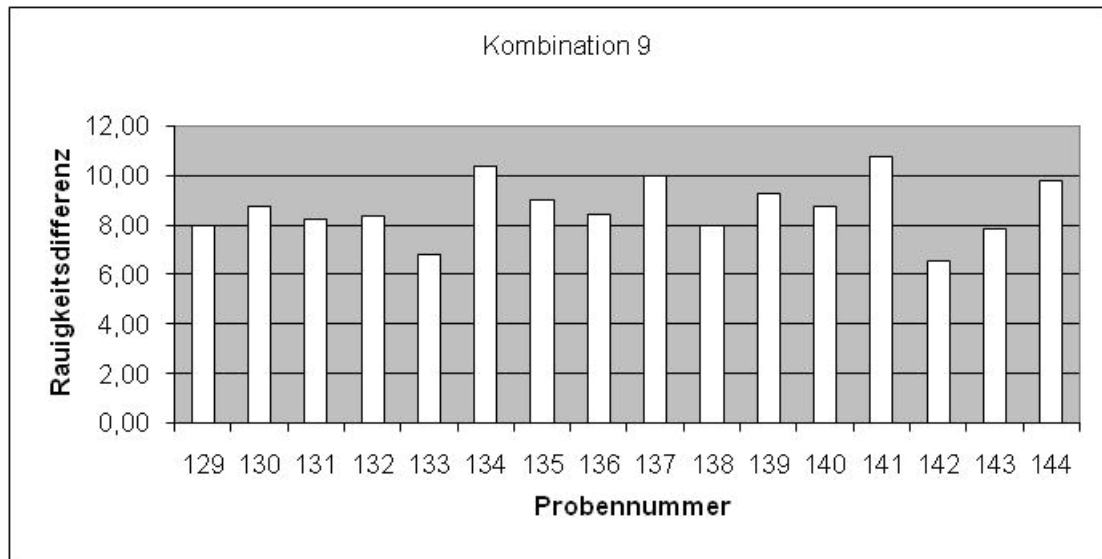
Anhang A2:

Messwertverteilung der Rauheitmessungen der neun Parameterkombinationen









Anhang A3:
Kostenberechnung

Lasersintern:

Einsatz [Tage]	220
Stunden pro Tag [h]	7
20% Gemeinkostenzeiten	0.02
<hr/>	
Planbeschäftigung [h pro Jahr]	1509.2
Wiederbeschaffungskosten [€]	350000
Nutzungsjahre	10
akt. Zinssatz = 3%	0.03
Instandhaltungssatz = 2.5%	0.025
Energiebedarf [kW]	5.5
Preis pro kWh [€]	0.1942
Leistungsausnutzung = 100%	1
<hr/>	
kalk. Abschreibungen [€ pro Jahr]	35000
kalk. Zinsen [€ pro Jahr]	5250
Instandhaltungskosten [€ pro Jahr]	8750
 	1611.97
Energiekosten [€ pro Jahr]	652
<hr/>	
	33.5356
Maschinenstundensatz Lasersintern [€/h]	325
	0.55892
Maschinenstundensatz Lasersintern [€/min]	721

Kugelstrahlen:

Energiebedarf [kW]	0.009
Wiederbeschaffungskosten [€]	3000
<hr/>	
kalk. Abschreibungen [€ pro Jahr]	300
kalk. Zinsen [€ pro Jahr]	45
Instandhaltungskosten [€ pro Jahr]	75
 	2.63777
Energiekosten [€ pro Jahr]	976
<hr/>	
	0.28004
Maschinenstundensatz Kugelstrahlen [€/h]	094
	0.00466
Maschinenstundensatz Kugelstrahlen [€/min]	735

Lager:

Wiederbeschaffungskosten [€]	350
<hr/>	
kalk. Abschreibungen [€ pro Jahr]	35
kalk. Zinsen [€ pro Jahr]	5.25
kalk. Zinsen [€ pro Jahr]	5.7978E-05
<hr/>	
	0.02666
Maschinenstundensatz Lager [€/h]	976
	0.00044
Maschinenstundensatz Lager [€/min]	45

Glasperlen:

Durchmesser D1 [€/h]	2.25
Durchmesser D1 [€/min]	0.0375
Durchmesser D2 [€/h]	2.65
Durchmesser D2 [€/min]	0.442
Durchmesser D3 [€/h]	3
Durchmesser D3 [€/min]	0.05

Anhang A4:

Trainingsdaten des SVM-Modells

Delta_Ra	Strahlzeit	Kosten	Label
7.82	1	0.70	Klasse1
7.00	1	0.70	Klasse1
7.48	1	0.70	Klasse1
7.01	1	0.70	Klasse1
5.15	1	0.70	Klasse1
5.40	1	0.70	Klasse1
7.31	1	0.70	Klasse1
7.35	1	0.70	Klasse1
7.69	1	0.70	Klasse1
6.21	1	0.70	Klasse1
6.88	1	0.70	Klasse1
8.01	1	0.70	Klasse1
5.35	1	0.70	Klasse1
7.87	1	0.70	Klasse1
6.20	1	0.70	Klasse1
5.44	2	1.50	Klasse2
7.00	2	1.50	Klasse2
7.88	2	1.50	Klasse2
5.48	2	1.50	Klasse2
5.25	2	1.50	Klasse2
6.38	2	1.50	Klasse2
7.28	2	1.50	Klasse2
5.44	2	1.50	Klasse2
5.73	2	1.50	Klasse2
6.53	2	1.50	Klasse2
7.56	2	1.50	Klasse2
5.76	2	1.50	Klasse2
5.09	2	1.50	Klasse2
6.44	2	1.50	Klasse2
5.70	2	1.50	Klasse2
5.94	10	4.40	Klasse3
8.27	10	4.40	Klasse3
6.01	10	4.40	Klasse3
7.40	10	4.40	Klasse3
5.41	10	4.40	Klasse3
6.62	10	4.40	Klasse3
4.90	10	4.40	Klasse3
6.49	10	4.40	Klasse3
6.23	10	4.40	Klasse3
7.82	10	4.40	Klasse3
6.18	10	4.40	Klasse3
7.61	10	4.40	Klasse3
5.53	10	4.40	Klasse3
6.96	10	4.40	Klasse3
8.97	10	4.40	Klasse3

5.66	1	0.80	Klasse4
5.26	1	0.80	Klasse4
6.29	1	0.80	Klasse4
5.19	1	0.80	Klasse4
5.17	1	0.80	Klasse4
4.83	1	0.80	Klasse4
6.02	1	0.80	Klasse4
6.88	1	0.80	Klasse4
5.42	1	0.80	Klasse4
5.63	1	0.80	Klasse4
6.48	1	0.80	Klasse4
6.63	1	0.80	Klasse4
5.77	1	0.80	Klasse4
6.22	1	0.80	Klasse4
5.53	1	0.80	Klasse4
8.94	2	1.70	Klasse5
6.68	2	1.70	Klasse5
6.56	2	1.70	Klasse5
8.37	2	1.70	Klasse5
6.58	2	1.70	Klasse5
7.12	2	1.70	Klasse5
6.21	2	1.70	Klasse5
7.71	2	1.70	Klasse5
8.04	2	1.70	Klasse5
7.18	2	1.70	Klasse5
5.65	2	1.70	Klasse5
6.15	2	1.70	Klasse5
6.77	2	1.70	Klasse5
5.91	2	1.70	Klasse5
6.52	2	1.70	Klasse5
7.59	10	5.00	Klasse6
8.93	10	5.00	Klasse6
9.12	10	5.00	Klasse6
7.12	10	5.00	Klasse6
7.91	10	5.00	Klasse6
10.26	10	5.00	Klasse6
11.73	10	5.00	Klasse6
7.41	10	5.00	Klasse6
8.77	10	5.00	Klasse6
8.72	10	5.00	Klasse6
11.03	10	5.00	Klasse6
7.23	10	5.00	Klasse6
8.00	10	5.00	Klasse6
8.04	10	5.00	Klasse6
6.73	10	5.00	Klasse6
6.75	1	0.90	Klasse7
7.36	1	0.90	Klasse7
7.00	1	0.90	Klasse7
6.74	1	0.90	Klasse7
7.55	1	0.90	Klasse7

6.17	1	0.90	Klasse7
6.37	1	0.90	Klasse7
5.94	1	0.90	Klasse7
7.60	1	0.90	Klasse7
6.15	1	0.90	Klasse7
8.08	1	0.90	Klasse7
5.92	1	0.90	Klasse7
6.47	1	0.90	Klasse7
6.31	1	0.90	Klasse7
6.26	1	0.90	Klasse7
6.86	2	1.90	Klasse8
7.33	2	1.90	Klasse8
7.94	2	1.90	Klasse8
8.21	2	1.90	Klasse8
6.11	2	1.90	Klasse8
5.93	2	1.90	Klasse8
5.84	2	1.90	Klasse8
8.40	2	1.90	Klasse8
8.00	2	1.90	Klasse8
6.61	2	1.90	Klasse8
8.07	2	1.90	Klasse8
7.89	2	1.90	Klasse8
6.55	2	1.90	Klasse8
8.13	2	1.90	Klasse8
8.18	2	1.90	Klasse8
7.98	10	5.60	Klasse9
8.76	10	5.60	Klasse9
8.24	10	5.60	Klasse9
8.34	10	5.60	Klasse9
10.36	10	5.60	Klasse9
8.99	10	5.60	Klasse9
8.41	10	5.60	Klasse9
10.02	10	5.60	Klasse9
7.99	10	5.60	Klasse9
9.27	10	5.60	Klasse9
8.78	10	5.60	Klasse9
10.79	10	5.60	Klasse9
6.52	10	5.60	Klasse9
7.82	10	5.60	Klasse9
9.81	10	5.60	Klasse9

Anhang A5:

Gridsearch-Verfahren

γ / C	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
0.001	92	91	90	55	20	21	24
0.01	92	91	88	32	24	24	24
0.1	92	91	90	53	51	49	51
1	92	90	90	90	92	92	92
10	91	89.6	90	91	92	92	92
100	91	89.6	90	91	91	92	92
1000	91	89.6	90	91	92	92	92

