

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse
am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**

Can Abay

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jean K. Gregory

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Heinzl

Die Dissertation wurde am 02.07.1999 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 27.09.1999 angenommen.

Can Abay

***Numerische Optimierung
multivariater mehrstufiger
Prozesse am Beispiel
der Hartbearbeitung von
Industriekeramik***

***herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

Herbert Utz Verlag



Forschungsberichte iw b

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iw b)

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 1999

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2000

ISBN 3-89675-697-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 - Fax: 089/277791-01

Geleitwort des Herausgebers

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren und Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozeß spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Produktentwicklung über die Planung von Produktionssystemen hin zu den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb*-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

SABIR ACIDIR AMA, MEYVESİ TATLIDIR.

Geduld schmeckt bitter, jedoch ihre Früchte umso süßer.

türkisches Sprichwort

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Joachim Heinzl, dem Leiter des Lehrstuhls für Feingerätebau und Mikrotechnik der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die in jahrelanger Kleinstarbeit dazu beigetragen haben, dass ein Kopf mehr zum Tragen kommt.

München, im Oktober 1999

Can Abay

Inhaltsverzeichnis

0	Tabelle der verwendeten Kurzzeichen und Indizes	V
0.1	Mathematische Abkürzungen	V
0.2	Lateinische und griechische Buchstaben	VII
0.3	Verwendete Indizes	X
1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Problemstellung	3
1.3	Zielsetzung und Vorgehensweise	5
2	Stand der Forschung und Technik	10
2.1	Anwendungsgebiete für die Industriekeramik	11
2.2	Wirtschaftssektor Industriekeramik	14
2.3	Relevante Fertigungsverfahren	17
2.3.1	Hartbearbeitung von Industriekeramik	17
2.3.2	Schleifen von Industriekeramik	22
2.3.3	Läppen von Industriekeramik	27

3	Bewertung des aktuellen Standes und	
	Ableitung des Handlungsbedarfs	37
3.1	Bewertung des Ist-Standes in der Optimierung von mehrstufigen Prozessen	37
3.2	Abgrenzung gegenüber anderen Arbeiten	41
4	Methoden zur mathematischen Beschreibung und Lösung des Optimierungsproblems	48
4.1	Allgemeiner Ansatz	48
4.1.1	Zieldefinition	48
4.1.2	Lösungsansatz	49
4.2	Numerische Methoden zur nichtlinearen Optimierung der Rauheitsfunktion	51
4.2.1	Methode der kleinsten Quadrate und X^e -Fit-Verfahren	52
4.2.2	Suche im Parameterraum	56
4.2.3	Gradientensuchverfahren	58
4.2.4	Entwicklungsverfahren	60
4.2.5	Levenberg-Marquardt-Verfahren	63
4.3	Optimierung der Wechselzeitpunkte mit Hilfe des Lagrange-Ansatzes und Ausgleichsalgorithmus	66
5	Versuchsdurchführung	70
5.1	Versuchsaufbau und -bedingungen	70
5.1.1	Schleifmaschine	71

5.1.2	Läppmaschine	72
5.1.3	Werkstücke	74
5.1.4	Messung der Werkstückoberflächen	75
5.1.5	Messung des Läppscheibenverschleißes	76
5.2	Randbedingungen	77
5.2.1	Parameter beim Schleifen S	78
5.2.2	Parameter beim Läppen L	80
5.2.3	Parameter des Polier-Prozesses P	81
5.2.4	Randbedingungen für Oberflächengüte und Abtrag	83
5.3	Versuchswerte	83
5.3.1	Variation der Stellparameter	83
5.3.2	Schleifwerte	84
5.3.3	Läppwerte	87
5.3.4	Polierwerte	90

6 Übertragung des mathematischen Modells

auf das Anwendungsbeispiel 94

6.1	Bestimmung der Ausgleichsfunktion nach dem Levenberg-Marquardt-Verfahren	98
6.2	Optimierung der Wechselzeitpunkte mit Hilfe des Lagrange-Ansatzes	106
6.3	Gütevergleich der gefundenen Optimalwerte	110

7	Zusammenfassung und Ausblick	112
8	Literaturverzeichnis	116

0 Tabelle der verwendeten Kurzzeichen und Indizes

0.1 Mathematische Abkürzungen

Mathematische Zeichen und Schreibweisen		Logische Zeichen und Schreibweisen	
=	Ist gleich	\Rightarrow	daraus folgt (Implikationsaussage)
$:=$	Ist definitionsgemäß gleich	\nRightarrow	daraus folgt nicht
\equiv	Ist definitionsgemäß gleich	\Leftrightarrow	zwischen äquivalenten Aussagen (Äquivalenzaussage)
\neq	Ist nicht gleich	$\Leftrightarrow:$	ist definitionsgemäß äquivalent
\approx	Ist ungefähr gleich	$\nLeftrightarrow:$	ist definitionsgemäß nicht äquivalent
\cong	Ist ungefähr gleich	\rightarrow	Implikationsverknüpfung; wenn, dann
\doteq	numerisch gleich	\leftrightarrow	Äquivalenzverknüpfung; wenn, dann und umgekehrt
$<$	Ist kleiner als	\wedge	und / sowohl, als auch
$>$	Ist größer als	\vee	oder / oder beide
\leq	Ist kleiner gleich	\neg	nicht (Negation)
\geq	Ist größer gleich	\mapsto	für Zuordnung und Übergänge
\nless	Ist ungleich kleiner	\forall	für alle, für jedes ; Allquantor
\ngtr	Ist ungleich größer	\exists	es existiert mindestens ein; Existenzquantor
\ll	Ist sehr klein gegen	\nexists, \exists_0	es existiert kein, für kein
\gg	Ist sehr groß gegen	\exists_1	es existiert genau ein; Existenzquantor
\nlesssim	Ist nicht kleiner als	$\ni -$	so, daß
\ngtrsim	Ist nicht größer als	$:$	so, daß
$ $	Ist Teiler von	\equiv	äquivalent, z.B. $f'(x) \equiv Df(x)$

Symbole für Mengen / -relationen/ -operationen			
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen	\mathbb{P}	$\mathbb{P}_0 \cup \mathbb{P}_1 \cup \mathbb{P}_2 \cup \dots$
\mathbb{N}_0	Menge der natürlichen Zahlen inclusive Null / $\mathbb{N} \cup \{0\}$	\mathbb{P}_n	Menge der Polynome vom Grad $\leq n$ in einer reellen/komplexen Variablen
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen	C^m [a,b]	Menge der auf [a,b] m-mal stetig differenzierbaren reellwertigen Funktionen
\mathbb{Q}	Menge der rationalen Zahlen	[a,b]	$\{x: x \in \mathbb{R} \wedge a \leq x \leq b\}$
\mathbb{Q}^+	Menge der positiven rationalen Zahlen	[a,b[$\{x: x \in \mathbb{R} \wedge a \leq x < b\}$
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen]a,b]	$\{x: x \in \mathbb{R} \wedge a < x \leq b\}$
\mathbb{R}^+	Menge der positiven reellen Zahlen]a,b[$\{x: x \in \mathbb{R} \wedge a < x < b\}$
\mathbb{R}_0^+	$\mathbb{R} \cup \{0\}$	\in	ist Element
\mathbb{R}^n	Menge der reellen n-Tupel und der Vektorraum dazu	\notin	ist nicht Element
$\mathbb{R}^{m,n}$	Menge der reellen nxm Matrizen	$=$	Mengengleichheit
\mathbb{C}	Menge der komplexen Zahlen	\subseteq	Teilmenge
$\not\subset$	Menge der nicht komplexen Zahlen	\subset	echte Teilmenge
$\emptyset, \{\}$	leere Menge	$\not\subset$	nicht Teilmenge

Symbole für Funktionsoperatoren			
\mathcal{L}	Lagrange-Funktion	A^T	transponiert
T_x	Taylorpolynom	A^H	adjungiert (transponiert und konjugiert komplex)
\mathcal{H}	Hesse-Matrix	A^{-T}	$(A^T)^{-1} = (A^{-1})^T$
∇	Nabla-Operator	A^{-H}	$(A^H)^{-1} = (A^{-1})^H$
\mathcal{J}	Jacobische Determinante	\mathcal{J}, I	$n \times n$ Einheitsmatrix (Identität)

0.2 Lateinische und griechische Buchstaben

α_i	Koeffizienten des Taylorpolynoms
A_e	Eingriffsquerschnitt
A_w	Werkstückfläche
a_e	Schnittweg
a_p	Schnittiefe
a_z	Abstand zwischen Haltermitte H und Wälzzentrum Z
β_i	Koeffizienten des Taylorpolynoms
b_n	Nutbreite
b_s	Stegbreite
γ_i	Koeffizienten des Taylorpolynoms
C_{abricht}	Abrichtkonditionen
c_k	Kornkonzentration
\varnothing	Durchmesser, allgemein
$d_{\text{wz/ws}}$	Durchmesser
d_G	Korndurchmesser
d_i	Eindringtiefe eines Korns in das Werkstück
δ	Koeffizient des Taylorpolynoms
F	Querkraftverlauf
F_c	aufgebrachte Schnittkraft
F_i	aufgebrachte Vorschubkraft
F_n	aufgebrachte Normalkraft
F_t	aufgebrachte Tangentialkraft

H	Werkstückhaltermitte
h	Abtrag, allgemein
\dot{h}	Werkstück-Abtragungsgeschwindigkeit
Δh	geforderter Abtrag am Werkstück
h_m	mittlere Abtragshöhe
K	Scheibenspezifikation (Körnung, Konzentration, Bindung, etc.)
k_c	spezifische Schleifkraft
λ	Lagrange-Koeffizient
μ_s	Kraftverhältnis beim Schleifen
μ	Reibungskoeffizient
ω_h	absolute Winkelgeschwindigkeit des Werkstückhalters um H
ω'_h	Winkelgeschwindigkeit des Werkstückhalters um seine Mitte H relativ zur Läppscheibendrehung
ω'_z	Winkelgeschwindigkeit der Werkstückhaltermitte H um Z relativ zur Läppscheibendrehung
Ω	absolute Winkelgeschwindigkeit der Läppscheibe
p	Druck beim Läppen
P_c	Schnittleistung
P_t	Profiltiefe
Q	Zeitspanvolumen
R_a	arithmetische Mittenrautiefe
R_m	mittlere Rautiefe
R_p	Profilrautiefe
R_t	Teilrautiefe
R_z	Rauhigkeit
S	sonstige Parameter

T	Prozeßtemperatur
t_a	Traganteil
$t_1 \dots t_n$	Zeitanteile $i=1 \dots n$
t	Prozeßzeit
t_h	Hauptzeit
ω	Winkelgeschwindigkeit
$\dot{\omega}$	bezogene Winkelgeschwindigkeit
v_c	Schnittgeschwindigkeit
v_f	Vorschubgeschwindigkeit des Werkstückes
W	Welligkeitstiefe
W_m	mittlere Welligkeitstiefe
W_p	Profilwelligkeitstiefe
x	Stellgröße
y	Ergebnisgröße
Z	Wälzzentrum

0.3 Verwendete Indizes

S, Schl	Schleifprozeß
SR	Schruppen
SL	Schlichten
L, Läpp	Läppen
LI	Läpp-Prozeß mit losem Korn
Lg	Läpp-Prozeß mit gebundenem Korn
P, Polier	Polierprozeß
i	Index Laufvariable
S	Index Schrittweite
gef	Index für die geforderten Endwerte
ges	Index für Gesamtgrößen
anf, 0	Index für Größen am Anfang des Fertigungsprozesses
end, ∞	Index für Größen am Ende des Fertigungsprozesses
WS	werkstückbezogene Größen
WZ	werkzeugbezogene Größen
abricht	Index für Größen bezogen auf den Abrichtprozeß

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Industriekeramik - Ein Schlagwort für ein High-Tech-Material mit sehr weiten Anwendungsfeldern. Sie liegt im Trend und hat in den letzten Jahren Auftrieb erhalten. Als Dichtungsscheiben in Wassermischbatterien, Zündkerzen, Zahnimplantaten etc. treffen wir sie in unserem Alltag an. Unbewußt leben wir mit der Keramik. Denn in vielen Gebieten der Industrie sind Hochleistungskeramiken in den technischen Prozeß involviert. So läuft der Faden unseres Hemdes über eine Keramikrolle oder die Schokolade schmiert in ihrem eigenen Herstellungsprozeß ein Keramikwälzlager. Industriekeramik bietet einen immensen Forschungsraum mit noch ungeahnten Anwendungen.

Wie immer entscheidet der Preis eines Produktes über seine Entstehung und seine Überlebenschancen. Kommen Metallalternativen nicht in Frage, dominieren die Vorteile der Industriekeramik über die höheren Herstellungskosten. Wird das System richtig abgestimmt, können die vermeintlich zu teuren Komponenten die Herstell- oder Betriebskosten jedoch erheblich reduzieren. Vor allem in der Serienproduktion relativiert sich der Kostennachteil beträchtlich.

Der Markt für technische Keramik besitzt ein hohes Wachstumspotential; dabei macht einen Hauptteil die Ingenieurskeramik aus. Sie repräsentiert mit einem steigenden jährlichen Wachstum eine der innovativsten Branchen in der Technik (Bild 1.1).

Der Herstellungsprozeß von Industriekeramik zieht sich über mehrere Schritte hinweg. Nach der Aufbereitung und dem Pressvorgang vom keramischen Pulver entsteht der kreideartige Grundkörper.

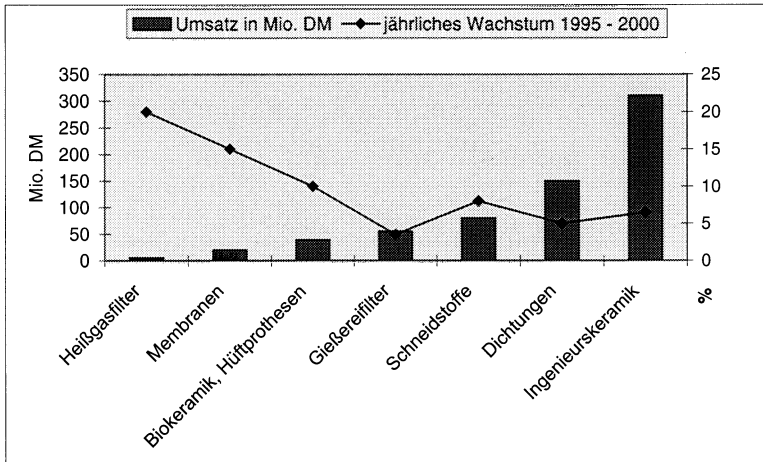


Bild 1.1: Weltweiter Markt für die technische Keramik (ENCERAM 1998).

Nach dem Pressen weisen die Teile eine nur geringe Härte auf und können in diesem Stadium leicht bearbeitet werden.

In der folgenden Grünbearbeitung wird die makroskopische Form des Bauteils gefertigt. Für die Grünbearbeitung kommen hauptsächlich Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide wie Drehen, Bohren, Fräsen zur Anwendung. Der keramische Grundkörper erlangt seine keramiktypischen Eigenschaften durch den nächsten Schritt, dem Sintervorgang. Bei Temperaturen zwischen 1600-1800°C werden im Sinterprozeß die Rohteile gebrannt; sie schrumpfen dabei in ihren Dimensionen.

Anschließend wird in der Hartbearbeitung durch Schleifen, Läppen und Polieren das Endmaß sowie die erforderliche Oberflächengüte erreicht. Bild 1.2 zeigt am Beispiel von Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Zirkonoxid (ZrO_2) den Fertigungsablauf.

Für die Hartbearbeitung ebener Werkstückoberflächen werden derzeit in der Industrie verschiedene mehrstufige Fertigungsprozesse verwendet, um die geforderten Oberflächengüten zu erzielen. Bei der Bestimmung der für eine

Bearbeitungsaufgabe optimalen Teilzeiten herrscht jedoch eine relativ hohe Unsicherheit. Zum Teil werden die Werkstücke direkt nach dem Schleifen auf Maß geläpft. Eine zeitliche Abstimmung einzelner Prozeßstufen und somit der gesamten Prozeßkette findet in der Industrie nicht statt.

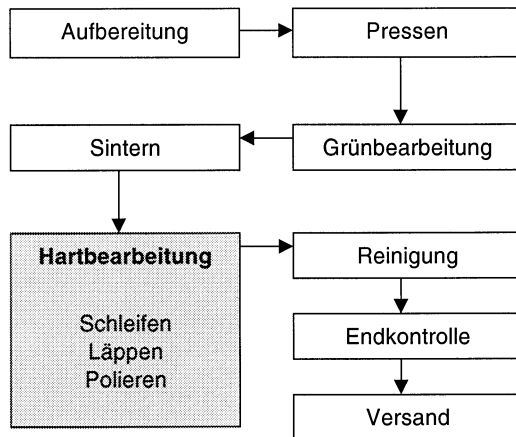


Bild 1.2: Fertigungsablauf in der Keramikbearbeitung.

1.2 Problemstellung

Die Industriekeramik ist kein klassischer Werkstoff in der heutigen Fertigungslandschaft. Man versucht aber die bestehenden klassischen Fertigungsverfahren und Denkweisen auf die Keramik zu projizieren. Teilweise können konventionelle Verfahren angewandt werden, doch in den meisten Fällen, v. a. in der Hartbearbeitungsstufe der Industriekeramik muß ein Umdenken erfolgen. Neue Fertigungsverfahren und neue wirtschaftliche Ansätze werden die Keramikprodukte gegenüber ihren konventionellen Mitstreitern konkurrenzfähiger machen.

Durch die hohe Härte des zu bearbeitenden Werkstoffs können nur Werkzeuge in Einsatz kommen, die einen extremen Verschleißwiderstand besitzen. Werkzeuge mit guten Härte- und Verschleißigenschaften sind beispielsweise CBN, SiC oder Diamant. Zwar wird die Bearbeitung von Hartstoffen durch diese Werkzeuge ermöglicht, jedoch entstehen mit steigender Bearbeitungszeit in den Einzelprozeßstufen hohe Kosten für Werkzeuge und Schmierstoffe.

Bei einer mehrstufigen Fertigungsfolge muß berücksichtigt werden, daß der jeweils vorhergehende Fertigungsschritt den Prozeßablauf und damit die Zeiten des nachfolgenden Fertigungsschrittes beeinflußt, d. h. für eine wirtschaftliche Fertigung müssen die in Frage kommenden Fertigungsverfahren zeitoptimal aufeinander abgestimmt werden. Der Ermittlung zeitlich aufeinander abgestimmter Fertigungsfolgen ist weitaus mehr Bedeutung beizumessen, als der getrennten zeitlichen Optimierung der einzelnen Fertigungsprozesse.

Der Fertigungsplaner muß anhand spezifizierter Richtlinien für die Fertigungsreihenfolge und für die Gesamt- und Teilbearbeitungsdauer von Industriekeramik Entscheidungen treffen können. Für einen Planer ist es unzumutbar aus der großen Vielfalt von Bearbeitungsmöglichkeiten durch Kalkulation ein optimales Ergebnis zu erzielen. Vor allem wenn kleine und mittlere Losgrößen zu fertigen sind, muß eine schnelle, flexible Entscheidungsfindung mit hoher Treffsicherheit vorliegen. Hier besteht ein wesentlicher Bedarf an der Verbesserung der bisherigen Planungsmethode, indem man durch ein Optimierungstool ein wesentlich größeres Parameterfeld durchsucht, Kombinationen auf Ausschluß oder Machbarkeit prüft und die optimalen Wechselzeitpunkte in der Prozeßkette errechnet. Einsatzfähige Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung fehlen bislang.

Durch den Mangel an entscheidungsunterstützenden Hilfsmitteln werden derzeit überflüssige Bearbeitungszeiten in Kauf genommen. Gerade in der

Serienproduktion von Industriekeramik entstehen dadurch hohe Fertigungskosten. Die Bestrebung einzelner Abteilungen, die Güte der Fertigung in ihrem Zuständigkeitsbereich optimal gestalten zu wollen, führt meist zu einer übertriebenen Oberflächengüte. Die Möglichkeit durch Vorverlagerung eines Umschaltzeitpunktes eine günstigere Gesamtfertigung zur erreichen wird derzeit nicht untersucht.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Verbesserung der Entscheidungs- und Planungsprozesse in der Hartbearbeitung von Industriekeramik ist ausschlaggebend für das optimale Zusammenspiel von Teilprozessen. Die Voraussetzung hierfür ist die Erarbeitung einer Methode zur Bestimmung der minimalen Bearbeitungsdauern in den Einzelprozessen der Fertigungskette, und derer einfacher, sowie möglichst universeller Anwendbarkeit. Durch Erkenntnisse aus der institutseigenen Praxis und vergleichbare Ergebnisse aus der Industrie kann das praxisnahe Wissen bezüglich der Hartbearbeitung zur Geltung kommen. Um die beobachteten Einflüsse in der Hartbearbeitung evaluieren zu können, bedarf es eines speziellen auf die Endbearbeitung abgestimmten Bewertungsschemas. Die Kombination der Fertigungsabfolgen und Gewichtung einzelner Einflüsse führen letztendlich zu der Auswahl des richtigen Ansatzes für eine Optimierung.

Der Begriff der Optimierung ist umfassend. Er kann bedeuten, daß ein möglichst gutes Ergebnis unter Einhaltung einer oder mehrerer Randbedingungen für einen bestimmten Hergang erzielt werden soll. In der vorliegenden Arbeit ist der Hergang als „mehrstufiger Prozeß“ definiert. Eine weitere Tatsache ist, daß das tatsächliche Optimum nur dann erreicht werden kann, wenn ein status quo der Umgebung erzwungen wird. Sonst verschiebt sich das Optimum temporär. Für eine Optimierung müssen die Randbedingungen geklärt und ein gewisses Toleranzfeld aufgespannt

werden. Ein Hilfsmittel, das speziell auf die Herstellung der Keramik und zwar in der Hartbearbeitungsphase abgestimmt ist, muß die Randbedingungen kennen, bevor es die zeitoptimale Abfolge errechnet.

Die Ausgangsgrößen der einzelnen Fertigungsstufen hängen direkt bzw. indirekt von ihren Eingangsgrößen ab. So unterliegt die Änderung der Oberflächengüte während des Bearbeitungsvorganges direkten Abhängigkeiten, die sich über die Prozeßparameter einstellen lassen. Herkömmliche einstufige Prozeßanalysen liefern zwar eine Aussage über die zeit- oder kostenoptimalen Einstellungswerte zur Erzielung der geforderten Oberflächengüte, basieren aber auf vordefinierten mathematischen Funktionen, deren Gültigkeitsbereich von vorneherein eingeschränkt ist. Haupteinflußparameter werden zum „Verursacher“ der Abhängigkeiten deklariert und innerhalb einer Wahrscheinlichkeitsspanne Voraussagen getroffen. Als Ergebnis von Prozeßanalysen werden mathematische Formeln geliefert, die den eingeschränkten, abstrahierten Zustand global definieren. Die statistische Trefferquote hängt wiederum von Qualität und Anzahl der Versuche ab. Das Zusammenspiel zwischen Breite und Tiefe der angelegten Versuche entscheidet die Güte der Voraussagen bei der Erzeugung von Prozeßformeln. Der Aufwand für eine weitreichende Untersuchung kann allenfalls einmal angestrebt werden. Die Flexibilität, auf neue Abhängigkeiten zu reagieren, ist eingeschränkt. Weiterhin läßt sich durch einzelne Prozeßanalysen nicht auf das Gesamtzeitverhalten einer Verkettung schließen.

Einer zeitlichen Prozeßkettenauslegung ist im allgemeinen eine Kosten- und Kapazitätplanung vorlagert. Die Arbeiten von HUBER (1995) bilden die Basis für die Arbeitsfolgeplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung. Die Kostenplanung und Kapazitätsauslastung wurde hier bereits weitgehend optimiert. In einem zweiten Schritt müssen die gefundenen Arbeitsfolgen zeitlich aufeinander abgestimmt werden.

Primärziel der Arbeit ist somit die Entwicklung einer mathematischen Methode und deren fallbezogene Anwendung in Hinsicht auf die zeitoptimale Gestaltung mehrstufiger Prozesse.

Ziel ist es nicht, eine Prozeßanalyse für die einzelnen Fertigungsschritte in der Hartbearbeitung durchzuführen, zumal das in der einschlägigen Literatur bereits erfolgt ist (Kapitel 2.3). Vielmehr sollen anhand von realen Werten aus den Einzelprozeßstufen mathematische Funktionen für das typische Prozeßverhalten gefunden werden. Das „Einfrieren“ eines dem Modellprozeß unmittelbar vorangegangenen Realprozesses gewährleistet die situationsnahe Beurteilung von prozeßspezifischen Abhängigkeiten. Nicht nur die direkten Abhängigkeiten von den Prozeßhaupt- und Nebeneinflußgrößen, sondern auch statistische Ausfälle durch die Maschinen- oder Werkzeuggegebenheit, Schwingungseinflüsse, Verzerrungen durch Werkstück-, Werkzeugwechsel etc. beeinflussen das Ergebnis.

Da es sich bei den Hartbearbeitungsverfahren ausschließlich um quasistationäre Fertigungsvorgänge handelt, müssen geeignete Parameter gefunden werden, um eine Optimierung am Rechner sinnvoll gestalten zu können. Diese Parameter sind stets empirischen Charakters.

Ein mittlerweile anerkanntes Bearbeitungsverfahren in der Keramik-Hartbearbeitung ist das Läppen mit gebundenem Korn. Auch wenn bei der Nomenklatur Differenzen vorliegen - die Palette reicht von "Schleifen mit Läppkinematik" über „Feinschleifen“ bis zum „Flachhonen“ -, sind Hersteller und Anwender von dem unverzichtbaren Einsatz dieses Verfahrens überzeugt. In der vorliegenden Arbeit wird das Läppen mit losem Korn der besseren Unterscheidung wegen als Polieren bezeichnet. Ähnliche Abtragsgeschwindigkeiten und entstehende Oberflächentopographien gestatten diesen Vergleich.

Eine Weiterführung dieses Verfahrens bildet das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Hochdruckläppen. Mit der Druckerhöhung gelingt es hohe

Abträge bei läpptypischen Oberflächen zu erzielen. Durch dieses Verfahren wird ein partielles Ziel, nämlich die Verkürzung der Fertigungskette erreichbar.

Die Struktur der Arbeit basiert auf einer systemtechnischen Vorgehensweise. Komplexe technische Vorgänge lassen sich durch die Systemtechnik erfassen. Unter diesem Begriff versteht man die Anwendung kybernetischen Denkens zur Lösung kybernetischer Aufgaben. Sie beinhaltet die Konkretisierung der abstrakten Systemtheorie auf vorgegebene, physikalisch oder physiologisch zu kennzeichnende Systeme und schließlich die planmäßige Verwirklichung solcher Systeme zur Erfüllung vorgegebener Zwecke (SPUR 1972).

Unter dem Wort System (griechisch: das Zusammengestellte) versteht KLAUS (1968) „eine Menge von Elementen und eine Menge von Relationen, die zwischen den Elementen bestehen“. Die Methodenlehre oder Systemtechnik (englisch system engineering) gestattet systematisiertes funktionelles Ordnungsdenken, Inhalt und Bestand jeder ingenieurwissenschaftlichen Tätigkeit. Die charakteristische Vorgehensweise der Systemtechnik kann nach ZANGENMEISTER (1970) in folgende Phasen gegliedert werden (Bild 1.3):

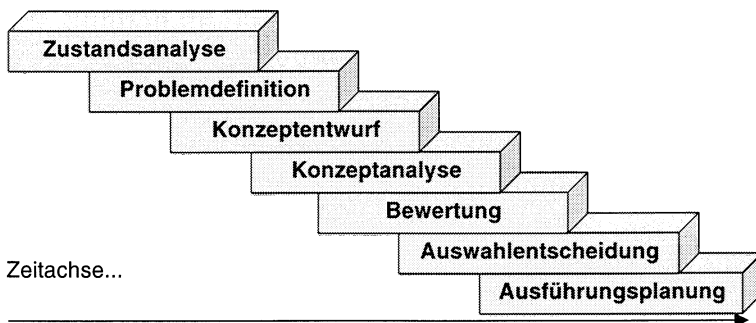


Bild 1.3: Gliederung der systemtechnischen Vorgehensweise nach ZANGENMEISTER (1970).

In den Kapiteln 1 bis 3 werden Ist-Stand, Defizite und die Folgerung der Problemdefinition abgeleitet. Es wird der aktuelle Handlungsbedarf aufgezeigt. Der Konzeptentwurf und die Konzeptanalyse in Kapitel 4 werden dann fallspezifisch angewandt (Kapitel 5 und 6). Die anschließende Bewertung und fallbezogene Auswahlentscheidung rechtfertigt die Anwendbarkeit der mathematischen Methoden zur Optimierung der Umschaltunkte in der Hartbearbeitung der Industriekeramik.

2.1 Anwendungsgebiete für die Industriekeramik

Stetig steigen die Anwendungs- und Einsatzgebiete der Industriekeramik. Gleitringdichtungen, Wasserdichtscheiben, Anwendungsgebiete in der Automobil- und Textilindustrie sind nur einige Beispiele (FANZOTT 1987, BURGMANN 1988, MÖRGENTHALER 1994, SCHNEIDER 1996, WEMHÖNER 1994, WEMHÖNER 1996, SPUR 1989). Tabelle 2.2 stellt dar, in welchen Bereichen der Technik keramische Produkte zum Einsatz kommen. Technische Keramik wird zu einem großen Teil hartbearbeitet um die geforderten Funktionstoleranzen erfüllen zu können. So ist die Hartbearbeitung für die Herstellung von Dichtungsscheiben, Gleitringdichtungen, Schneidwerkzeugen, Ventile, etc. unumgänglich.

Bereich / typische Bauteile	Vorteile der Keramik	Werkstoffe
Motorenbau Wärmeisolationen im Motorenbereich, Ventilsitze, Ventile, Turboladerrotoren, Gasturbinen, Zündkerzen, Lambda-Sonden, Katalysatorträger	Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit, niedriges spezifisches Gewicht, spezifische elektrische Eigenschaften	Aluminiumoxid, Aluminiumtitanat, Siliciumcarbid, Siliziumnitrid, Zirkonoxid
Elektrotechnik/Elektronik/ Optik Substrate für integrierte Schaltungen, Isolierteile, Kondensatoren, Sensoren, Na-Dampflampe, Lasermaterialien, Magnete	spezielle elektrische und magnetische Eigenschaften	Aluminiumoxid, Aluminiumnitrid, Titandioxyd, Titanate, Ferrite
Werkstoffbearbeitung Schneidwerkzeuge, Schleifscheiben, Sandstrahldüsen	Verschleißfestigkeit, Härte	Aluminiumoxid, Siliziumnitrid, Siliciumcarbid, Borcarbid

Verfahrenstechnik chemischer Apparatebau, Gleitringe, Armaturenteile, Papiermaschinenbeläge, Fadenführer, Drahtziehkonen	Korrosionsbeständig- keit, Verschleiß- festigkeit, chemische Beständigkeit	Aluminiumoxid, Siliziumoxid, Siliciumcarbid, Titandioxid, Zirkonoxid, Graphit
Hochtemperaturtechnik Brenner, Schweißdüsen, Wärmetauscher, Schutzrohre, Tiegel, Heizleiter	Temperaturbeständig- keit, Korrosions- beständigkeit, Wärmeleitfähigkeit	Siliziumnitrid, Siliciumcarbid, Aluminiumoxid, Kohlenstoff, Bornitrid, Molybdändisilizid
Medizinische Technik Hüftgelenke, Knochenersatz, Dentaltechnik	mechan. Festigkeit, Oberflächengüte, Körpervertäglichkeit	Aluminiumoxid, Calciumphosphat
Energietechnik Kernbrennstoff, Festkörperelektrolyt	Strahlenbeständigkeit, Ionenleitfähigkeit	Uranoxid- Plutoniumoxid, β -Aluminiumoxid

Tabelle 2.2: Einsatzgebiete der Industriekeramik nach FANZOTT (1987).

Die Elektroindustrie ist der Hauptabnehmer für technische Keramik. Aluminiumoxid, Aluminiumnitrid, Titandioxid, Titanate und Ferrite werden wegen ihrer günstigen elektrischen Eigenschaften als Werkstoff zum Beispiel für Substrate für integrierte Schaltungen, Isolierteile, Kondensatoren, Sensoren und Magnete benutzt.

Durch Sol-Gel-Korunde wird zum Beispiel die Herstellung von hochwertigen piezoelektrischen Fasern möglich (KÖNIG & LUDEWIG 1995, MILLER 1998). In der Vielschichttechnik gelang es, die Einzellagendicke durch konsequente Kontrolle und Optimierung der gesamten Prozeßtechnik bis auf 5 μm zu reduzieren. So wurde der erste Schritt zu keramischen Niedervolt-Kondensatoren höchster Kapazität getan (KEMPTER 1994).

In der Hochtemperaturtechnik spielt die Temperaturbeständigkeit der Keramik naturgemäß eine wichtige Rolle, ebenso wie die Korrosionsbeständigkeit und die Wärmeleitfähigkeit. Feuerfestmaterialien stellen die zweitgrößte Gruppe im Markt der technischen Keramik dar (Lutz 1988). Die Hartbearbeitung nimmt in oben genannten Produkten nur in bestimmten Fällen eine vorrangige Rolle ein.

Anders ist es bei keramischen Produkten, die Funktion geometrien besitzen, die genau bearbeitet sein müssen. Aluminiumoxid-Segmente können quadratmetergroße Flächen in diversen Anwendungen vor Verschleiß schützen. Keramische Schneidstoffe ermöglichen hohe Zerspanungsleistungen. In der Medizintechnik kommen vermehrt Prothesen aus Keramik zum Einsatz. Chemische Filter aus keramischer Wabenstruktur sind in der Verfahrenstechnik unverzichtbar (ZINS 1998). Keramische Wälz- und Gleitlager ertragen hohe Flächenpressungen und neigen nicht zum Fressen (WEMHÖNER 1994, WEMHÖNER 1996). In der Lebensmittelherstellung führen ölgeschmierte Metallager zu einer komplizierten und aufwendigen Konstruktion der Produktionsmaschinen, denn die Nahrungsmittel dürfen auf keinen Fall durch Öl verunreinigt werden. Bei keramischen Lagern können die Flüssigkeiten direkt durch die Pumpen geschleust werden, sie reichen als Kühlschmiermittel aus. Keramische Kugellager sind auch unverzichtbar in aggressiven Umgebungen, wie in Pumpen für Flüssigwasserstoff im Space Shuttle oder in Flüssigkeitsbädern (MILLER 1998).

Im Automobilbau werden vermehrt Gleitringe und Gleitringdichtungen in Wasserpumpen eingesetzt (BURGMANN 1988). Generell kommen Rotoren und Exzenter aus Keramik in Pumpen vor (NETZSCH 1997, VIT 1997). Keramische Kipphebel und Turbinenräder in Versuchsfahrzeugen der deutschen Automobilindustrie bewähren sich in Langzeittests. Verbrauchswerte und Schadstoffemissionen werden beachtlich reduziert. Kurzfaserverstärkte C/SiC eignet sich zum Beispiel wegen seiner hohen Temperaturwechsel-

beständigkeit bis 2000 K/s für Reibbeläge bzw. Bremsen von Nutzfahrzeugen und Hochgeschwindigkeitszügen.

Doch die typischste Anwendung von Industriekeramik im Automobilbau ist das im Vergleich zu Stahl leichtere Keramikventil. Während vor zehn Jahren nur erste Prototypen erzeugt wurden, könnte man heute mit verschleißfesten, tribologisch günstigen Ventilen in Serie gehen. Ventiltoleranzen im μm -Bereich sind bereits Stand der Technik (FLACKE 1997). Auch ihre Prüfung ist beherrschbar. Durch röntgenographische Untersuchungen kann man kleinste Inhomogenitäten im Ventil erkennen (NICHOLSON 1992, MILLER 1998). Schwankende Werkstoffeigenschaften, Entwicklung leistungsfähiger Metalle, die eine geringe Dichte mit hoher Duktilität kombinieren, und mangelnde Wirtschaftlichkeit in der Herstellung keramischer Komponenten sind allerdings häufig zitierte Gründe, die gegen einen Einsatz keramischer Komponenten im Automobilbau sprechen KLOCKE U. A. (1995).

2.2 Wirtschaftssektor Industriekeramik

Die Industriekeramik hat sich auf dem Markt etabliert. Knapp 10% des Weltumsatzes mit keramischen Produkten, der etwa für alle Arten von keramischen Produkten bei 140 Mrd. DM liegt, wird in Deutschland erwirtschaftet. Der Umsatz mit keramischen Bauteilen wächst jährlich stetig um 6%. Dieses beachtliche Marktpotential teilen sich rund 680 Firmen mit 70000 Beschäftigten.

Grob unterteilt man die technische Keramik in Konstruktionskeramik (Stichworte: hart, chemisch, inert) mit weltweit jährlich 5 Mrd. DM Umsatz und in Funktionskeramiken mit speziellen elektrischen Eigenschaften, z. B. Piezokeramiken, mit 20 Mrd. Umsatz. Hinzu kommen weitere 5 Mrd. DM, die der Konstruktionskeramik zuzuordnen sind. Zu nennen sind hier Produkte für Bauteile, die hoch abriebfest, extrem hitzebeständig und gegen Chemikalien

resistent sind, wie Schneidwerkzeuge, Bremsteile, Motorenventile, Katalysatorträger, Textilwalzen usw. (GREIL & MENZLER 1998).

Nach einer Studie von EN CERAM (1998) wird die Elektronik - Keramik (Isolatoren, Kondensatoren, Widerstände, Magnete, Piezokeramik, etc.) auf 2,5 Mrd. Dollar geschätzt. Japan und USA bestreiten bei der technischen Keramik zusammen etwa 70% der Weltproduktion (BITTERMANN 1997A). In Europa hat Deutschland eine vorrangige Stellung.

Gründe für den lang anhaltenden Einführungsprozeß der Keramik sind sowohl auf technischer als auch auf wirtschaftlicher Seite zu suchen - angefangen bei den Werkstoffeigenschaften und der Werkstoffherstellung über den Formgebungs- und Sinterprozeß bis hin zur Endbearbeitung und Prüfung der Bauteile. Die Endbearbeitung bzw. Hartbearbeitung verursacht als kostenkritischer Herstellungsprozeß bis zu 85% der Bauteilkosten (KLOCKE U. A. 1995). Bild 2.3 zeigt die Kostenstruktur keramischer Komponenten. Es wird auch deutlich welchen Minimum-Maximum-Schwankungen die Kosten je nach Anwendungsfall und Bauteil unterliegen.

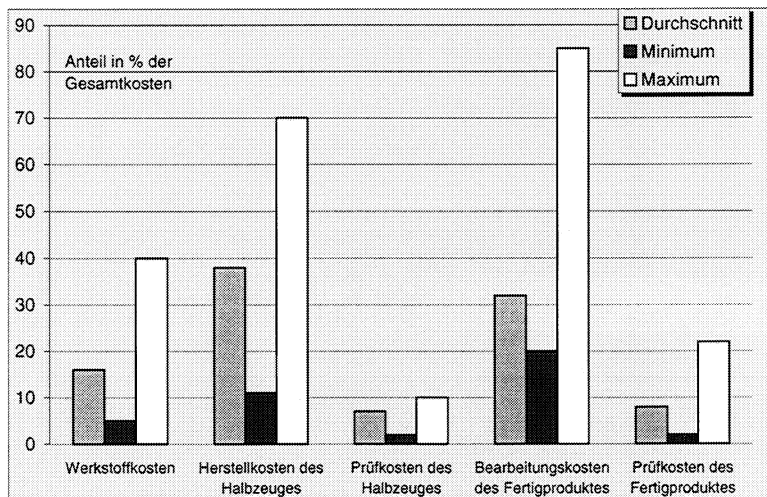


Bild 2.3: Kostenstruktur keramischer Komponenten.

High-Tech-Keramik kann teilweise aus dem Baukasten maßgerecht gezüchtet werden. Dies eröffnet die Möglichkeit für Keramiken mit kombinierten Eigenschaften und setzt die Herstellungskosten um einen deutlichen Anteil herab. Dank Near-Net-Shape-Techniken entfällt weitgehend die Hartbearbeitung als Endstufe des keramischen Herstellungsprozesses bei zahlreichen Anwendungen. So muß eine Zündkerze oder ein Isolator in den seltensten Fällen nachbearbeitet werden. Die Richtlinie, wenn möglich auf die Nachbearbeitung zu verzichten (ZINS 1998), kann bei höchstgenauen keramischen Komponenten nicht eingehalten werden. Da in dieser Arbeit nur der Anteil von höchstgenau und hart zu bearbeitender Keramik, sprich der Industriekeramik von Interesse ist, wird die Sanitär-, Isolator-, Elektro-, Chemo-, Hochtemperatur- und Katalysatorkeramik ausgeklammert. Die Industriekeramik in Form von Maschinenkeramik erzielt in Deutschland einen Umsatz von ca. 100 Mio. DM (Bild 2.4, Bild 2.5).

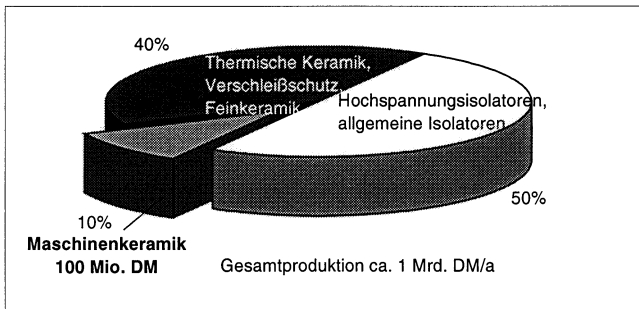


Bild 2.4: Produktionsanteil der Maschinenkeramik in Deutschland.

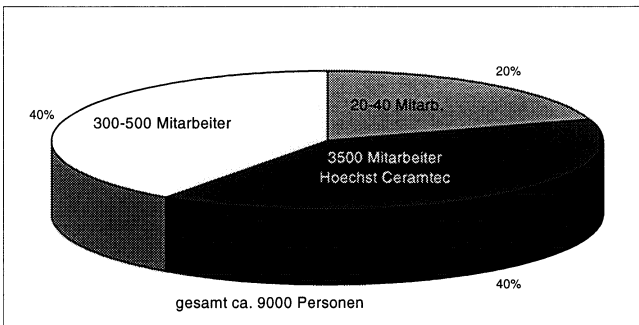


Bild 2.5: Aufteilung der Firmengrößen auf dem Sektor der Industriekeramik in Deutschland (nach VKI).

2.3 Relevante Fertigungsverfahren

2.3.1 Hartbearbeitung von Industriekeramik

Nach dem derzeitigen Stand der Entwicklung und Anwendung von Hochleistungskeramiken sind die an die Bauteile zu stellenden Anforderungen bezüglich Formgenauigkeit, Maßgenauigkeit und Oberflächengüte von Funktionsflächen durch Formgebung, Grünbearbeitung und Sintern meist nicht ohne zusätzliche Hartbearbeitung erreichbar. Die keramiktypischen Eigenschaften wie hohe Härte, fehlende Duktilität, oftmals geringe Thermoschockbeständigkeit und hohe Schmelz- bzw. Zersetzungstemperaturen grenzen die Zahl der zur Hartbearbeitung geeigneten Fertigungsverfahren stark ein. Dazu sind geeignete Bearbeitungsverfahren erforderlich, welche die werkstoffspezifischen Eigenschaften berücksichtigen und gleichzeitig wirtschaftlich sind (SPUR 89, CARTSBURG 1993, ABAY 1996C, ABAY 1997A, ABAY 1997C).

Die Vorstadien der Bearbeitung, angefangen von der Aufbereitung des Pulvers, bis zum heißisostatischen Pressen machen einen wesentlichen Anteil an den Entstehungskosten der technischen Keramik aus. Der Stand der Technik wird durch werkstoffkundliche Errungenschaften wie die kalte Synthese von maßgeschneiderter Keramik (SCHIELE-TRAUTH 1997) oder Nanopartikeltechnologie ständig erneuert. Keramische Verbundwerkstoffe und Grundkörper befinden sich stets im Stadium des Wandels. Welchen Energie- und Kostenaufwand die Fertigung erfordert, wie komplex und fein Keramikteile geformt werden können und wie fest sie schließlich sind, hängt entscheidend von der Korngröße des keramischen Pulvers ab. Sie liegt heute

bei 0,1 bis 3 μm . Mit dem Einsatz keramischer Nanopartikel in der keramischen Prozeßtechnik werden nun Verfahren, Technologien und Werkstoffe möglich, die bisher nicht zugänglich waren. Das Potential der Nanopartikel ist zwar frühzeitig erkannt worden, die Umsetzung in die Praxis scheiterte jedoch an der Agglomeration der Nanopartikel durch statische Anziehung. In BITTERMANN (1997) wird eine Gegenmaßnahme beschrieben, die den Einsatz solcher Nanopartikel gestattet.

Ein großes Hindernis für die volle Realisierung des Potentials von Keramik ist die Entwicklung einer kostengünstigen Bearbeitungstechnik, die die positiven Materialeigenschaften der bearbeiteten Oberfläche nicht beeinträchtigt; d. h., daß das Verfahren nicht nur an sich wirtschaftlich sein soll, sondern auch den Grad an Schädigung der bearbeiteten Oberfläche möglichst gering halten soll. In TUERSLEY U. A. (1994) wurden mögliche Verfahren zur Bearbeitung von Keramik, wie das Schleifen, die Ultraschallbearbeitung, die Bearbeitung mit abrasivem Wasserstrahl, die Funkenerosionsbearbeitung und schließlich die Bearbeitung mit Hilfe des Laserstrahls beschrieben. Alle beschriebenen Methoden können im bearbeiteten Werkstoff Rißbildung induzieren, die nicht vernachlässigt werden kann. Keramiken müssen wesentlich sorgfältiger bearbeitet werden als andere Materialien. Die Schnittkräfte bei spanender Bearbeitung sollten niedrig gehalten werden, so daß keine Rißbildung bzw. Bruch des Werkstücks auftreten kann.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse von HEGER (1993) und SCHIRMER (1995) in der Bewertung der Zuverlässigkeit keramischer Bauteile und der Entwicklung von Versagenskriterien unter mehrachsiger Belastung, können Ultraschallprüfungen Fehlstellen bis in die Tiefe von 10 mm sicher nachweisen. Die hohe Schallgeschwindigkeit in Keramik führt bei den üblichen Tauchtechnikprüfköpfen zu großen Brechungswinkeln an der Grenzfläche Wasser/Keramik. Als Gegenmaßnahme benützt NICHOLSON (1992) Aluminium-Nitrit als Piezomaterial. Das AlN wird als dünne Schicht durch Sputtern auf einen Quarzträger aufgebracht. Zur Bestimmung der

Fehlergröße werden die rückgestreuten Fehlersignale in einen bestimmten Frequenzbereich transformiert.

In der vorliegenden Arbeit wurden als Fallbeispiel in Kapitel 5 und 6 keramische Dichtungsscheiben bearbeitet. Bis dato wurden Dichtungsscheiben-Prüfungen vorwiegend durch eine direkte, visuelle Kontrolle durchgeführt. Bei angepaßter Beleuchtung und Vergrößerung durch eine Lupe werden viele Fehler auf der polierten Fläche sichtbar. Die Sichtprüfung mit manueller Bewegung der Proben erlaubt eine Prüfgeschwindigkeit von maximal 15 Proben / Minute. Diese Art der Kontrolle ist jedoch sehr subjektiv; Konzentration und Ermüdung des Prüfpersonals spielen eine entscheidende Rolle. Deshalb ersetzt NYÁRSIK U. A. (1997) die Sichtprüfung durch eine objektive, automatische Prüfmethode. Durch die Erstellung von 10 Fehlerklassen unter dem Interferenzmikroskop, kann über eine Bildverarbeitung der jeweilige Fehler geortet und klassifiziert werden. Mit dem Prüfautomaten werden Meßgeschwindigkeiten von 20 Proben in der Minute erreicht.

Zu den charakteristischen Schwierigkeiten bei der Keramik-Serienfertigung zählen die Beherrschung und Steuerung der vielen Produkt- und Prozeßparameter, durch die eine in ihrer Art und Bedeutung unbekannte Einflußnahme auf die Produktherstellung ausgeübt wird. Gleichzeitig bestehen zwischen diesen Parametern unbekannte Abhängigkeiten, durch die über mehrere Stufen hinweg die Qualität der Bauteile beeinflusst wird. Eine Methode zur allgemeinen, systematischen Verbesserung der Qualität keramischer Produkte beschreibt EVERSHEIM U. A. (1996B). Durch ein Wirkmodell wird sichtbar, welche möglichen Beziehungen zwischen den Qualitätsmerkmalen und den Prozeßparametern bestehen.

Auf der Seite der Keramik(hart)bearbeitung wurden unzählige Verfahren entwickelt und getestet. So ist die laserunterstützte Hartbearbeitung bereits Stand der Technik (EMMELMANN 1992, KÖNIG & ZABOKLICKI 1994, MARINESCU

1996). Das Abtragen von keramischen Werkstoffen mit Hilfe von Excimerlasern wird in ARNOLD (1994), KAPPEL (1998) und PFEUFER (1996) beschrieben. Auf dem Lasermarkt sind CO₂-Laser bis zu 40 kW kommerziell erhältlich. Hochleistungsdiodenlaser mit Strahlleistungen im kW-Bereich sind bereits käuflich. Ein anerkanntes Verfahren ist die Veränderung der Oberflächengestalt keramischer Bauteile durch XeCl-Excimerlaserstrahlung (LUTZ & GEIGER 1993). Andere Laser wie Nd:YAG-Laser finden beim Trennen sowie bei der Präzisionsbearbeitung von Keramik Anwendung (GONSHIOR 1995, WESTKÄMPER U. A. 1994).

Ultraschallunterstütztes Schleifen als Substitutionsverfahren für die Bohr- und Fräsbearbeitung wurde im Rahmen der BMBF-Projektreihe „Produktion 2000“ an der TU Berlin untersucht. Höhere Zerspanleistungen versprechen den erfolgreichen Einsatz dieses Verfahrens (KÄM 1997, CARTSBURG 1993). Durch dieses Bearbeitungsverfahren lassen sich Durchlaufzeiten verkürzen und die Genauigkeiten erhöhen; außerdem werden die Prozeßkräfte kleiner. Bei Frequenzen von ca. 22 kHz und Amplituden im µm-Bereich kommt es zu Unterbrechungen des Werkstück-Werkzeug-Kontaktes, wodurch die thermischen Belastungen deutlich reduziert werden und zusätzlich das Verschleißverhalten der Werkzeuge positiv beeinflusst wird.

Die Hartbearbeitung (WOBKER 1997, CARTSBURG 1993) schwer zerspanbarer Werkstoffe wie Hartmetall oder Keramik erfordert angepasste Werkzeuge und Maschinen. Die extreme Temperaturbelastung und die Randzonenschädigung, die bei der Weichbearbeitung nicht so stark ins Gewicht fallen, sind bei der Hartbearbeitung von großer Bedeutung.

Die Bearbeitung von Industriekeramik stellt besonders hohe Anforderungen an die Produktionsmittel (SPUR 1989). Kostengesichtspunkte und technologische Gesichtspunkte bringen die Produktion sehr schnell an die Grenzen ihrer Möglichkeiten (TÖNSHOFF & SCHMIDT 1996, SALJÈ & WESTKÄMPER 1993). Die Entscheidung, welches Hartbearbeitungsverfahren

für den jeweiligen Fall anzuwenden ist, basiert auf einer Vielzahl von Kriterien (PAULMANN 1991, HAMM & LANGERMANTEL 1994). So können generell Abträge mit verschiedenen Bearbeitungsverfahren erzielt werden, aber die erreichbare Oberflächengüte ist von dem jeweiligen Verfahren abhängig. Die einzelnen Bearbeitungsverfahren in der Hartbearbeitung stehen in direkter Konkurrenz zueinander.

Die Bearbeitung muß in den meisten Fällen in mehreren Stufen erfolgen. Die Härteschicht, die sich nach dem Sinterprozeß bildet, wird aus Zeitgründen mit dem Schleifen (Schruppen) abgetragen (Bild 2.6).

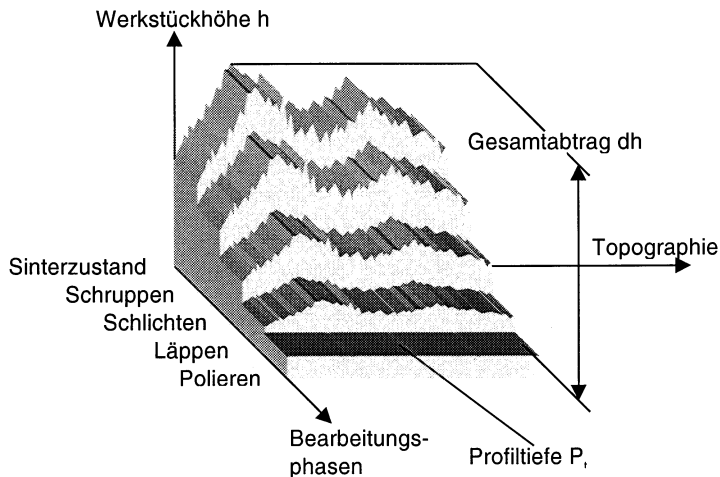


Bild 2.6: Mehrstufige Bearbeitung (hier Schrupp- und Schlicht-Schleifen mit anschließendem Läppen und Polieren) nach dem Sintern.

Eine anfängliche Läpp-Bearbeitung wäre zu langwierig. Der Schleifprozeß hinterläßt aber eine meist ungenügende Oberflächengüte, die in Folgeprozessen verbessert werden muß. Das Läppen mit gebundenem oder gar mit losem Korn kann diese Restprofiltiefe nicht immer beseitigen. Oft folgt

ein sehr feiner Polier-Prozeß. Bestrebungen Zwischenprozesse weitmöglichst einzusparen, zielen auf die Substitution des Schleifprozesses durch den Läpp-Prozeß mit gebundenem Korn. Bei den in der Literatur erwähnten Fertigungsfolgen (HUBER 1995) werden die in einem Grobschleifprozeß vorbereiteten Werkstücke in bis zu vier Läppstufen bearbeitet, wobei mit einer grobkörnigen Suspension vorgeläppt wird, um eine hinreichende Ebenheit zu erzielen. Die Erzielung des geforderten Abtrages auf der Werkstückoberfläche kann dann durch einen Läppprozeß mit grobem Korn erfolgen. Der Läppprozeß wird durch die Möglichkeit, mehrere Werkstücke gleichzeitig zu bearbeiten, wirtschaftlich.

Durch die Verwendung von Zweischeibenläppmaschinen läßt sich dieser Zeitvorteil erweitern, da dünne Werkstücke gleichzeitig auf der Ober- und Unterseite bearbeitet werden können.

Schleifen, Läppen und Polieren sind wohl die geeignetesten Verfahren, um keramische Werkstücke zu bearbeiten. In Kapitel 2.3.2 werden diese Verfahren allgemein erläutert, um dann gezielt auf ihren Einsatz in der Keramikhartbearbeitung im Sinne eines Verfahrensvergleichs eingehen zu können.

2.3.2 Schleifen von Industriekeramik

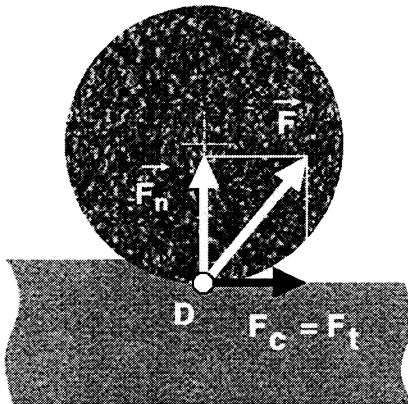
Schleifen mit rotierendem Werkzeug ist ein spanendes Fertigungsverfahren mit vielschneidigen Werkzeugen, deren geometrisch unbestimmte Schneiden von einer Vielzahl gebundener Schleifkörner aus natürlichen oder synthetischen Schleifmitteln gebildet werden und mit hoher Geschwindigkeit, meist unter nichtständiger Berührung zwischen Werkstück und Schleifkorn den Werkstoff abtrennen.

Die Schnittbewegung wird vom Werkzeug oder vom Werkstück ausgeführt. Der Vorschub ist im Gegensatz zum Läppen und Polieren weggesteuert. Es wird nach DIN 8589 Teil 11 unterschieden zwischen:

- der Form der zu erzeugenden Fläche,
- der Lage der Bearbeitungsstelle am Werkstück,
- der Wirkfläche am Werkzeug und
- der Vorschubbewegung.

Bei dem Schleif-Prozeß sind die Oberflächentopographie und die erzeugte Rauheit von hoher Güte. Relativ hohe Oberflächengüten von IT 5-8, entspricht R_a 0,04 - 6,3 μm , sind üblich. Es entsteht beim Schleifen durch die spezifische Kinematik des Werkzeugs eine gerichtete Oberflächentextur.

Da jedes genauer gefertigte Teil mindestens einer Schleifbearbeitung unterzogen wird, hat das Schleifen einen hohen Anteil an den Fertigungsverfahren. Schleifen wird für unterschiedlichste Werkstückspektren und bei verschiedensten Losgrößen eingesetzt.



Beim Schleifen treten folgende Prozeßkräfte und –leistungen auf:

Tangentialkraft (2.1): $F_t = K_c \cdot A_o$

Normalkraft (2.2): $F_n = \mu \cdot F_t$

Vorschubkraft (2.3): $F_t \ll F_n$

Schnittleistung (2.4): $P_c = F_t \cdot v_c$

Bild 2.7: Kraftverhältnisse beim Schleifen.

Weiterhin existiert die Unterscheidung zwischen Umfangs- und Seitenschleifen bezüglich des Eingriffsquerschnittes A_o , des Zeitspanvolumens Q , der Schleifzeit t_c und der Hauptzeit t_n der Bearbeitung:

Plan-Umfangs-Längsschleifen	Plan-Seiten-Längsschleifen
$A_o = a_o * a_p \quad (2.5)$ $= a_o * f_a \quad (2.6)$	$A_o = a_o * a_p \quad (2.11)$ $= a_o * f_r \quad (2.12)$
$Q = A_o * v_i \quad (2.7)$ $= a_o * f_a * v_{it} \quad (2.8)$	$Q = A_o * v_i \quad (2.13)$ $= a_p * f_r * v_{it} \quad (2.14)$
$t_c = V_{wi} / Q \quad (2.9)$ $= (z_w * l_w * b_w) / (a_o * f_a * v_{it}) \quad (2.10)$	$t_c = V_{wi} / Q \quad (2.15)$ $= (z_w * l_w * b_w) / (a_p * f_r * v_{it}) \quad (2.16)$
$t_h = (l_H / l_w) * (b_H / b_w) * t_c \quad (2.17)$	

Tabelle 2.8: Wichtige Zusammenhänge zum Schleifen (SALJÈ 1991, WINTER 1993).

Das Schleifverfahren allgemein wurde von LANG & SALJÈ (1989), SALJÈ (1991), TAWAKOLI (1990) und WINTER (1993) eingehend untersucht. Zusammenhänge für das Schleifen sind hier zu finden.

Die Entwicklung der Schleifstoffe bzw. Werkzeuge für die Hartbearbeitung ist weit vorangeschritten. Verbesserungen der Schneidkeramiken und der Vorschubantriebe lassen höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten bzw. hohe Zerspanleistungen zu. Hartbearbeitung mit geometrisch bestimmten Schneiden rückt immer mehr in den profitablen Bereich (RABE 1997). Das Einsatzgebiet von Schneidkeramik wie z. B. polykristallinem Bornitrid (PKB) liegt u. a. im Hartdrehen als Alternative zum Schleifen. Außerdem erlaubt PKB eine Trockenbearbeitung (SCHNEIDER 1996, SCHNEIDER 1997).

Die Entwicklung von Schleifscheiben mit superharten Schleifmitteln wie Diamant oder CBN bewirkte eine erhebliche Steigerung der Leistungsfähigkeit der Schleifwerkzeuge. Im folgenden werden die wichtigsten Merkmale des Schleifwerkzeugs aufgezeigt.

- die Schleifscheibenform (DIN 61900),
- der Schleifwerkstoff (CBN –kubisches Bornitrid–, Diamant, Elektrokorund, Siliziumkarbid, Borkarbid),
- die Scheibenbindung (äußerst weich, sehr weich, weich, mittel (N), hart, sehr hart, äußerst hart (DIN 69100)). Sie hat die Aufgabe die Schleifkörner festzuhalten. Nach dem Erreichen eines bestimmten Verschleißzustandes wird das Korn freigegeben und ein nachfolgendes scharfes kommt zum Eingriff (Bereiche der Selbstschärfung). Keramische Bindungen werden bei der Keramikhartbearbeitung bevorzugt.
- die Körnung (D252 grob bis D3 fein für Diamant, B252 grob bis B15 fein bei CBN). Je größer die Korngröße, desto größer das Zeitspanvolumen, aber desto geringer die Oberflächengüte.
- die Konzentration (Mengenverhältnis der verarbeiteten Diamant- bzw. CBN-Körner, bezogen auf das Volumen des Schleifbelages, 4,4 kt./cm³ ist Basiswert (25 Vol-% bzw. Kz100). Üblich sind Kz25, 38, 50, 75, 100, 150).
- die Belagbreite und
- die Belagdicke.

Das Abrichten dient zur Erzielung höherer Formgenauigkeit, Schneidhaltigkeit und besseren Rundlauf der Schleifscheibe. Abgerichtet wird im Normalfall mit:

- Einzelkorndiamant,
- Vielkornabrichter,
- Diamantfließe,
- Stahl- oder Metall-Profilrolle,
- Diamantprofilrolle oder
- bahngesteuertem Abrichter.

Um die Formhaltigkeit einer Scheibe zu bewahren, muß anschließend profiliert werden. Dies geschieht durch Abrichtprofilrollen, Abrichtformrollen oder Abrichtscheiben. Auch Stahl- oder Hartmetall-Crushierrollen kommen vermehrt zum Einsatz.

Die Potentiale von Schleifwerkzeugen zeigen KLOCKE U. A. (1997) und STARK (1997) auf. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit ermöglicht zusätzlich eine bessere Ausnutzung des Potentials dieser Schleifwerkzeuge und damit eine deutliche Leistungssteigerung des Schleifprozesses, die bei einer entsprechenden Prozeßauslegung ohne Nachteile hinsichtlich der Oberflächenqualität oder thermischer Randzonenschädigung der Werkstücke zu erzielen ist (TREFFERT 1995). Um eine Prozeßauslegung der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von technischer Keramik durchführen zu können, ist neben dem Werkzeug auch die Maschine dem zu bearbeitenden Werkstoff anzupassen. Die derzeitigen Möglichkeiten und Grenzen der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von technischer Keramik am Beispiel von Ventilen zeigt GERLITZKY (1994). Desweiteren sind die einzelnen Bewertungskriterien je nach Bearbeitungsziel zu gewichten. Für den Schlichtprozeß stehen Kriterien wie Oberflächengüte und Randzonenschädigung im Vordergrund. Bei der Schruppbearbeitung erhalten die Schleifkraft, die Abtragsleistung und der Werkzeugverschleiß höhere Priorität, unter der Voraussetzung, daß die entstehenden Eigenspannungen und Risse in der Oberflächenrandzone durch eine anschließende Feinbearbeitung beseitigt werden können (KÖNIG U.A. 1994, VERLEMANN 1994).

Der für die vorliegende Arbeit weitaus wichtigere Gesichtspunkt, ist der Schleifprozeß in Verbindung mit der Bearbeitung von keramischen Bauteilen. FROBIN U. A. (1989), SPUR U. A. (1993), WARNECKE (1994), WARNECKE U. A. (1994A) sowie WOBKER (1990) behandeln die Bearbeitung von Maschinenbaukeramik durch Schleifen; MEYER & KOCH (1994) speziell das Schleifen keramischer Werkstoffe mit Diamantwerkzeugen. Genauere

Untersuchungen bezüglich der Mechanismen des Materialabtrags beim Schleifen von Hochleistungskeramik führte JAHANMIR (1996) durch. PFEIFFER U. A. (1994) erforschte die Auswirkungen verschiedener Schleifverfahren auf den Oberflächenzustand und das mechanische Verhalten von Hochleistungskeramiken. So führt KNÖSEL (1993) Oberflächendefekte an Hochleistungskeramiken auf den Schleifdruck als bestimmende Größe zurück. Die Variation des Schleifdruckes geschieht indirekt über die Vorschubgeschwindigkeit.

Periphere Punkte, wie das passende Kühlschmiermittel (SPUR U.A. 1996, BRÜCHER 1994) oder das adäquate Werkzeug für die Schleifbearbeitung von technischer Keramik sind in einschlägiger Literatur zu finden (KACALAK & LEWKOWICZ 1996, KOCH 1996, STARK 1997). So behandelt WIMMER (1995) das Konditionieren hoch harter Schleifscheiben zum Schleifen von Hochleistungskeramik. In (ARNOT & FISCHBACHER 1995) wurde eine neue Generation von Kunstharzbindungen für Werkzeugscheiben im Trockenschliff untersucht. Acoustic Emission beim Schleifen, eine Möglichkeit der frühzeitigen Schleifbranddetektion beim Schleifen, wurde von (KLUMPEN 1994) behandelt.

2.3.3 Läppen von Industriekeramik

Nach DIN 8589 Teil 15 wird das Läppen in

- Plan(parallel-)läppen
- Rundläppen (Außen / Innen; Umfangs / Seiten)
- Schraubläppen (Außen / Innen)
- Wälzläppen
- Profilläppen

unterteilt. Außerdem wird unterschieden zwischen Einscheiben- und Zweischeibenläppen.

Beim Zweiseibenlappen liegen zwei planparallele unabhängig bewegliche Läppscheiben vor. Die obere Läppscheibe ist hydraulisch oder pneumatisch absenkbar und ist pendelnd gelagert, damit ein selbstständiges Ausrichten beider Läppscheiben zueinander gewährleistet ist. Die Werkstücke werden zwischen den Läppscheiben, die gegensinnig um den Maschinenmittelpunkt rotieren, in Läuferscheiben geführt.

Die Läuferscheiben greifen mit ihrer Verzahnung in den Innenstiftkranz und Außenstiftkranz. Der Innenstiftkranz wird angetrieben, so daß die Läuferscheiben am feststehenden Außenstiftkranz ablaufen können. Auch Riemen- oder Zahnradantrieb sind möglich.

Die Normalkraft wird (pneumatisch oder durch Eigengewicht der Druckplatten) über die obere Läppscheibe auf die sich zwischen den Scheiben und den Werkstücken befindliche Läppsuspension aufgebracht. Je nach Richtung und Betrag der einzelnen kinematischen Kenngrößen ergeben sich zyklonale oder exzentrische Kreise als Bewegungsform der Werkstücke auf der Läppscheibe. Bild 2.9 verdeutlicht die Arbeitsweise des Läppverfahrens.

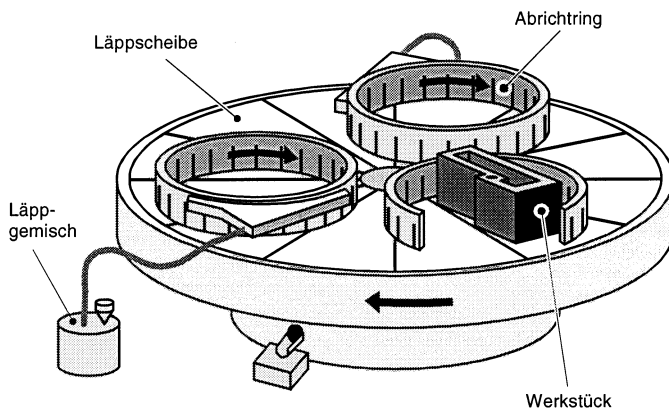


Bild 2.9: Arbeitsprinzip des Planparallelläppens.

Das Läppen ist hauptsächlich zur Bearbeitung planer Flächen geeignet. Die Bearbeitung von Dichtungsscheiben und Gleitringdichtungen ist das Haupteinsatzgebiet, da hier eine ungerichtete Schnittbewegung von Vorteil ist, wie sie beim Läppen im Gegensatz zum Schleifen vorliegt. Läppen ist ein formübertragendes Fertigungsverfahren (ungleichmäßiger Verschleiß der Läppscheibe bewirkt eine Verschlechterung der Werkstückebenheit).

Die erreichbare Rauigkeit nach der Läppbearbeitung beträgt $R_z < 0,1 \mu\text{m}$ (R_a je nach Material bis $0,01 \mu\text{m}$ (N1)), die Ebenheit $0,1 \mu\text{m}$ und die (Plan-) Parallelität $0,5 \mu\text{m}$. Somit dient das Läppen zum Erreichen höchster Maß- und Formgenauigkeit bei gleichzeitiger Verbesserung der Oberflächenqualität. Auf der Werkstücktopographie bildet sich eine ungerichtete Textur. Deshalb wird das Läppen oft bei der Oberflächenbearbeitung von Dichtflächen herangezogen.

Das Läppen ist ein Bearbeitungsverfahren, bei dem eine Vielzahl von Einflußfaktoren berücksichtigt werden müssen, um die bestmögliche Leistung zu erhalten. Die Hauptprozeßgrößen beim Läppen sind:

- der Läppdruck p ,
- die Läppscheibengeschwindigkeit $v_{\text{Läpp}}$ und
- die Läppzeit t_L

Der Läppdruck verteilt sich auf genutzten Läppscheiben nach folgender Formel (Abkürzungen in Kapitel 0.2 und 0.3):

$$p = b_s / (b_s + b_n) * F_n / \sum A_w \quad (2.18)$$

Für den Fall, daß Halterwinkelgeschwindigkeit ω_h gleich der absoluten Winkelgeschwindigkeit der Läppscheibe Ω gewählt wird, ergibt sich die Bahngeschwindigkeit v als Funktion des Abstandes a_z zwischen Haltermitte H und Wälzzentrum Z sowie der Winkelgeschwindigkeit Ω der Läppscheibe:

$$v_{L\ddot{a}pp} = a_z \cdot \Omega \quad (2.19)$$

Beim Läppen wird keine Vorschubgeschwindigkeit eingestellt. Der Vorschub stellt sich in Abhängigkeit von vielen Faktoren (Druck, Zeitverhalten etc.) ein. Das Läppen ist somit im Gegensatz zum weggesteuerten Schleifen kraftgesteuert.

Als Werkzeuge werden Läppemulsionen (Gemisch, Korn und Lösungsemulsion) oder Läppscheiben mit gebundenem Korn eingesetzt. Das Läppwerkzeug (meist als Paste erhältlich) wird durch folgende Größen bestimmt:

- Korngröße,
- Werkstoff der Körner (CBN, Diamant etc.) und
- Konzentration in der Emulsion oder auf der Scheibe.

Die Läppscheiben oder Arbeitsscheiben werden grob in 4 Gruppen unterteilt. Weiche Arbeitsscheiben aus Papier, Filz, Kunststoff, Kupfer oder Alu-Legierungen kommen bei der Bearbeitung von weichen Werkstoffen in Anwendung. Harte Arbeitsscheiben aus Grauguß, weichem Stahl oder Weich-Keramik im Härtebereich 140 – 220 HB sind für die Bearbeitung von Normteilen, meist aus Metall, gedacht. Weiterhin unterscheidet man gehärtete Arbeitsscheiben aus gehärtetem Stahl oder Hart-Keramik bis 500 HB, sowie Multi-Metallscheiben. Eine Kombination von 2-3 Metallschichten oder gesinterem Metallpulver. Der Selbstschärfbereich des Läpp-Werkzeugs wird durch die Variation der Scheibenparameter beeinflusst.

Leonardo da Vinci ersann bereits um 1493 eine Planläppmaschine, deren kinematisches Konzept erst in den fünfziger Jahren unseres Jahrhunderts als grundsätzlich geeignet erkannt wurde und noch bis heute in Planläppmaschinen Anwendung findet (DA VINCI 1974). Erst 1989 erfolgte ein Vorstoß mit der Einführung der Zweischeibenläppmaschine mit gewandelter

kinematischer Konzeption, deren Realisierung auf entsprechenden Forschungen basiert (SABOTKA 1991, KÖNIG & POPP 1989).

Läpptechnologien werden überall dort angewendet, wo Bauteile mit extrem hohen Formgenauigkeiten und isotropen Oberflächentopographien und –eigenschaften gefertigt werden müssen. Ebenso werden mit Läppen Werkstoffe bearbeitet, die wegen ihrer mechanischen beziehungsweise thermischen Eigenschaften nicht oder nicht wirtschaftlich mit anderen Verfahren zerspannt werden können. Das entwickelte Prozeßmodell von SPUR & ENGEL (1997) erlaubt die simulative Beschreibung von Läpp-Prozessen von spröden Werkstoffen. Aus diesem Prozeßmodell läßt sich ein Simulationsalgorithmus ableiten, durch dessen Anwendung der experimentelle Aufwand für die Arbeitsvorbereitung des Läpp-Prozesses minimiert werden kann. Zugleich kann eine auf den beschriebenen funktionalen Zusammenhängen basierende, flexible Prozeßauslegung gewährleistet werden, die das real vorhandene Optimum an Prozeßeffektivität berücksichtigt.

Der quantitative Einfluß der Parameter auf das Fertigungsergebnis ist nur vereinzelt bekannt. Das Problem liegt dabei oft in der genauen Beschreibung der Einflußgrößen. So lassen sich z.B. die Form der Läppkörner, das Verschleiß- und Bruchverhalten sowie die Korndichte im Läppspalt nur annähernd beschreiben. Die Folge ist eine oft nicht eindeutige Abhängigkeit des Fertigungsergebnisses von den Einflußgrößen. So wurde für die Abtragsgeschwindigkeit als Funktion des Läppdrucks sowohl ein über- als auch unterproportionales Funktionsverhalten ermittelt (HORNIK & SALERNO 1992).

Trotz des jahrhundertelangen Einsatzes von loseem Korn in der Läppbearbeitung ist bisher nicht eindeutig geklärt, welche Mechanismen zum Werkstoffabtrag führen. Damit ein Korn schneidet, muß es zumindest vorübergehend in der Läppscheibe verankert sein. Die unterschiedlichen

Wirkprinzipien des Abtrags beim Läppen von Keramik wurden erstmals von SABOTKA (1990) untersucht. In Abhängigkeit von den gewählten Stellgrößen besteht die Möglichkeit des Kornabrollens und Eingreifens der Läppkornspitzen in den Werkstoff, was zu einem teilweisen oder vollständigen Herauslösen des Keramikorns aus seiner Bindung führt und bessere Oberflächeneigenschaften am Werkstück bewirkt. Die temporäre Verankerung von Läppkörnern führt hingegen zu einem ritzenden bzw. furchenden Abtrag und somit zu höheren Abtragsraten.

In HEISEL U.A. (1997) werden die Abhängigkeiten der Kornbewegung von der Kornform analysiert. Am IfW der Universität Stuttgart wurde eine Methode der direkten Beobachtung von Kornbewegungen ausgearbeitet, die es ermöglicht, den Spalt zwischen Werkstück und Werkzeug mit einem Mikroskop zu betrachten. Ein ideal runder und absolut harter Körper hat unter idealen Voraussetzungen keinerlei Rollwiderstand. Der in der Realität vorhandene Rollwiderstand nicht ideal runder Körper führt zu einem Übergang von der Rollbewegung auf eine Ritzbewegung. Die Ergebnisse der ohne Läppmittel durchgeführten Versuche zeigen, daß eine vorübergehende Verankerung eines Läppkornes in einem der Wirkpartner viel häufiger vorkommt, als das reine Rollen des Korns (HEISEL U.A. 1997).

Das Planläppen von technischen Keramiken untersuchte SABOTKA (1991). Die derzeit noch starke Abhängigkeit der gewinnbringenden Verfahrensanwendung vom Maschinenbediener gebundenen Erfahrungswissen macht neben der genannten wissenschaftlichen Durchdringung der physikalisch-technologischen Verfahrenskenngrößen die Erfassung und Beherrschbarkeit läpptechnologischer Einfluß- und Ergebnisgrößen erforderlich.

Das Läppen von Keramik mit Diamant- und SiC-Korn wurde u. a. auch von STÄHLI & JÜTTING (1995) untersucht, die Abtragsmechanismen beschrieben und Richtlinien für die wirtschaftliche Fertigung gegeben. Die Untersuchungen zeigten deutliche Vorteile für die Diamantsuspension; sowohl die

Abtragsrate als auch die Oberflächengüte waren höher als bei der SiC-Suspension. Beim Läppen mit SiC basiert der Werkstoffabtrag auf dem Ausbrechen von Oberflächenpartikeln durch abrollendes Korn. Auf der Oberfläche mit Diamant geläppter Werkstücke waren Spuren von rollenden und gebundenen Körnern nachweisbar.

Die Terminologie und die Unterscheidung von Läppverfahren ist breit gefächert. Es sind allerdings keine definiten Übergänge gegeben. So werden Begrifflichkeiten wie Läppen mit gebundenem Korn, Fein(st)schleifen mit Läppkinematik, Flachhonen, Finish-Prozeß, Superfinishing, benützt. Der Übergang zwischen Läppen mit losem Korn und Polieren ist fließend.

Läppen im klassischen Sinn bezeichnet das Läppen mit losem Korn, also ein Verfahren mit Läppkinematik und einem Werkzeug, das in einer Suspension gebunden ist. Die Läppkörner schwimmen in der Suspension. Die Läppscheibe, normalerweise eine glatte Metallscheibe, treibt das Gemisch an und bewirkt die Bewegung des Werkzeugs. Die Werkstücke werden in Käfigen gehalten und führen durch die Läppkinematik eine relative Planetenbewegung aus. Das Werkstück wird durch den Aqua-Planing-Effekt aufgetrieben und an der Kontaktseite durch die Läppkörner bearbeitet. Durch zu starke Anpreßdrücke reißt der Liquid-Film auf und das Werkstück setzt dann direkt auf der Scheibe auf. Ein bestimmter Grenzdruck darf deshalb nicht überschritten werden. Dieses Verfahren hat, abgesehen von der eigenen Kinematik, eine hohe Ähnlichkeit mit dem Polier-Prozeß. Im Normalfall kommen sehr feine Körnungen zum Einsatz.

Die Forderung nach hohen Oberflächengüten verlangt derzeit oft als letzten Fertigungsschritt das Läppen mit losem Korn. Dieser teure Bearbeitungsschritt besitzt zwei Nachteile. Problematisch ist die Entsorgung der Emulsionen im Läpp-Prozeß. Nach KARPUSCHEWSKI U.A. (1998) werden derzeit jährlich ungefähr bis zu 10000 t Läppsuspension in der Bundesrepublik Deutschland verbraucht und müssen häufig als Sondermüll

entsorgt werden. Außer den hohen Entsorgungskosten stellen die geringen Abtragraten, der hohe Aufwand für die Reinigung der Werkstücke und die schlechte Automatisierbarkeit des Fertigungsprozesses die gravierendsten Nachteile des konventionellen Läppens dar.

Das Läppen mit gebundenem Korn, auch als Flachhonen, Läppschleifen oder Feinschleifen mit Läppkinematik bezeichnet, unterscheidet sich in der Bindung des Kornes. Bei diesem Bearbeitungsverfahren sitzen die Körner in einer festen Bindung auf der Scheibe. Die Kinematik ist unverändert und die Werkstücke führen exakt die selben Bewegungen aus wie beim Läppen mit losem Korn. Es kann auf eine Suspension / Trägermedium verzichtet werden. Als Kühlschmiermittel kommt Wasser oder Läpp- / Honöl zum Einsatz (TRÖHLER 1993).

Mit dem Feinschleif-Verfahren (WOLTERS 1996) wird eine Oberflächengüte wie beim Honen, eine Bearbeitungsgeschwindigkeit wie beim Schleifen mit Doppelscheibe und eine Maßgenauigkeit wie beim Läppen mit losem Korn erreicht. Die Scheibe aus Grauguß ist mit Abrasivstoffpellets bedeckt (Schichtdicke ca. 3 mm), deren entweder runde oder sechskantige Form die anwendungsspezifische Gestaltung von Schleifwerkzeugen ermöglicht. Zusammensetzung und Gestaltung des Werkzeugs können an die Bearbeitungsbedingungen angepaßt werden; hohe Zerspanleistung oder hohe Oberflächengüte. Die Pelletabstände können entsprechen dem Radius auf der Scheibenfläche gewählt werden. Die Bindung ist keramisch. Beim doppelseitigen Feinschleifen werden Schleifscheiben ober- und unterhalb des Werkstücks angeordnet, wobei die obere Scheibe schwimmend gelagert und selbstausrichtend ist. Der Druck zwischen oberer und unterer Scheibe wird mittels Pneumatik präzise gesteuert. Ein recyclebares Kühlschmiermittel auf Wasser- oder Ölbasis hält die Temperatur an der Oberfläche des Werkstücks konstant. In Verbindung mit der automatischen Zu- und Abführeinrichtung eignet sich das Verfahren gut für die Massenproduktion. Mit dem Feinschleifen zu bearbeitende Werkstoffe sind neben Aluminium,

Gußeisen, Sintermetalle, Lager- und Werkzeugstähle, Bronze und Messing auch nichtmetallische Werkstoffe wie Saphir, Kohlenstoff, Glas und nicht zuletzt Keramik.

CBN- und Diamant-Feinschleifen auf Maschinen mit Läppkinematik zeichnet sich gegenüber anderen Verfahren durch seinen kühlen Schliff, den geringen Randzonenschädigungen am Bauteil sowie den niedrigen Schleifkräften und damit den geringen Verformungen der Bauteile während des Bearbeitungsprozesses aus (FUNCK 1995, MACKENSEN U.A. 1996, DENNIS & MACKENSEN 1996).

Wirtschaftliche Finish-Prozesse verlangen mehr als gute Oberflächen. Moderne Läppmaschinen müssen sich schneller als früher umrüsten lassen und Abtragsleistungen bieten, die in der Nähe der Schleifbearbeitung liegen (BOETZ 1996).

Die meist mehrstufige Hartbearbeitung bietet ein erhebliches Potential für eine Produktivitätssteigerung. Die Bearbeitungskosten der gesamten Fertigungskette können reduziert werden, wenn es gelingt, die Wechsellpunkte zwischen den einzelnen Prozessschritten optimal aufeinander abzustimmen. Auch das Einsparen eines gesamten Fertigungsschrittes wie z. B. des Schleifens bietet hierfür einen weiteren Ansatzpunkt. Für die Substitution des Schleifprozesses muß der hohe Abtrag, der normalerweise beim Schleifen erzielt wird durch das Läppen oder ein anderes Verfahren erreicht werden. Ob dies zu Vorteilen führt ist fallspezifisch zu prüfen. HUBER (1995) stellte fest, daß eine Erhöhung des Läpp-Drucks zu der gewünschten Erhöhung der Abtragsleistung führte.

Diese Erkenntnis wurde von ABAY (1997A), ABAY (1997C) umgesetzt. Bei gleichzeitiger Steigerung der Schnittgeschwindigkeit steigt tendenziell die Abtragsleistung. Ab einer bestimmten Grenze wird die Kornsplitterung so groß, daß nur noch eine Oberflächenverbesserung stattfindet. Ein Abtrag wird nicht mehr erzielt. Das Verfahren Hochdruckläppen, das um 5-30 fach

höhere Läppdrücke als üblich gestattet, bringt eine hohe thermische Belastung mit sich. Für die steigende Abtragsleistung muß der übermäßige Verschleiß des Werkzeugs in Kauf genommen werden.

Dieser Zusammenhang wurde auch im Polier-Prozeß festgestellt. Eine Steigerung der Anpreßkraft und der Drehzahl der Polierscheibe ergab beim Polieren einen höheren Werkstoffabtrag und verbesserte Werkstückrauheit (STÄHLI & JÜTTING 1995). Polierverfahren werden vorwiegend in der Optik- und Elektroindustrie sowie dem Maschinenbau eingesetzt. Typische Werkstoffe sind zum Beispiel Dicht- und Gleitelemente, Endmaße, Meßflächen, Spritzgußformen und Wafer sowie optische Bauteile. Eine weitere Anwendung findet das Polierverfahren in der Metallurgie zur Herstellung von Schlifren, die zur Beurteilung des Werkstoffgefüges und der Randzone dienen.

Die erwünschten Eigenschaften der polierten Oberflächen können unter anderem eine glatte, glänzende Oberfläche, extrem geringe Maßabweichungen, Rauhtiefen und Kantenverrundungen sein (JÜTTING 1993, KRAUÁ 1988). Die Bemühungen das Schleifen durch das Läppen zu ersetzen, setzen sich wiederum in den Untersuchungen fort, das Läppen durch das nächstfeinere Verfahren, also durch das Polieren zu ersetzen.

Dabei spielen die aufeinanderfolgenden Korngrößenübergänge von Folgeprozessen eine dominante Rolle. GÄBLER (1996), GÄBLER (1997) untersucht die Einflüsse der durch die Fertigung entstehenden Oberflächen auf die Materialeigenschaften. Für einen Vergleich wurden Keramikoberflächen durch Läppen und Polieren hergestellt, um anschließend in tribologischen Standardtests auf ihre Funktionseigenschaft überprüft werden zu können. Je zäher die Keramik ist, desto mehr überwog schneidender Abtrag beim Läppen und Polieren und desto geringer wurde die Rauheit. Generell ließ sich eine Abnahme des Wälzverschleißes feststellen (WESTKÄMPER & GÄBLER 1996, TELLE 1994).

3 Bewertung des aktuellen Standes und Ableitung des Handlungsbedarfs

3.1 Bewertung des Ist-Standes in der Optimierung von mehrstufigen Prozessen

In Bezug auf die vorliegende Problemstellung sind Arbeiten über mehrstufige Prozeßoptimierungen von besonderer Bedeutung. Forschungsaktivitäten verschiedener Institute auf dem Feinbearbeitungs- bzw. Keramiksektor sind aus der Tabelle 3.1 zu entnehmen. Es werden an der RWTH Aachen Einzelprozeßoptimierungen nach Kosten bzw. Zeit abgehandelt und an der TU Braunschweig qualitätsorientierte Prozeßkettenoptimierungen angestrebt. Umfangreiche Untersuchungen, die sich mit der gesamtheitlichen Optimierung der Fertigungskette in der Hartbearbeitung befassen sind bislang an der TU München erarbeitet worden.

	Instituts -name	Instituts- leiter	Stichworte
TU Berlin	IWF	Uhlmann	Tief-, Pendel-, Außenrundscheifen Kühlschmiermittel Prozeß-/ Parameteranalysen
RWTH Aachen	IPT	Klocke König	HSC, Außenrund-, Zahnflankenschleifen Hartdrehen, Werkstoffe Prozeßbetrachtung- und auslegung
TU Braun- schweig	IWF	Westkämper	HSC, Laser-Schleifen, Abrichtverfahren (CD) Prozeßüberwachung und - kettenoptimierung mit neuronalen Netzen (allerdings Einzelprozeßoptimierung)

Uni Kaisers- lautern	FBK	Warnecke	System- und Prozeßauslegung für das Schleifen Schleifscheiben, Körnungen, Werkzeuge, etc.
Uni Hannover	IFW	Tönshoff	SiC, Werkzeuge, Schleifprozesse, Prozeßführung beim Schleifen
HTW Zwickau	IFF	Mehlhose	Parameteranalyse Schleifen
Uni Freiburg	IWM	Pfeiffer	Randschichtanalyse, Schleifverfahren
TU München	iwb	Reinhart	Optimierung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung, Arbeitsfolgenplanung

Tabelle 3.1: Forschungsaktivitäten in der Fein(st)bearbeitung.

In klassischer Weise stellen TÖNSHOFF & WOBKER. (1993), TÖNSHOFF U. A. (1993) technologische Untersuchungen im Sinne einer Prozeßoptimierung speziell zum Seitenschleifen von Keramik an, gehen aber nicht von einer gesamtheitlichen Prozeßauslegung für die Hartbearbeitung aus. Das Verfahren Seitenschleifen bietet dabei aufgrund seiner Verfahrenskinetik Einsatzvorteile gegenüber anderen Schleifverfahren. Die geringen Spannungsdicken, die sich für dieses Verfahren ergeben, vermeiden in weiten Bereichen eine Beeinflussung der Randzone der Keramik. Höhere Schnittgeschwindigkeiten ergeben Vorteile und höhere Vorschubgeschwindigkeiten erlauben eine Begrenzung des Werkzeugverschleißes. Weitere Untersuchungen von TÖNSHOFF U. A. (1996) haben zum Ziel, das Innenrundsleifen von Hochleistungskeramik in Hinsicht auf neuartige Bindungssysteme (Sprödbronze, Keramik) leistungsfähiger zu gestalten. Aufgrund ihrer Poren bieten diese Bindungen hohe thermische Stabilität.

Als alternative Bearbeitungsstrategien konkurrieren Pendelschleifen und Tiefschleifen auch in der Hartbearbeitung von Industriekeramik. Eine mehrstufige Verschaltung dieser Bearbeitungsstrategien findet in der Hartbearbeitung von Industriekeramik fast immer statt. Die Untersuchungen von TIO (1990) zielen auf die Kenntnis der Werkstoffabtrennmechanismen,

des Einflusses der Schärf- und Schleifbedingungen auf die Randzonenschädigung, die Oberflächengüte und die Prozeßkenngrößen beim Pendelplanschleifen von nichtoxidischen Keramiken hin. Beim Pendelschleifen werden kleine Werkzeugzustellungen (5-10 μm) und hohe Werkstückvorschubgeschwindigkeiten (25-30 m/min) eingestellt. Zwar führt das zu großem Schleifscheibenverschleiß und relativ großer Rauhtiefe an der Werkstückoberfläche, doch resultieren aus dieser Strategie geringe Zerspankräfte und somit geringe thermische Beanspruchung des Werkstücks.

Im Gegensatz dazu steht das Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe, das eingehend von UHLMANN (1994A, 1994B) untersucht wurde. Beim Tiefschleifen (auch Schleichgangschleifen genannt) werden hohe Werkzeugzustellungen (5-20 mm) und kleine Werkstückvorschubgeschwindigkeiten (3-1500 mm/min) eingestellt. Dadurch ist zwar der Schleifscheibenverschleiß und die Rauhtiefe der Werkstückoberfläche geringer, aber es treten hohe Zerspankräfte und Wärmeentwicklung mit Gefahr der Randzonenschädigung am Werkstück ein. Auch er gibt im Sinne einer Prozeßanalyse die Verhältnisse beim Tiefschleifen in Abhängigkeit von den Stellparametern wieder. Höhere Abtragsleistungen und bessere Oberflächengüten und damit eine Erhöhung des Weibull-Moduls zeichnen das Tiefschleifen besonders aus (VERLEMANN 1992). Die Arbeiten von HOLZ (1994) sind als geeignete Ergänzung des Planschleifprozesses mit Fokus auf die Oberflächentopographie aufzufassen. So wird nach HOLZ (1994) der weitaus größte Teil aller weltweit produzierten mikroelektronischen und mikromechanischen Bauelemente auf Siliziumsubstratscheiben gefertigt. Als ein zentrales Problem rückt hierbei die unvermeidbare mechanische Schädigung der oberflächennahen Kristallschichten in Form von Spröbruch, Rissen und Gitterfehlern zunehmend in den Vordergrund. Nach HOLZ (1994) wird künftig das Planschleifen mit Diamantwerkzeugen den konventionellen Läpp-Prozeß aufgrund der einfacheren Prozeßführung und Automatisierung verdrängen.

Für den erfolgreichen Einsatz von Hochleistungskeramik als Konstruktionswerkstoff ist neben dem keramikgerechten Design die Optimierung der

bauteilbezogenen Prozeßführung beim Schleifen der Keramikteile eine wichtige Voraussetzung. Die aufgabenspezifische Prozeßgestaltung der Peripherie zur Schleifbearbeitung ist Forschungsgrundlage der Ausführungen von HOFFMANN & PÖSCHL (1994). Besonders zu beachten sind die Auswahl eines geeigneten Maschinensystems im Hinblick auf hohe Steifigkeit, thermische Stabilität und ausreichende Antriebsleistung, eine bauteilbezogene Optimierung des Werkzeuges und die individuelle Anpassung der Werkstückspannvorrichtung an die Bearbeitungsaufgabe. Die Anforderungen bei der Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe an die Maschine wurden von WECK & MARPERT (1996) analysiert.

Während IWANOW U. A. (1993) die Temperatur und Spannungsberechnung beim Schleifen keramischer Werkstoffe beschreibt, gibt LIERSE (1998) die Zusammenhänge zwischen der mechanischen und thermischen Wirkung beim Schleifen keramischer Werkstoffe wieder. Beide versuchen den Schleif-Prozeß dahingehend zu optimieren.

Untersuchungen zur Optimierung der Konditionierung von Diamantschleifscheiben wurden von WARNECKE U. A. (1994b), WARNECKE & WIMMER (1994) durchgeführt. Außerdem konnten zur bearbeitungsgerechten Werkzeugvorbereitung und –auswahl beim Schleifen von Hochleistungskeramik Maßgaben geschaffen werden. Zur Schleifbearbeitung empfiehlt es sich kunstharzgebundene Schleifscheiben mit Korngrößen von D46 bis D91 in splitterfreudiger Ausführung und einer Konzentration C75 zu verwenden, da hierdurch im Konditionierprozeß, so wie im Schleifprozeß beste Bearbeitungsverhältnisse geschaffen werden.

Durch den Einsatz künstlicher neuronaler Netze wollen SCHULZ & KALHÖFER (1998) die optimalen Zerspanungsparameter in einem Prozeß identifizieren. Der Zusammenhang zwischen Eingangsgrößen der Zerspanung (Werkstoff, Schneidstoff, Werkzeuggeometrie und Schnittparameter) und den Ausgangsdaten (Standzeit, Schnittkraft) muß bekannt sein, damit optimale Schnittparameter bei der Arbeitsplanung festgelegt werden können. Die Abbildung dieses Zusammenhangs mit neuronalen Netzen bietet die Möglichkeit auch für Werkstoffe, die beim Anlernen des Netzes nicht benutzt

worden sind, Standzeit und Schnittkraft hinreichend genau vorhersagen zu können. Eine wichtige Fähigkeit neuronaler Netze ist ihre Generalisierungsfähigkeit. Das bedeutet, sie können nicht nur Daten (Zuordnungen von Ein- und Ausgabegrößen) speichern. Sie können aus den beim Lernen präsentierten Daten die inneren Zusammenhänge erkennen und damit auch für nicht gelernte Eingangsgrößen sinnvolle Ausgangsgrößen bestimmen. Allerdings müssen im Anfangsstadium für die Anpassung der Netzstruktur an das Problem ausreichende Trainingsdaten zur Verfügung stehen. Das Modell arbeitet nur so gut, wie die Daten es erlauben.

3.2 Abgrenzung gegenüber anderen Arbeiten

Arbeiten zur Einzelprozeßoptimierung von Bearbeitungsverfahren dienen zwar als Grundlage für die mehrstufige Prozeßoptimierung, geben selbst aber keinerlei Verkettungszusammenhänge wider.

Optimierungsprobleme bestehen darin, daß ein Gütekriterium (Zielfunktion) einen möglichst kleinen oder großen Wert annehmen soll. Die zu treffenden Entscheidungen werden durch sogenannte Entscheidungsvariablen beschrieben, die man zu bestimmen sucht. Dabei sind gewisse Nebenbedingungen oder Beschränkungen (Restriktionen) zu beachten (MORLOCK 1993).

Im allgemeinen lassen sich Entscheidungsprobleme auf folgende Grundmodelle zurückführen: Gegeben sei die Menge M der möglichen Entscheidungsalternativen und eine Abbildung der Menge der Entscheidungsalternativen auf die reellen Zahlen, die jeder Entscheidungsalternative eine reelle Zahl zuordnet. Diese Abbildung heißt Zielfunktion (KISTNER 1993). Weiter sei die Teilmenge $K \subseteq M$ der zulässigen Entscheidungen gegeben. Dann hat ein Entscheidungsproblem die Form: Gesucht wird eine Alternative, so daß die Zielfunktion einen möglichst großen (oder möglichst kleinen) Wert annimmt $Z(x) \Rightarrow \max! \text{ (min!)}$ und die Entscheidung zulässig ist $x \in K$.

Die Zielfunktion in der vorliegenden Arbeit ist die Minimierung der Summenzeit der Bearbeitungszeiten. Als Nebenbedingung wird das Erreichen einer bestimmten Oberflächengüte definiert. Dabei umfaßt die Oberflächenfunktion mehrere Prozeßstufen der Hartbearbeitung. Auch die Kosten bilden eine Nebenbedingung, unter der die Zielfunktion erfüllt werden muß. Allerdings werden diese in einem vorgeschalteten Planungsprozeß bereits betrachtet. Es können dennoch iterativ Rückschlüsse auf die Planungsergebnisse gezogen und diese korrigiert werden.

Die Verbesserung der Prozeßketten in Hinblick auf die Werkstückqualität und die Wirtschaftlichkeit wurde bereits von HOFFMEISTER & MICHEL (1996) untersucht. Sie ist kein singulärer sondern ein stetiger Prozeß, der nicht über längere Zeiträume vernachlässigt werden sollte. Die Basis der vorgestellten qualitätsorientierten Prozeßkettenoptimierung ist die Suche nach optimalen Einstellwerten für die Prozeßketten, so daß eine qualitätsgerechte und prozeßsichere Fertigung möglich wird. Modelle und Simulationsprogramme können dabei sowohl die richtigen Einstellparameter ermitteln, als auch prozeßbegleitend die Qualität der Werkstücke über Prozeßkenngrößen ermitteln und somit frühzeitig Prozeßabweichungen erkennen und Korrekturmaßnahmen einleiten. Vorgestellt werden die Zusammenhänge zwischen Werkstückqualität und Fertigungskosten über die Einstellparameter als Bindeglied. Nach einer Analyse von Prozeßketten führen HOFFMEISTER & MICHEL (1996) Maßnahmen zur Optimierung der Prozeßketten ein. Werkstückrauhtiefe und Schleifscheibenverschleiß werden analog zu SCHULZ & KALHÖFER (1998) mit Hilfe von neuronalen Netzen modelliert. Die Fertigungskonzepte werden anschließend über Summenbildung mit einer Bewertungsmatrix evaluiert.

Die tatsächliche Situation in Betrieben ist dadurch bestimmt, daß selten ein einzelnes Verfahren zum Einsatz kommt. Oft sind mehrere Fein- und Hartbearbeitungsverfahren hintereinandergeschaltet. Je nach Unternehmen werden Keramikwerkstücke in Losen von 1 (z.B. Schiffsschrauben, Propeller , usw.) bis 400000 (Wasserdichtscheiben, Lager,...) im Monat gefertigt.

Die zunehmende Zahl der Anwendungen für Industriekeramik führt zu der Forderung, vorhandene Rationalisierungsreserven in der kostenintensiven Hartbearbeitung auszuschöpfen. Durch die Vielzahl der möglichen Teilprozesse wie Schleifen, Honen, Läppen und Polieren ergeben sich zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten für die Prozeßkette. Versuche, die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen der einzelnen Fertigungsstufen zu analysieren sind ein erster Schritt zur Komplexitätsreduzierung. Durch die ausschließliche Betrachtung einzelner Teilprozesse werden jedoch bei Verbesserungsvorhaben nur lokale Optima aufgebaut, die aber das Potential der gesamten Prozeßkette nicht berücksichtigen.

Auf dem Gebiet der Hartbearbeitung wurden Untersuchungen unter jeweils spezifischen Gesichtspunkten am einzelnen Fertigungsverfahren durchgeführt. Erforscht wurden zumeist die Auswirkungen verschiedener Einflußparameter auf das Fertigungsergebnis. Ansätze, die die einzelnen Fertigungsstufen in Abhängigkeit von den vor- und nachgeschalteten Fertigungsverfahren optimieren, existieren derzeit nicht. Insbesondere eine systematische Variation der Fertigungsfolgen als Option zur Verringerung der Fertigungskosten und Reduzierung der Fertigungszeiten wird nicht berücksichtigt.

Bei flexiblen Losgrößenänderungen muß die Prozeßkette auf das neue Los zugeschnitten werden. Es kann vorkommen, daß in bestimmten Betrieben, die eine sehr breite aber keine tiefe Fertigung haben, die Neuauslegung des Prozesses sehr häufig stattfindet. Heutzutage werden Wechsellpunkte bzw. Umschaltunkte von einem Verfahren auf das nächstfeinere, sowie Zeit- und Kostenoptima nach der Methode der Einzelprozeßoptimierung ermittelt. Die Bestimmung der Umschaltunkte und der Bearbeitungsdauer geschieht meist nach Gefühl und Erfahrung, da die Planer keine rechnerischen Hilfsmittel in der Hand haben (ABAY 1997C, HUBER 1995, WOBKER 1997).

Diesen Bedarf erkannte auch HUBER (1993); er analysierte die relevanten Hartbearbeitungsverfahren und entwickelte für den Schleif- und Läpp-Prozeß mit losem Korn einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Stellgrößen

und den Prozeßkräften, den Oberflächenwerten, dem Gütefaktor und der Abtragsgeschwindigkeit. Da die Funktionsstruktur zur mathematischen Beschreibung der Wirkzusammenhänge im allgemeinen unbekannt ist, setzt die Anwendung der Regressionsanalyse die Wahl eines geeigneten Modells voraus, in dem dann die unbekannten Parameter mittels statistischer Daten geschätzt werden müssen. In diesem Punkt grenzt sich die vorliegende Arbeit ab. Hier werden tatsächlich mathematische Funktionen gefunden, die die Wirkzusammenhänge über mehrere Stufen wiedergeben.

Die Stellparameter der Einzelprozeßstufen wurden bei HUBER (1993) in gegenseitiger Abhängigkeit variiert und die Zeitabhängigkeit der Oberflächengrößen beschrieben. Beim Schleif-, Läpp-Prozessen, in denen mit grobem Korn gearbeitet wird, stellt sich infolge der großen Abtragsleistung die Oberflächentopographie in kurzer Zeit ein. Die Oberflächengrößen sind somit ausschließlich eine Funktion der System- und Stellgrößen.

Beim Läppen und Polieren mit kleinen Korngrößen unter $15\text{ }\mu\text{m}$ Korndurchmesser kommt es aufgrund der geringen Abtragsgeschwindigkeiten zu einer zeitlichen Abhängigkeit der Oberflächenkenngrößen. Die Oberflächengrößen lassen sich durch Regressionsanalyse ermittelte Funktionen allein nicht mehr darstellen, sondern sind zudem eine Funktion der Zeit (Bild 3.2).

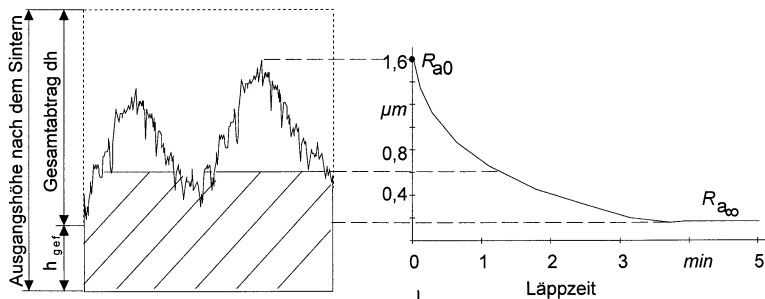


Bild 3.2: Zeitlicher Verlauf des arithmetischen Mittenrauhwerts R_a als Funktion der Läppzeit t_l .

Für den arithmetischen Mittenrauhwert R_a ergibt sich folgende zeitliche Abhängigkeit (Abkürzungen s. Kapitel 0.2 und 0.3):

$$R_a(t) = R_{a0} - (R_{a0} - R_{a\infty}) \cdot \left(\frac{(2 \cdot e_2 + 1) \cdot \dot{h}_\infty \cdot t}{R_{k0} + W_{i0} - R_{k\infty} - W_{i\infty}} \right)^{1/2 \cdot e_2 + 1} \quad (3.1)$$

Analog ergibt sich nach HUBER (1994) für die zeitliche Abhängigkeit der Wellentiefe W_t :

$$W_t(t) = W_{t0} - (W_{t0} - W_{t\infty}) \cdot \left(\frac{(2 \cdot e_2 + 1) \cdot \dot{h}_\infty \cdot t}{R_{k0} + W_{i0} - R_{k\infty} - W_{i\infty}} \right)^{1/2 \cdot e_2 + 1} \quad (3.2)$$

So unterliegt die Änderung der Oberflächengüte während der Bearbeitungsvorgänge direkten Abhängigkeiten, die sich über die Prozeßparameter einstellen lassen. Eine herkömmliche Prozeßanalyse dieser Art liefert zwar eine Aussage über die zeit- oder kostenoptimalen Einstellungswerte zur Erzielung der geforderten Oberflächengüte, basiert aber auf einstufigen Prozeßabhängigkeiten und vordefinierten mathematischen Funktionen, deren Gültigkeitsbereich auf einen speziellen Prozeß mit spezifischen Randbedingungen eingeschränkt ist. Die Funktionen werden i. a. durch Regressionsanalyse aus den Versuchswerten abgeleitet. Eine Optimafindung im Sinne der Zielvorgabe über mehrstufige Prozesse kann nicht realisiert werden.

Nach einer vordefinierten Systematik leitet HUBER (1993) die mit den unterschiedlichen Fertigungsmitteln realisierbaren Fertigungsfolgen her und bewertet sie bezüglich der Zielfunktion. Die Zielfunktion lautet „minimale Belegungszeiten“ bzw. „minimale Fertigungskosten“. Allerdings greift HUBER (1993) auf feste prozeßeigene mathematische Zusammenhänge zurück um die Bewertung vornehmen zu können. Diese Vorgehensweise bietet sehr

wenig Spielraum für eine allgemeingültige Anwendung der Methode. Die Optimierung der Fertigungsfolgen findet weitgehend qualitativ statt.

Die Abgrenzung zu den Arbeiten von HUBER (1993, 1995) entsteht in dieser Arbeit durch die universelle Anwendbarkeit der mathematischen Methoden auf mehrstufige Prozesse. Der Bezug zu den spezifischen Bearbeitungsfällen entsteht durch die Modellierung einer Funktion innerhalb der gefundenen mathematischen Methode. Im Gegensatz zu HUBER (1993) werden Eingangswerte der Prozesse nicht separat analog einer Prozeßanalyse aufgearbeitet, sondern fließen in eine Gesamtbetrachtung ein. Die Eingangsgrößen werden zwar einer statistischen Untersuchung im Sinne der Ausreißereliminierung unterzogen (KROTTMAIER 1994, TAGUCHI 1989, SPUR U. A. 1995), werden aber nicht über statistische Methoden moduliert. Eine Regressionsanalyse bildet in dieser Arbeit keine geeignete Grundlage zur mehrstufigen Betrachtungsweise des Optimierungsproblems, weil dabei keine Korrelation zwischen Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen berücksichtigt wird. Durch lineare und nichtlineare Ansätze werden prozeßübergreifende Abhängigkeiten und optimale Umschaltpunkte der Einzelprozeßstufen in Bezug gebracht. Die Zwischenrechnung bedarf keiner Fehleranalyse (TAYLOR 1988), da auf Ganzzahlarithmetik zurückgegriffen wird.

Die angewandten mathematischen Methoden der linearen und nichtlinearen Ausgleichsrechnung liefern durch ausreichende Interpolationsschritte schnelle und zuverlässige Optimierungswerte.

Ein lineares Optimierungsproblem zeichnet sich dadurch aus, daß die Zielfunktion eine lineare Funktion der Entscheidungsvariablen ist und daß die Nebenbedingungen in Form linearer Gleichungen oder Ungleichungen für die Entscheidungsvariablen gegeben sind.

Ein nichtlineares Optimierungsproblem liegt dagegen vor, wenn die Zielfunktion und die in den Nebenbedingungen vorkommenden Funktionen der Entscheidungsvariablen nicht mehr sämtlich lineare Funktionen darstellen.

Weiterhin unterscheidet man kombinatorische Optimierung, wo ganzzahlige Variablen und damit ganzzahlige Optimierungsprobleme auftreten, wenn kein Kontinuum von Alternativen vorliegt. Ist speziell die Menge der möglichen Alternativen und damit der zulässige Bereich endlich, so spricht man auch von einem kombinatorischen Optimierungsproblem.

In der dynamischen Optimierung betrachtet man Probleme, die in einzelne Stufen zerlegt werden können, so daß die Gesamtoptimierung durch eine stufenweise Optimierung ersetzt werden kann (MORLOCK 1993). Letztgenannte Optimierungsmethoden sind in dieser Arbeit nicht zielführend (PAPAGEORGIOU 1991).

Die Betrachtung der Kapazitätsauslastungen, der logistischen Kosten sowie die Kostenoptimierung in der Hartbearbeitung sind nicht Grundlage dieser Arbeit. Es stellte sich die Forderung nach einem gesamtheitlichen Ansatz für die Hartbearbeitung von Industriekeramik, um für ein vorgegebenes Produktionsspektrum diejenigen Fertigungsfolgen ermitteln und optimieren zu können, die eine bestmögliche Erfüllung hinsichtlich geforderter Zielfunktionen gewährleisten. Eine Zielfunktion ist z. B. die Bearbeitung mit minimalen Bearbeitungszeiten unter Beibehaltung geforderter Toleranzen. HUBER (1993) untersuchte bereits die Kostensituation und leitete als Optimierungsmaßnahme die Parallelschaltung von Maschinen ein. Dabei gründet er auf der Auswahl und Bewertung von Fertigungsfolgen in der gesamten Fertigungskette.

4 Methoden zur mathematischen Beschreibung und Lösung des Optimierungsproblems

4.1 Allgemeiner Ansatz

4.1.1 Zieldefinition

Es sind für einen mehrstufigen Fertigungsprozeß die Wechselzeitpunkte t_1, \dots, t_n zwischen den einzelnen Prozeßschritten derart zu bestimmen, so daß

$$\sum_{i=1}^n t_i \rightarrow \text{MIN} \quad (4.1)$$

unter der Zielvorgabe einer geforderten Oberflächengüte R_s , eines Gesamtabtrags h_{end} und der geforderten Kosten. Wobei der Kostenrahmen in einem vorhergehenden Schritt abgesteckt werden muß.

Problematisch dabei sind die Abhängigkeiten zwischen den Parametern einer Prozeßstufe, wie z. B. die Prozeßstellparameter in Abhängigkeit von der Zielgröße R_s , die wiederum von Vorgängerprozessen beeinflusst werden und Nachfolgeprozesse beeinflussen. So erschweren die internen und externen Abhängigkeiten die Optimafindung.

Die internen Prozeßabhängigkeiten von den Zielparametern und die externen Abhängigkeiten zwischen den Prozeßstufen PS , lassen sich in einer Matrix $PS \times p$ zusammenfassen, wobei p die möglichen Prozeßparameter der Prozeßstufe angibt.

4.1.2 Lösungsansatz

Bei der Auswertung von Versuchen wurde, um die Datenmenge zu reduzieren, vor der Berechnung eine Elimination von Meßfehlern nach gängigen Methoden aus BAMBERG & BAUR (1994), SMIRNOV (1973) und KROTTMAIER (1994) vorgenommen. Ein Versuchsergebnis wurde aus der weiteren Berechnung entfernt, wenn es um mehr als 3σ vom Mittelwert der anderen dazugehörigen Ergebnisse abwich. Solche Ergebnisse repräsentieren nicht den regulären Versuchsablauf, sondern resultieren aus Fehlern bei der Einstellung und Bestückung der Maschinen, sowie Fehlern bei der nachfolgenden Messung.

Auf eine numerische oder statistische Untersuchung der erzielten Ergebnisse auf Rundungsfehler und deren Fortpflanzung kann verzichtet werden, da das verwendete Programm Mathematica statt mit Gleitkommazahlen mit exakten rationalen Zahlen arbeitet (HOFFMANN & KHAYYAL 1987). Eine Rundung ist also an keiner Stelle vorgenommen worden. Bei allen numerischen Berechnungen wurde eine Genauigkeit von mindestens 12 Nachkommastellen voreingestellt, ohne daß die Rechenzeit darunter gelitten hätte.

Da keine explizite Darstellung von R_s als Funktion der Prozeßparameter existiert, muß eine Näherungslösung für R_s gefunden werden. Dabei bedient man sich numerischer Verfahren (KISTNER 1993, MORLOCK 1993, REEVES 1993).

Die in der Numerik behandelten Probleme haben folgende abstrakte Beschreibung. Sie ist notwendig, um daran anschließend den Begriff der Kondition eines Problems allgemeingültig formulieren zu können. Nach REINSCH (1995) lautet diese Beschreibung:

Zulässige Eingabe-Daten: Ein n -Tupel x reeller Zahlen: $x \in D \subseteq \mathbb{R}^n$

Resultat: Ein m -Tupel y reeller Zahlen: $y \in \mathbb{R}^m$

Problem: Eine Funktion (Abbildung) $p: \mathbf{D} \rightarrow \mathbb{R}^m$, die allen zulässigen Eingabe-Daten das eindeutige Resultat zuordnet: $y = p(x)$; p ist eine vektorwertige Funktion mit $y_i = p_i(x_1, \dots, x_n)$, $i = 1, \dots, m$.

Gesucht ist eine Näherung für $R_a: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ als Funktion von $n > 1$ Variablen. Wäre diese Funktion explizit bekannt, so könnte man eine Taylorentwicklung um einen bestimmten Punkt durchführen (SPIEGEL 1977). Diese Taylorentwicklung bestimmt man nun numerisch bis zu einem gewissen Grad als Ersatz für die unbekannte und nicht explizit zu entwickelnde Funktion $R_a: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Dieses Verfahren wird in der numerischen Mathematik häufig zur Lösung der unterschiedlichsten Probleme eingesetzt. Die anschließende Optimumssuche wird in allen Fällen mit Hilfe des Lagrange-Ansatzes durchgeführt (Kapitel 4.3). Der Ablauf wird in Bild 4.1 wiedergegeben.

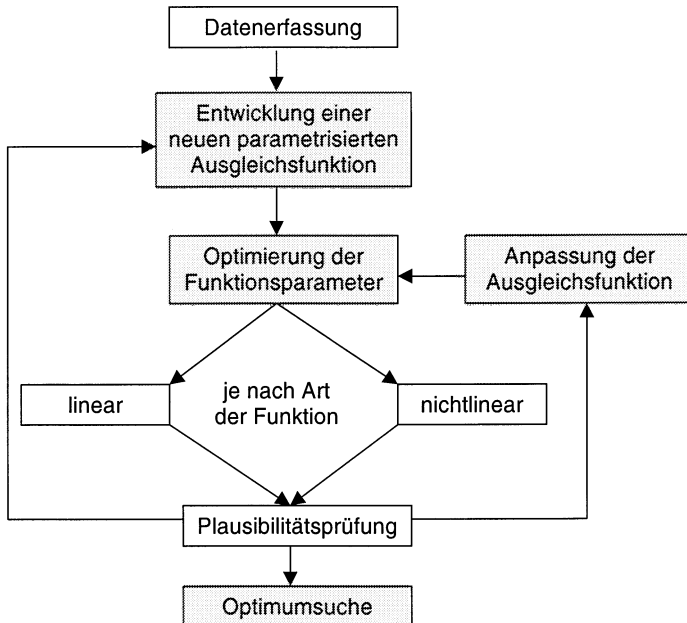


Bild 4.1: Vorgehensweise bei der Optimierung

4.2 Numerische Methoden zur nichtlinearen Optimierung der Rauheitsfunktion

Das Ziel ist, die Rauheit als eine Näherungsfunktion der 3 Prozeßzeiten (hier exemplarisch für die Prozesse Schleifen, Läppen, Polieren) darzustellen, um dann eine Stelle zu finden, an der die Summe der Zeiten minimal ist unter der Nebenbedingung

$$R_a(t_{\min SR} + t_{\min SL} + t_{\min L} + t_{\min P}) = R_{\text{gef}}$$

Eingangs wurde versucht, das Optimierungsproblem linear durch das Auflösen eines überbestimmten linearen Gleichungssystems der Form $Ax = b$ nach x zu beschreiben.

Für dieses lineare Ausgleichsproblem gibt es bereits allgemeine numerische Verfahren. Jedoch ergeben sich unlogische Lösungen (6.1). Ursachen hierfür sind sicherlich die unstetigen Verläufe in den Prozessen und die schlechte Konditionierung der Matrizen (siehe Bild 4.2).

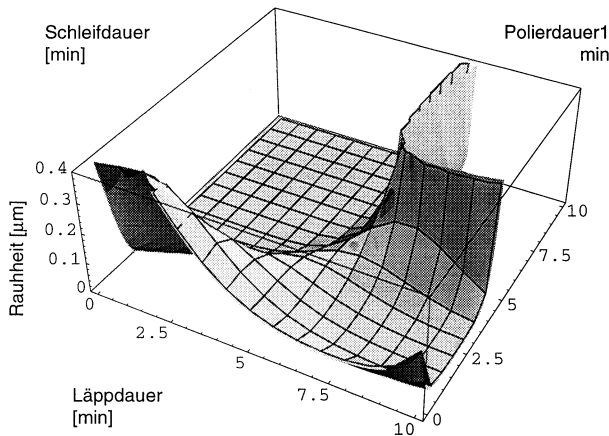


Bild 4.2: Rauheitsverhalten bei linearer Optimierung mit Hilfe von Exponentialfunktionen (bei 1 Minute Polierdauer).

Im Bild 4.2 wird ersichtlich, daß sich bei linearer Optimierung die Rauheitswerte mit zunehmender Läppdauer verschlechtern (ca. ab 8 min). So ein Verlauf ist in der Realität nicht gegeben. Sinnvolle Ansätze ergeben sich durch numerische Methoden zur nichtlinearen Optimierung, die im folgenden vorgestellt werden.

4.2.1 Methode der kleinsten Quadrate und X^2 -Fit-Verfahren

Ein Gleichungssystem $Ax=b$ (linear oder nichtlinear) kann mehr Gleichungen als Unbekannte umfassen, also überbestimmt sein. In der Versuchsumgebung sieht das Ausgleichsproblem meist wie folgt aus:

Gegebene Eingangswerte y_i zu entsprechenden Meßzeiten t_i seien mit zufälligen Fehlern mit mittlerer Streuung $\delta y_i > 0$ behaftet. Diesen Meßpunkten steht eine Theorie, formuliert als mathematische Modellgleichung $y = f(t|p)$ in Abhängigkeit vom unbekannten *Parametervektor* $p = (p_1, \dots, p_m)^T$, gegenüber. Der Abgleich von fehlerbehafteter Messung und Theorie geschieht durch Anpassung der Parameter p_i nach der Methode der kleinsten Quadrate:

$$\text{finde } \vec{p} \in \mathbb{R}^m \text{ so, daß } \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - f(t_i | \vec{p})}{\delta y_i} \right)^2 \rightarrow \text{MIN} \quad (4.2)$$

Diese Summe dient als Bewertungsfunktion für das Maß der Übereinstimmung zwischen Meßdaten und Modellfunktion. Die Parameter der Modellfunktion werden also so lange variiert, bis die Bewertungsfunktion ihr absolutes Minimum erreicht. Dieser (Parameter-)Anpassungsprozeß stellt somit allgemein ein mehrdimensionales Minimierungsproblem dar.

Da die Ungenauigkeiten der Meßwerte meist mit Hilfe einer statistischen Größe, wie die Standardabweichung, beschrieben werden können, wird eine Schätzung der Parameter (i. A. in Form eines Maximum-Likelihood-Schätzers) möglich. Sind z. B. die statistischen Meßunsicherheiten vonein-

ander unabhängig und normalverteilt mit konstanter Standardabweichung, so genügt der eben vorgestellte Least-Squares-Fit (4.2) als Maximum-Likelihood-Schätzer.

Hat jedoch der Meßpunkt eine unterschiedliche Standardabweichung, so ist ein sog. Chi-Quadrat (χ^2)-Fit notwendig. Es wird hierbei davon ausgegangen, daß jeder Meßwert y_i zum Zeitpunkt t_i mit der Standardabweichung σ_i behaftet ist. Folglich werden durch Minimierung der Größe:

$$\chi^2 := \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - f(t_i | a_1 \dots a_m)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (4.3)$$

die wahrscheinlichsten Werte für die Modellparameter a_1, \dots, a_m gefunden. Dabei bezeichnet y_i ($i=1 \dots n$) den Wert der Modellfunktion für den aktuellen Parametersatz zur Meßzeit t_i . χ^2 stellt als Summe von Fehlerquadraten normalverteilter Größen y_i , bezogen auf die statistische Einheit der Varianz σ_i^2 , die Bewertungsfunktion für die im nächsten Abschnitt zu besprechenden Fit-Verfahren dar.

Die Meßfehler sind in vielen Fällen unbekannt. Jedoch können sie zu Beginn der Berechnung unter bestimmten Annahmen als konstant (meist 1) gesetzt werden. Anhand der Ergebnisse, die durch die Parameteranpassung erhalten werden, ist eine Berechnung der Varianz möglich:

$$\sigma^2 := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y(t_i))^2 \text{ mit } n = \text{Anzahl der Meßpunkte} \quad (4.4)$$

Wie bereits angedeutet liegen die lokalen Minima der Bewertungsfunktion χ^2 in den Nullstellen der partiellen Ableitungen (nach den m Parametern). Hieraus ergibt sich ein Gleichungssystem mit n Gleichungen für die m (unbekannten) Modellparameter a_k , dargestellt in folgender Gleichung:

$$0 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - y(t_i)}{\sigma_i^2} \right) \cdot \left(\frac{\partial(y(t_i) | \dots a_k \dots)}{\partial a_k} \right) \quad \forall k = 1 \dots m \quad (4.5)$$

A bezeichnet im folgenden eine $(n \times m)$ -Matrix (= normierte Hesse-Matrix), die, bezogen auf den jeweiligen Meßfehler, die normierten ersten partiellen Ableitungen der Modellfunktion zu den Zeitpunkten t_i enthält.

$$A_{ij} \equiv \left(\frac{y'(t_{ji})}{\sigma_{ij}} \right) \quad i = 1, \dots, n \quad \text{und} \quad j = 1, \dots, m \quad (4.6)$$

Der n -elementige Hilfsvektor b enthält die entsprechenden normierten Meßwerte und ist wie folgt definiert:

$$b_i \equiv \frac{y_i}{\sigma_i} \quad (4.7)$$

Die oben erwähnten Normalgleichungen können nun für das X^2 -Problem wie folgt umformuliert werden:

$$\alpha \cdot \vec{a} = \vec{\beta} \quad (4.8)$$

Dabei ist α eine symmetrische $(m \times m)$ -Matrix, für die gilt:

$$\alpha = A^T A \quad \text{bzw.} \quad \alpha_{jk} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \left[\frac{\partial y(x_i) \cdot \partial y(x_i)}{\partial a_j \cdot \partial a_k} \right] \quad \forall j, k = 1, \dots, m \quad (4.9)$$

Sie wird auch als Krümmungsmatrix bezeichnet, da sie die Krümmung der X^2 -Hyperebene beschreibt. β ist der m Elemente zählende Vektor, für den gilt:

$$\beta = A^T b \quad \text{bzw.} \quad \beta_k = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \left[\frac{y_i - y(x_i)}{\sigma_i^2} \cdot \frac{\partial y(x_i)}{\partial a_k} \right] \quad \forall k = 1, \dots, m \quad (4.10)$$

Invertiert man die Matrix α so enthalten die Diagonalelemente der Ergebnismatrix C die Varianzwerte $\sigma_i^2(a_k)$ der einzelnen Modellparameter und die übrigen Elemente c_{jk} die Kovarianz der Parameter a_j und a_k , welche eine eventuelle Korrelation der Modellparameter untereinander beschreibt (HARTUNG & ELPELT 1995).

Die bisher beschriebenen Eigenschaften von Least-Square- und X^2 -Fit-Verfahren gelten sowohl für lineare als auch nichtlineare Gleichungen und sind die Grundlage für die nun folgenden Methoden. Da die meisten angewandten mathematischen Modelle, wie auch in der vorliegenden Arbeit, Parameter enthalten, die in nichtlinearer Form auftreten, werden im folgenden nichtlineare Optimierungsverfahren vorgestellt. Nichtlinearität in den Parametern bedeutet, daß ein oder mehrere der in der Modellgleichung gesuchten Parameter z. B. im Exponenten auftreten. Die folgenden Beispiele sollen den Unterschied zwischen Linearität und Nichtlinearität in den Parametern verdeutlichen.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n [a_i - f_i(x)] \quad (4.11)$$

Alle Parameter treten in linearer Form auf.

$$g(x) = a_1 + a_2 \cdot e^{(-t/a_4)} + a_3 \cdot e^{(-t/a_5)} \quad (4.12)$$

Die Gleichung $g(x)=\dots$ ist nichtlinear in den Parametern a_4 und a_5 , jedoch ist sie linear in den Parametern a_1 , a_2 und a_3 . Insgesamt handelt es sich also um eine nichtlineare Funktion.

Bei den nun vorzustellenden nichtlinearen Optimierungsmethoden geht es stets darum, das Minimum der X^2 -Hyperebene iterativ zu finden. Der Unterschied der einzelnen Verfahren liegt in der Art und Weise, wie dieses Minimum gesucht wird. Wie solch eine X^2 -Hyperebene für zwei Parameter aussehen kann, zeigt folgende Abbildung (Bild 4.3):

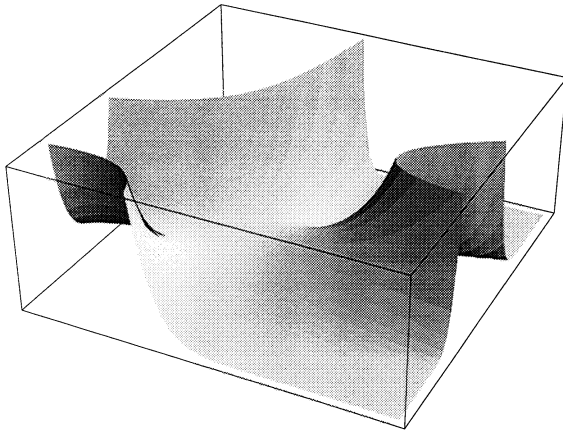


Bild 4.3: Beispiel einer Hyperebene.

Bevor nun zur Beschreibung der verschiedenen Verfahren übergegangen wird, sollen einige generelle Probleme, die bei der Suche nach den gewünschten Parametern auftreten, behandelt werden.

4.2.2 Suche im Parameterraum

Begründet in der Natur von Approximations-Prozessen und in der Beschaffenheit des Lösungsraumes, also der X^2 -Hyperebene, kann nicht der gesamte Parameterraum durchsucht werden (LOCHER 1993).

Die Effizienz und die Effektivität eines Approximations-Prozesses sind unter anderem von der Wahl der Optimierungsmethode, der Wahl der Startparameter, der Schrittweite des Suchverfahrens und evtl. weiteren

Schätzungen abhängig. In diesem Zusammenhang wird vor allem verlangt, daß das Verfahren

- überhaupt konvergiert,
- schnell konvergiert,
- die Parameterwerte bestimmte Bedingungen erfüllen und
- die gefundene Lösung im absoluten Minimum der Bewertungsfunktion liegt.

Es ist häufig der Fall, daß die X^2 -Hyperebene mehrere lokale Minima enthält und der Fit in einem dieser Minima landet und nicht das eigentlich gesuchte globale Minimum findet. Zu den geforderten Bedingungen gehört z. B., daß die Ergebnisse normalverteilt mit bestimmter Standardabweichung sind, was i. a. für alle meßfehlerbehafteten Größen zutrifft, und nur positive Werte annehmen können. Insbesondere die Wahl der Startparameter beeinflusst diese Eigenschaften. Bei relativ hoher Dimension des Parameterraums wird anstelle einer Matrix von Startwerten ein sogenanntes Monte Carlo Verfahren, was eine Simulationsmethode zur Lösung von mathematischen und statistischen Problemen durch die Verwendung von Zufallstichproben darstellt, zur Parameter-Findung vorgeschlagen.

Bei der Wahl der Schrittweite sollte beachtet werden, daß wenn sie sehr klein ist, das Verfahren nur sehr langsam konvergiert. Hingegen wird bei zu großer Schrittweite über das globale Minimum hinausgesteuert (BEVINGTON 1992) und es ist eine ständige Nachbesserung notwendig, um das Tal der Funktion, wo sich das Minimum befindet, einzugrenzen.

Das allgemeine Konvergenzkriterium von Fit-Verfahren ist X^2 . Um dies noch zu verschärfen, wird das sog. reduzierte Chi-Quadrat $\tilde{\chi}^2$ eingesetzt. Es ist wie folgt definiert:

$$\tilde{\chi}^2 \equiv \frac{\chi^2}{fg} \quad \text{mit } fg := n - m \quad (4.13)$$

Hierbei steht fg für Freiheitsgrad. n ist die Anzahl der beobachteten Daten und m die Anzahl der daraus extrahierten Parameter. Da laut TAYLOR (1988) die Anzahl fg der Freiheitsgrade exakt dem Erwartungswert von X^2 entspricht, also $X^2 = fg$, ist der Erwartungswert von $\tilde{\chi}^2 \approx 1$. Somit ist es sehr wahrscheinlich, falls X^2 einen Wert um 1 herum annimmt, daß die angenommene Normalverteilung gegeben ist.

Ein ideales Optimierungsverfahren sollte nun möglichst alle besprochenen Forderungen erfüllen. Wie weit dies im einzelnen der Fall ist, kann dem nun folgenden entnommen werden.

4.2.3 Gradientensuchverfahren

Bei diesem nichtlinearen Optimierungsverfahren, das auch als Methode des steilsten Abstiegs (*engl.: steepest descent*) bezeichnet wird, versucht man das X^2 -Minimum zu finden, indem man einen Vektor im Parameterraum, der in Richtung des Gradienten ∇X^2 verläuft, in dessen entgegengesetzter Richtung verfolgt. Bei diesem rein approximativen Verfahren wird dies durch die gleichzeitige Inkrementierung aller Parameterwerte a_k erreicht. Die Komponenten des Gradientenvektors ∇X^2 im Parameterraum sind gleich den Änderungsraten von X^2 längs der jeweiligen Parameterachse:

$$\nabla \tilde{\chi}^2 = \sum_{j=1}^m \left[\frac{\partial \chi^2}{\partial a_j} \cdot \hat{a}_j \right] \quad (4.14)$$

Hierbei bezeichnet \hat{a}_j einen Einheitsvektor, der in Richtung der a_j -Koordinatenachse verläuft. Zur Bestimmung des Gradienten werden die partiellen Ableitungen für die einzelnen Komponenten numerisch approximiert:

$$\left(\nabla \tilde{\chi}^2 \right)_j = \frac{\partial \chi^2}{\partial a_j} \cong \left[\frac{\chi^2(a_j + f \cdot a_j) - \chi^2(a_j)}{f \cdot \Delta a_j} \right] \quad (4.15)$$

f beschreibt den Anteil der Schrittweite da_j , um den a_j zur Bestimmung der Ableitung geändert wird.

Zu Beginn des Verfahrens werden alle Parameter gleichzeitig um die jeweilige Schrittweite da_j inkrementiert. Anschließend kann auf unterschiedliche Weise fortgefahren werden. Der offensichtliche Ansatz berechnet nach jeder Änderung in den Parametern den Gradienten neu. Dies ist allerdings sehr ineffizient. Bei einer anderen Möglichkeit wird in kleinen Schritten entlang des originalen Gradienten gesucht, wobei nur der X^2 -Wert berechnet wird, bis er zu steigen beginnt. An dieser Stelle wird dann der Gradient neu berechnet und die Suche wird nun in Richtung dieses neuen Gradienten fortgesetzt. Auch diese Möglichkeit erfüllt nicht alle Erwartungen. Eine allerdings recht aufwendige Näherung benutzt die zweiten partiellen Ableitungen von X^2 , um Änderungen des Gradienten zu bestimmen.

Dieses Verfahren kann mit einem Skifahrer verglichen werden, der bei dichtem Nebel von einem Berg ins Tal fährt. Da er sein Ziel nicht sehen kann, fährt er in Richtung des steilsten Abstiegs und legt seinen Weg so lange zurück, bis er wieder zu steigen beginnt. Dann wählt er eine neue Richtung des steilsten Abstiegs und fährt wiederum abwärts. Dieser kann aber auch unendlich lange andauern. Die geometrische Interpretation zeigt Abbildung 4.4. Hierin stellen die gestrichelten Linien die Höhenlinien dar. Die Richtung des Gradienten, dargestellt durch den jeweiligen Pfeil, ist orthogonal zu der Richtung der Höhenlinien in jedem Punkt.

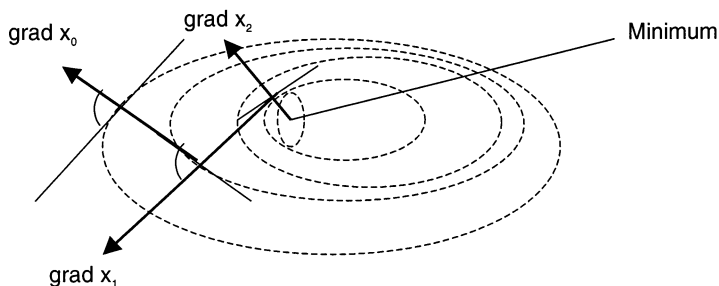


Bild 4.4: Geometrische Interpretation des Gradientensuchverfahrens.

Vorteil des Gradientensuchverfahrens ist, daß es für Startwerte, die weit entfernt vom X^2 -Minimum liegen, rasch dorthin konvergiert. Jedoch unabhängig davon, auf welche Weise die Gradienten-Suchrichtung bestimmt wird, ist dieses Verfahren meist ziemlich ineffektiv, falls die Startwerte in der Nähe des gesuchten X^2 -Minimums liegen. Dies hat zur Folge, daß in ausgedehnten, flachen Tälern der X^2 -Hyperebene, die Parameterbestimmung unsicher wird und das Verfahren in einem lokalen Minimum landet. Das bedeutet, das gesuchte globale Minimum wird unter Umständen nicht immer gefunden (BEVINGTON 1992).

4.2.4 Entwicklungsverfahren

Im Gegensatz zum besprochenen Gradientensuchverfahren, bei dem die gegebene X^2 -Hyperebene approximativ abgetastet wird, versuchen Entwicklungsverfahren mit Hilfe approximierter analytischer Funktionen, die X^2 -Fläche zu beschreiben und deren Minimum zu finden. Diese Approximation führt zwar neue Fehler in die berechneten Werte ein, aber durch anschließende Iterationen soll das X^2 -Minimum rasch gefunden werden. Eine Taylorentwicklung (meist zweiter Ordnung) von X^2 oder der Modellfunktion $f(x/p)$ ist das hierbei eingesetzte Verfahren, das mit der linearen Methode der kleinsten Quadrate zur Bestimmung des Optimums für die Parameterinkremente kombiniert wird.

$$\chi^2 \cong \chi_0^2 + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial \chi_0^2}{\partial a_j} \cdot \delta a_j \right) + \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial^2 \chi_0^2}{\partial a_j \cdot \partial a_k} \cdot \delta a_j \cdot \delta a_k \right) \quad (4.16)$$

Diese Gleichung entspricht der Näherung der X^2 -Hyperebene durch eine parabolische Fläche. δa_j sind die jeweiligen Parameterinkremente.

χ_0^2 entspricht einem lokalen Minimum von X^2 und ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$\chi_0^2 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{y_i - y_0(x_i)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (4.17)$$

Hierbei ist $y_0(x_i)$ der Funktionswert im lokalen Minimum der X^2 -Hyperebene, d. h. $\delta a_i = 0$ (BEVINGTON 1992).

Insgesamt ergibt sich hieraus eine Linearisierung der Funktion. Geometrisch bedeutet dies, daß die Tangente an die Funktion zur Beschreibung der Kurve bzw. der Hyperebene benutzt wird. In folgender Abbildung wird dieser Zusammenhang verdeutlicht.

Der Hauptvorteil dieser Methode liegt darin, daß nur wenige Punkte der X^2 -Fläche berechnet werden müssen; allerdings mit hohem Rechenaufwand. Ebenso vorteilhaft ist die Tatsache, daß dieses analytische Verfahren die Schrittweiten selbst wählt.

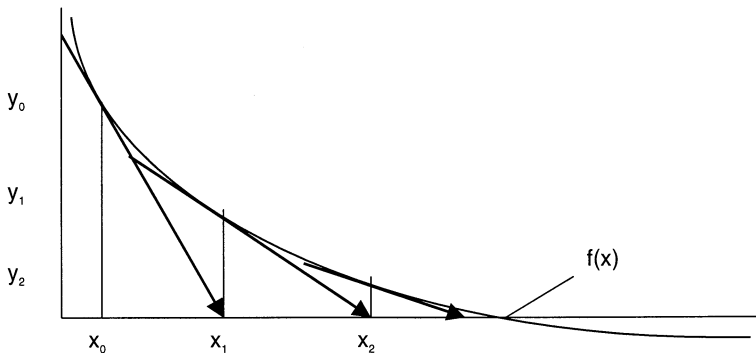


Bild 4.5: Geometrische Interpretation des Entwicklungsverfahrens.

Die Berechnung von X^2 erfolgt nun iterativ im sog. Gauß-Newton-Verfahren, wobei in jedem Schritt ausgehend vom Startparametervektor $x(0)$ ein neuer Parametervektor $x(i)$ ($i \geq 1$) in Abhängigkeit vom Richtungsvektor v entsteht (REINSCH 1991).

Gauß-Newton-Schritt

- a) Berechne $b := f(x(i)) \in \mathbb{R}^n$ und $A := f'(x(i)) \in \mathbb{R}^{n,m}$,
- b) Löse $A^T b + A^T A v$ nach $v \in \mathbb{R}^m$ auf, (4.18)
- c) $x(i+1) = x(i) + v$.

Der große Nachteil dieser analytischen Methode ist der, daß, obwohl sie für Startwerte in der Nähe des X^2 -Minimums sehr schnell konvergiert, sie für Werte die außerhalb von Bereichen, in denen die X^2 -Hyperebene approximativ parabolisch ist, das Minimum nicht findet. Insbesondere tritt dies auf, wenn die Krümmung negative Werte annimmt; d. h. es ist gegebenenfalls notwendig die Diagonalelemente der Krümmungsmatrix α auf positive Werte zu setzen.

Es wird also ein Verfahren gefordert, welches sich zu Beginn der Iteration wie ein Gradientensuchverfahren verhält und sobald es in die Nähe des Minimums gelangt, wie ein Entwicklungsverfahren reagiert.

4.2.5 Levenberg-Marquardt-Verfahren

Die Levenberg-Marquardt-Technik kommt diesen Forderungen nach, indem sie die positiven Eigenschaften der beiden eben vorgestellten Verfahren kombiniert. Sie ist eine Methode zur Minimierung der Fehlerquadrate, die je nach Interpolation als sequentielle Optimierung linearisierter Probleme unter Gleichgewichtsbedingungen, oder als Kombination von Gradientenabstieg und Gauss-Newton-Verfahren angesehen werden kann. Sie stellt deshalb bei

vielen Anwendungen einen idealen Kompromiß dar zwischen der Forderung nach möglichst schneller Konvergenz, die die Wahl von Verfahren höherer Konvergenzordnung nahelegt, und Problemstellungen mit schlechter Kondition, weshalb oft auf den Gradientenabstieg zurückgegriffen wird. Das Levenberg-Marquardt-Verfahren ist eine der wichtigsten Lösungsmethoden für nichtlineare Ausgleichsprobleme. Tatsächlich läßt sich zeigen, daß die Suchpfad-Richtungen von Gradientensuch- und Entwicklungsverfahren nahezu senkrecht zueinander stehen und die optimale Suchrichtung zwischen diesen beiden Vektoren liegt (BEVINGTON 1992).

Da das analytische Verfahren beim Levenberg-Marquardt-Algorithmus nur in der unmittelbaren Umgebung des Minimums angewandt wird, genügt es Taylorentwicklungen erster Ordnung einzusetzen; d. h. die Berechnung wird vereinfacht, da die zweiten Ableitungen in Gleichung (4.16) vernachlässigt werden können.

Um die Interpolation zwischen den beiden Grenzverfahren zu steuern, werden die Diagonalelemente der Krümmungsmatrix α um den Faktor $(1+\lambda)$ vergrößert. Durch Umformulierung von (4.16) ergibt sich nun die Levenberg-Marquardt-Methode zu folgender Matrizengleichung:

$$\beta = \delta a \cdot \hat{\alpha} \quad \text{wobei} \quad \hat{\alpha}_{jk} = \begin{cases} \alpha_{jk} (1 + \lambda) & \text{für } j = k \\ \alpha_{jk} & \text{für } j \neq k \end{cases} \quad (4.19)$$

Hierbei bezeichnet δa die m Parameterinkremente. Falls nun λ sehr klein ist, so liegt nahezu der Fall einer Entwicklungsmethode vor. Hingegen ergibt sich bei großem λ ein Gradientensuchverfahren, da δa nun in die dem Gradienten von X^2 entgegengesetzte Richtung zeigt. Die Parameterinkremente können mit Hilfe der Inversen \hat{C} der Krümmungsmatrix $\hat{\alpha}$ und der Matrix β wie folgt berechnet werden:

$$\delta a_j = \sum_{k=1}^m (\beta_j \cdot \hat{c}_{jk}) \quad (4.20)$$

Bei gegebenem Schätzvektor für die Startparameter a wird von Marquardt folgender Algorithmus (4.21) vorgeschlagen (SPELUCCI 1993):

1. Berechne $X^2(a)$ (gemäß Gl. (4.3)).
2. Setze geeignete Anfangswerte für λ , meist $\lambda=0.001$.
3. Berechne δa und $X^2(a+\delta a)$ mit dem vorherigen Wert von λ .
4. Falls $X^2(a+\delta a) > X^2(a)$, dann vergrößere λ um einen wesentlichen Faktor, z. B. 10 und wiederhole Schritt 3.
5. Falls $X^2(a+\delta a) < X^2(a)$, dann verkleinere λ um einen wesentlichen Faktor, z. B. 5. Aktualisiere a mit dem optimierten Parametersatz, also $a=a+\delta a$ und gehe zu Schritt 3, wobei a mit a' ersetzt wird.

Hierbei ist der Anfangswert für λ klein genug gewählt, um die Vorteile der analytischen Lösung nutzen zu können, aber auch groß genug, damit X^2 deutlich fällt.

Dieses Verfahren könnte man auch dadurch beschreiben, daß man den Teilschritt (b) im Gauß-Newton-Verfahren (4.18) durch folgenden ersetzt:

$$d) \text{ Löse } A^T b + (A^T A + D)v = 0 \quad (4.22)$$

wobei D eine Diagonalmatrix mit den Elementen $d_{ii} = (1+\lambda)$, $i=1, \dots, m$, darstellt. Bei diesem Verfahren nach Levenberg-Marquardt ist es meist bei jedem Iterationsschritt notwendig, die Parameterinkremente δa , den Vektor β sowie die Matrix α mehrere Male zu berechnen, um den Faktor λ zu optimieren. Wenn das Ergebnis in die Nähe des Minimums der X^2 -Hyperebene gelangt, sinkt der Wert für λ . Als Abbruchkriterium für dieses iterative Verfahren wird das reduzierte Chi-Quadrat X^2 verwendet. Sobald sich dieser Wert von einem Schritt auf den nächsten nicht mehr um z. B. 0.1% ändert wird das Verfahren abgebrochen.

Das Levenberg-Marquardt-Verfahren ist im Vergleich mit den bereits betrachteten Verfahren das aufwendigste, liefert aber eine sehr gute Annäherung an den realen Prozeß. Die eingesetzten Funktionen können mehrstufige Zusammenhänge logisch verknüpft wiedergeben. Es benötigt außerdem die geringste Anzahl von Suchschritten, um die gesuchte Lösung für den Parameter-Fit zu finden. Ebenso ist es deutlich unabhängiger von der Wahl der Startparameter. Liegen diese jedoch außerhalb vernünftiger Bereiche, so gerät auch dieses Verfahren in Schwierigkeiten und die erhaltenen Ergebnisse könnten in einem lokalen und nicht im absoluten Minimum der X^2 -Hyperebene liegen. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem Gradientensuchverfahren ist der, daß die Matrix der geschätzten Standardabweichung der einzelnen Parameter ausgegeben werden kann.

Für vertiefende Informationen zum Thema der nichtlinearen numerischen Optimierung sei auf (Bevington 1992, Spellucci 1993, Kosmol 1993) verwiesen.

4.3 Optimierung der Wechselzeitpunkte mit Hilfe des Lagrange-Ansatzes und Ausgleichsalgorithmus

Die erhaltene Lösung aus Kapitel 4.1 und 4.2 führt zu einer Hyperebene bzw. Hyperfläche. Unter einer Hyperfläche versteht BRONSTEIN (1987):

Ein k -dimensionaler linearer Teilraum des affinen Raumes A_n - eine Menge A von Punkten und eine Menge von Vektoren - ist eine Teilmenge der Punkte von A_n , deren Verbindungsvektoren einen k -dimensionalen Vektorunterraum des V_n aufspannen. Jeder $(n-1)$ -dimensionale lineare Teilraum wird als Hyperebene bezeichnet.

Im ersten Schritt wird eine Rauheitsfunktion gefunden, die den mehrstufigen Bearbeitungsprozeß modelliert. Im nächsten Schritt werden die optimalen Wechselzeiten in Abhängigkeit voneinander und von anderen Parametern gesucht. Die Lösung wird mit der Hyperebene $R_a = R_{\text{gef}}$ geschnitten und ergibt wiederum eine niedrigerdimensionale Hyperebene, auf der mit Hilfe spezifischer Rand- und Nebenbedingungen (s. Kapitel 5.2) die optimalen Wechsellpunkte gesucht werden müssen (PAPAGEORGIOU 1991). Dabei sollen die Bedingungen in dieser Arbeit nach (Formeln 5.1 – 5.13) erfüllt werden.

Der Ansatz nach Lagrange definiert die Lagrange-Funktion \mathcal{L} , deren erster Summand die Summe aller Zeiten und deren zweiter Summand die Randbedingung $R_a = R_{\text{gef}}$ ausdrückt, wobei der lagrangesche Faktor λ die Ausgleichsvariable darstellt. Allgemein gilt:

$$L(t, \lambda) = f(t) + \lambda R_a(t) \quad (4.23)$$

Durch die numerische Variation von λ in den partiellen Ableitungen nach den gesuchten Zeiten ergibt sich an einem bestimmten λ_{end} ein hinreichender Ausgleichszustand (charakteristischer Lösungspunkt des Ausgleichsproblems). Der Lösungspunkt ist dadurch definiert, daß alle Ableitungen numerisch Null sind. Die partiellen Ableitungen null gesetzt ergeben die gesuchten Zeiten t_i mit $i=1,\dots,n$ (hier $n=3$):

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \frac{\partial L}{\partial t_1} \doteq 0 \\ L_2 &= \frac{\partial L}{\partial t_2} \doteq 0 \\ L_3 &= \frac{\partial L}{\partial t_3} \doteq 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow t_1, t_2, t_3 \quad (4.24)$$

Der Algorithmus zur Suche von λ_{end} geschieht durch Intervallschachtelung. Zunächst wird ein unterer Startwert so gewählt, daß die Bedingungen:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_0 &:= 0 \\ \Rightarrow \vec{t}_0 &= 0 \\ \Rightarrow R_a &>> R_{agef} \wedge \\ &\{h=0\} << h_{gef} \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

erfüllt sind. An dieser Unterschranke (λ_0) stellt sich die Anfangsrauheit und ein Nullabtrag ein. Dies ist mit Sicherheit dann der Fall, wenn $\lambda_0 \approx 0$ ist. Als oberer Grenzwert wird λ_i derart gewählt, daß:

$$\left. \begin{aligned} R_a &\leq R_{agef} \wedge \\ h &\geq h_{gef} \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

gilt. An der Oberschranke (λ_i) wird die geforderte Rauheit und der geforderte Endabtrag erreicht.

In Halbierungsschritten (4.27) wird nun der Lagrange-Koeffizient λ eingegrenzt bis die betragsmäßige Differenz zwischen Ober- und Unterschranke eine gewisse vorher festgelegte Grenze S unterschreitet (GRONER 1987) (4.28):

$$\lambda_{neu} = \frac{\lambda_0 + \lambda_1}{2} \quad (4.27)$$

$$\Delta_i = |\lambda_1 - \lambda_0| \leq S \quad (4.28)$$

Mit den partiellen Ableitungen der Lagrange-Funktion nach den gesuchten Zeiten lassen sich bei einem bestimmten λ_{neu} durch numerische Nullpunktsuche die Wechselzeiten t_i der Einzelprozesse bestimmen.

Die Methode ist vergleichbar mit einer parallelen Verschiebung von 2 parametrisierten Schieberegler, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. An diesem Punkt, charakterisiert durch den Lagrange-Koeffizienten, werden numerisch alle Ableitungen der Lagrange-Funktion Null und die geforderten Randbedingungen erfüllt. In Kapitel 5.2 werden die genannten Randbedingungen für die Einzelprozeßstufen definiert.

Ziel der Ausgleichsrechnung ist die Generierung einer Lösung für die Einzelprozeßzeiten, so daß die Summenzeit minimal wird. Der Algorithmus ist Bild 4.6 zu entnehmen.

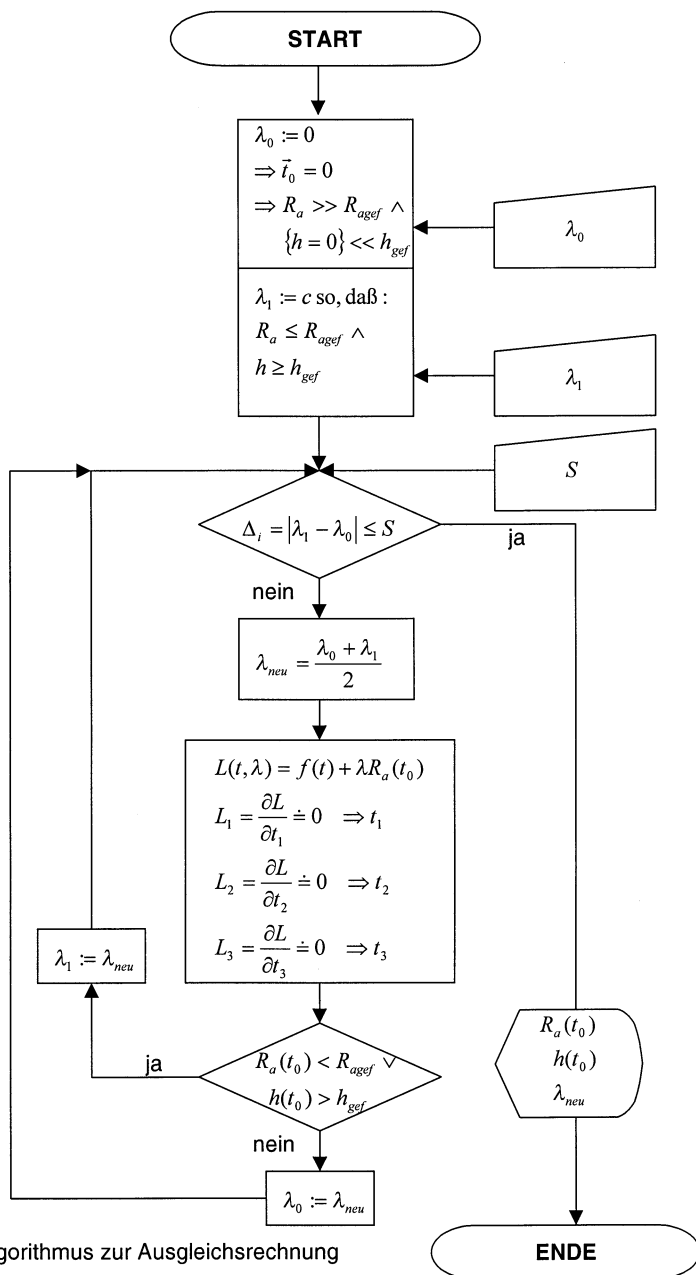


Bild 4.6: Algorithmus zur Ausgleichsrechnung

5 Versuchsdurchführung

5.1 Versuchsaufbau und –bedingungen

Für den Abgleich zwischen Experiment und Rechnung wurden Versuche durchgeführt. Die Versuchsergebnisse dienten für die Rechnung als Eingangsgrößen. Die Ergebnisse wurden gespeichert, kategorisiert und Meßfehler gekennzeichnet.

Die Bearbeitungsreihenfolge ist ausschlaggebend für die Endwerte aus den einzelnen Bearbeitungsstufen. Die Versuche wurden nach folgendem Ablauf ausgeführt:

Stufe 0: Vorbereitung, Kennzeichnung der Werkstücke

Stufe 1: Einspannen von je 12 Werkstücken in die Schleifmaschine.

Stufe 2: Schruppen.

Stufe 3: Schlichten.

Stufe 4: Entladen der Werkstücke.

Stufe 5: Reinigung, Dickenmessung.

Stufe 6: Einspannen von je 4 bzw. 6 Werkstücken in die Läppmaschine.

Stufe 7: Läppen (mit gebundenem Korn).

Stufe 8: Entladen.

Stufe 9: Reinigen der Werkstücke im Ultraschallbad.

Stufe 10: Messung der Oberflächengüte und des Abtrages.

Stufe 11: Einspannen von je 4 bzw. 6 Werkstücken in die Läppmaschine.

Stufe 12: Polieren (Läppen mit loseem Korn).

Stufe 13: Entladen.

Stufe 14: Reinigen der Werkstücke im Ultraschallbad.

Stufe 15: Messung der Oberflächengüte und des Abtrages.

Um die Reproduzierbarkeit gewährleisten zu können, wurden Parallelversuche durchgeführt. Die Charge wurde in zwei, bei wichtigen Versuchen in vier geteilt. Jede Charge wurde zeitlich unabhängig voneinander bearbeitet.

Werkzeuge wurden nach einer bestimmten Verschleißgrenze ausgewechselt bzw. konditioniert. Leerlaufversuche nach jedem Versuch waren obligatorisch.

Durch Sichtkontrolle wurde ausgeschlossen, daß vorbeschädigte Werkstücke in die Bearbeitung gelangen. Tiefreichende Risse oder Oberflächenverunreinigungen auf Werkstücken hätten zur Folge, daß die Meßwerte verfälscht worden wären.

5.1.1 Schleifmaschine

Für die Schleifversuche stand eine Flachsleifmaschine vom Typ MPS-R 700DS der Firma GMN-Müller Nürnberg zur Verfügung. Diese Maschine arbeitet nach dem Stirnschleifverfahren unter Verwendung einer Topfschleifscheibe mit einem Durchmesser von 350 mm und 20 mm Belagbreite. Für die Werkstückspannung wurde speziell eine Halterung konstruiert, die auf dem wälzgelagerten Rundtisch der Maschine festgeschraubt wurde. Mit der Halterung konnten 2 oder 4 Werkstücke auch unterschiedlichen Durchmessers gespannt werden. Die einstellbaren Maschinenparameter waren die

- Schnittgeschwindigkeit v_c ,
- Zustellgeschwindigkeit für das Schrappen v_{Schr} ,
- Zustellgeschwindigkeit für das Schlichten v_{Schl} ,
- Tischdrehzahl n_t ,
- Ausfeuerzeit T_A .

Die Drehzahl der Schleifscheibe ist mit 1100 min^{-1} gegeben, was einer mittleren Schnittgeschwindigkeit $v_c = 19 \text{ m/s}$ entspricht. Zur Erzielung des Abtrages von $0,2 \text{ mm}$ wurde bei allen Versuchen das Bearbeitungsprogramm „Konstantabtrag“ gewählt und die Ausfeuerzeit $T_A = 0$ gesetzt. Um die Temperaturbelastung durch den Zerspanprozeß möglichst gering zu halten, wurde ausschließlich unter Kühlschmierstoffzufuhr geschliffen. Die empfohlene Konzentration des Kühlschmiermittels AWS 33.0 der Firma Stähli Lápptechnik GmbH zwischen 2% und 5% wurde auf 3,5% eingestellt.

Die benützten kunststoffgebundenen Diamanttopfscheiben der Form 6A2 hatten die Körnung D107 bei einer Konzentration von C50. Der Grundkörper der Scheibe besteht aus Aluminium.

5.1.2 Läppmaschine

Die selbstentwickelte Einscheibenläppmaschine gestattete neben der Läppscheibe zwei um 180° versetzte bzw. drei um jeweils 120° versetzte Werkstückhalter über eine gerade Stirnverzahnung anzutreiben. Das Übersetzungsverhältnis ist $i = 3:1$, d. h. der Werkstückhalter führt bei einer Umdrehung der Läppscheibe eine $1/3$ -Umdrehung aus (Bild 5.1).

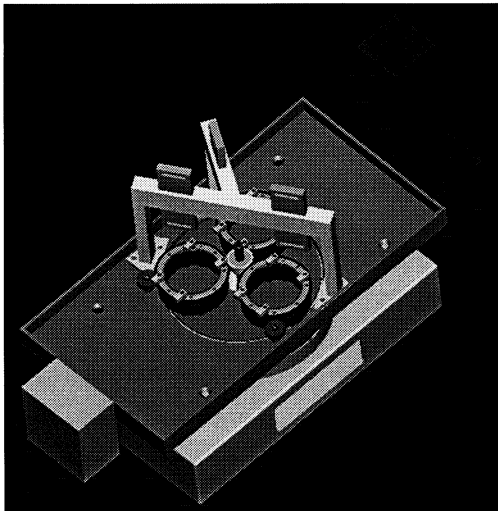


Bild 5.1: Grundaufbau der Läppmaschine.

Der verwendete Elektromotor hat folgende Daten:

- Leistung: $P = 2,9 \text{ kW}$
- Drehzahl: $n_{\text{max}} = 2000 \text{ min}^{-1}$
- Spannung: $u = 2,7 \text{ mV/min}$

Die Werkstücke werden in Käfigen aufgenommen, wobei durch Formschluß mit einer elastischen Zwischenlage eine Eigenrotation der Teile verhindert wird. Die Käfige sind von Abrichtringen umgeben, die die Läppscheibenränder überlaufen und aufgrund ihrer Verschleißwirkung die Läppscheibe mit dem Durchmesser $d = 350 \text{ mm}$ weitgehend plan halten. Die Belagbreite der Läppscheibe beträgt $b = 74,85 \text{ mm}$. Die Belastung der Werkstücke erfolgt pneumatisch, eine zwischen den Werkstücken und Druckdeckel eingelegte Gummischeibe führt zu einer annähernd gleichmäßigen Verteilung der Belastung. Die Läppmittelzufuhr erfolgt durch aufsprühen.

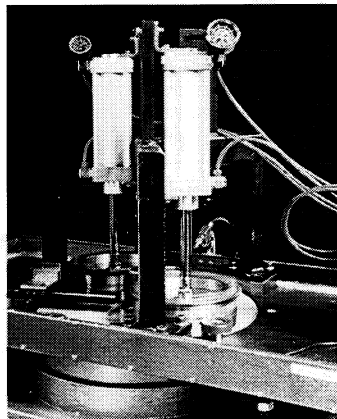


Bild 5.2: Ansicht des Arbeitsbereiches.

Beim Läppen mit gebundenem Korn, hier kurz als Läpp-Prozeß bezeichnet, sind die Diamantkörner fest gebunden im Belag. Drei Arten von Körnungen wurden verwendet:

- a)Diamant – Kunststoffbindung – Konzentration C75 – D60
- b)Diamant – Kunststoffbindung – Konzentration C75 – D30
- c)Diamant – Kunststoffbindung – Konzentration C75 – D15

Das in dieser Arbeit als Polier-Prozeß bezeichnete Läppen mit losem Korn ist zwar auch auf der Läppmaschine durchgeführt worden, ist jedoch durch folgende Werkzeugparameter bestimmt:

Das Trägermedium Wasser mit einer Zugabe eines Additivs beinhaltet das Läppmittel. Als Läppmittel kommt Diamant mit einer Korngröße von 2-8 μm zum Einsatz. Dabei wurde zwischen zwei Läppmittelarten unterschieden:

- a)Diamantkorn – Wasser 94% - Aquasal 125 6 Vol.% und Körnung 2-3 μm
- b)Diamantkorn – Wasser 94% - Aquasal 125 6 Vol.% und Körnung 4-8 μm

Als Läppscheibe wurden genutete und ungenutete Graugußscheiben der Firma Stähli Läpptechnik GmbH eingesetzt. Die eingedrehte Spiralnut ermöglichte einen Aquaplaning-Effekt der Läppemulsion. Der Rillenabstand betrug 5,5 mm, die Nuttiefe 2-3 mm. Alternativ wurde auch eine genutete Keramikscheibe benutzt.

5.1.3 Werkstücke

Die bearbeiteten Wasserdichtscheiben der Firma Hoechst CeramTec mit der Bezeichnung Rubalit A 1896 wurden speziell für die Produktion von Wasserdichtscheiben entwickelt und besitzen einen Al_2O_3 -Gehalt von 96%. Für die Schleif- und Läppversuche wurden Werkstücke mit einem Durchmesser von $25,2^{+0,25}_{-0,25}$ mm und einer Breite von $20,5^{+0,2}_{-0,2}$ mm verwendet.

Die Dicke betrug $7,5^{+0,05}_{-0,05}$ mm. Alternativ wurden Werkstücke mit einem Durchmesser von 32 mm aus dem selben Werkstoff verwendet. Die oberseitige Werkstückoberfläche beträgt $A_w = 572 \text{ mm}^2$.

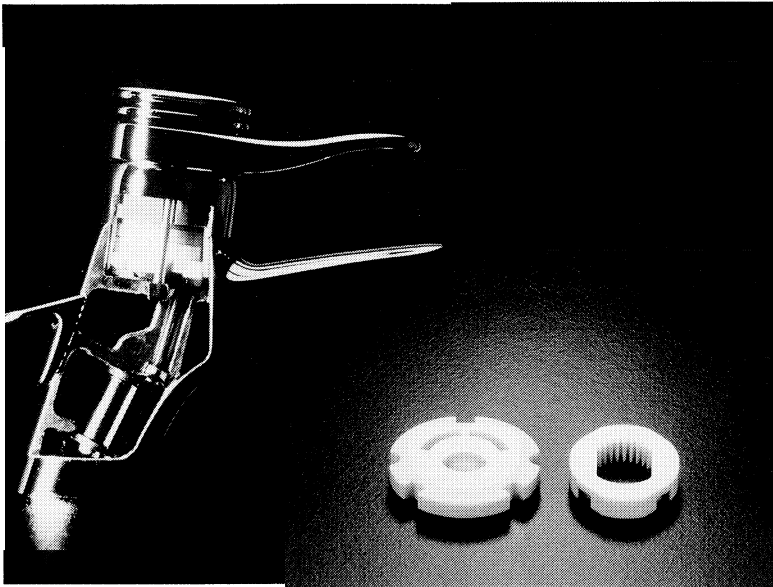


Bild 5.3: Werkstücke rechts und im eingebauten Zustand links.

5.1.4 Messung der Werkstückoberflächen

Für eine Beurteilung der Oberflächengüten erfolgte die Messung der Oberflächengrößen mit Hilfe eines prozessorgesteuerten Tastschnittmeßgerätes der Firma Feinprüf GmbH vom Typ Perthometer S6P. Die wichtigsten Oberflächendaten 3. bis 4. Ordnung wie:

- der arithmetische Mittenrauhwert R_a ,
- die maximale Rauhtiefe/Profilhöhe R_t ,
- die gemittelte Rauhtiefe R_z ,
- die Profil- und Wellentiefe P_t , W_t ,
- der Profiltraganteil t_p .

wurden gemessen (WEINGRABER & ABOU-ALY 1989). Am Tastschnittmeßgerät wurde ein G-Profil mit einem M 50 Filter auf einer Meßstrecke von 5,6 mm ausgewählt. Das G-Profil stellt dabei ein ausgerichtetes Profil dar, das alle Abweichungen von der Ausgleichsgeraden aufzeigt (FEINPRÜF 1980, BODSCHWINNA & HILLMANN 1992).

Der Traganteil t_p wurde mit dem P-Profil gemessen. Die Referenzlinie wurde bei 0 μm mit einem Traganteilwert von 5% festgelegt. Der Traganteil der Werkstücke wurde niveaugestuft in Schrittweiten von 0,2 μm von 0 bis – 1 μm angegeben, wobei zur Auswertung die Werte bei einem Schnittniveau von – 0,4 μm herangezogen wurden.

Vor der Messung wurden die Werkstücke in einer Lauge gereinigt und dann einem Ultraschallbad für 3 Minuten zugeführt. Nach dem Trocknen wurde mit einem Induktionsmeßtaster die Dickenabnahme an verschiedenen Stellen gemessen.

5.1.5 Messung des Lappscheibenverschleißes

Der Lappscheibenverschleiß wurde durch einen induktiven Meßtaster an verschiedenen Sektorknotenpunkten gemessen. Die Lappscheibe wurde in 6 Winkelsegmente und 12 konzentrische Bereiche aufgeteilt. An jedem Kreuzungspunkt wurde vor und nach der Bearbeitung der Abtrag gemessen. In systematisch geführten Verschleißversuchen wurde der Verschleißzustand der Lappscheibe in Abhängigkeit von den Stellparametern ermittelt. Die Diskrepanz zwischen thermischer Beruhigung der Scheibe und der Verdickung durch die Aufsaugung des Kühlschmiermittels ließ keine eindeutige Aussage über die Dickenabnahme der Lappscheibe im instationären Prozeß zu.

Die Dickenreduzierung ist an allen Punkten der Scheibe gleich. Sie entscheidet letztendlich über die Gesamtnutzungsdauer der Lappscheibe, die unterhalb einer Mindestdicke ausgetauscht werden muß. Auf das Arbeitsergebnis hat die Dickenreduzierung keinen Einfluß. Das sich aus den Profiltiefen ergebende Scheibenprofil ist dagegen für die erreichbare

Teilformgenauigkeit von Bedeutung. Das Profil ist durch seine Form und das Maß der Abweichung von der ideal-ebenen Scheibe gekennzeichnet.

5.2 Randbedingungen

Exemplarisch sollen zuerst drei Prozeßstufen betrachtet werden. Das Schleifen als Gesamtprozeß, das Läppen mit festem Korn - kurz als Läppen bezeichnet – und das Läppen mit losem Korn, hier als Polieren bezeichnet.

Das Schruppen und das Schlichten im Schleifprozeß werden als zusammengesetzte Prozeßstufen betrachtet. Da der direkte Zusammenhang beim Schleifen zwischen Schrupp- und Schlichtparametern existiert, werden sie als voneinander abhängige Prozeßstufen behandelt. Vollständigkeitshalber werden alle Randbedingungen und Parameter für beide Stufen festgesetzt.

Als erweiterter Ansatz wurde das Problem zu einem späteren Zeitpunkt mit 4 Prozeßstufen definiert. Beim Schleifen wurden Schlichten und Schruppen separat betrachtet. In Vorversuchen ergab sich, daß die Reihenfolge dieser zwei Stufen logisch festgelegt ist, d.h. das Schruppen immer vorhergehen muß bevor geschlichtet wird. Diese Tatsache ist nicht selbstverständlich, da die Umstellung der gewohnten Prozeßreihenfolge in manchen Fällen auch zum Erfolg führen kann. In dem betrachteten Fall würde allerdings eine Umkehrkombination auf jeden Fall die Oberflächengüte beeinträchtigen (ABAY 1997A, ABAY 1997C). Damit muß eine Umkehrkombination in der Zeitoptimierung nicht berücksichtigt werden.

Da der Sinn der Betrachtungen nicht auf eine Prozeßanalyse hinauslaufen soll, sondern auf eine Interprozeß-Zeitoptimierung, ist es nicht sinnvoll alle möglichen Stellparameter gleichgewichtig zu faktorisieren. Es werden diejenigen Parameter herangezogen, deren statistisches Meßgewicht aussagekräftig genug und deren direkte Abhängigkeit zum Zeit-Oberflächen-Verhalten einen möglichst hohen Beitrag leisten. Da die grundlegenden Variationsgrößen für die Einzelprozeßstufen als bekannt vorausgesetzt

werden dürfen, muß weiterhin eine adäquate Gewichtung vorgenommen werden. Das bedeutet, daß statische Bedingungen, die sich unter den verschiedenen Prozeßstufen nur gering oder gar nicht ändern einen niedrigeren Stellenwert bekommen, als die, die sich über einer bestimmten Wertung ändern. Die Auswahl geschieht später in der mathematischen Optimierungsauslegung durch eine diagonale Wertungsmatrix. Bei der momentanen dreistufigen Betrachtung kommen folgende Parameter und die jeweiligen Abbruchbedingungen für die Oberflächeneingangs und –ausgangswerte in Frage:

5.2.1 Parameter beim Schleifen S

Allgemeine Parameter sind:

v_f	Vorschubgeschwindigkeit
v_c	Schnittgeschwindigkeit
t	Prozeßzeit
K	Scheibenspezifikation (Körnung, Konzentration, Bindung, etc.)
C	Abrihtkonditionen
F	Querkraftverläufe
T	Prozeßtemperatur

Somit ergibt sich die $PS \times p$ Matrix zu:

$$A = \begin{bmatrix} v_{f_{SR}} & v_{c_{SR}} & t_{SR} & K_{SR} & C_{SR} & \dot{Q}_{SR} & F_{SR} & T_{SR} & \dots & S_{SR} \\ v_{f_{SL}} & v_{c_{SL}} & t_{SL} & K_{SL} & C_{SL} & \dot{Q}_{SL} & F_{SL} & T_{SL} & \dots & S_{SL} \end{bmatrix}, \quad PS = 2, p = \text{const.}$$

Läßt man die „konstanten“ Parameter außer Acht, so bleiben die variablen Parameter:

$$A = \begin{bmatrix} v_{f_{SR}} & v_{c_{SR}} & t_{SR} \\ v_{f_{SL}} & v_{c_{SL}} & t_{SL} \end{bmatrix}, PS=2, p=3$$

Variable Parameter des Schleifprozesses S:

$v_{f_{SR}}$	Vorschubgeschwindigkeit Schruppen
$v_{f_{SL}}$	Vorschubgeschwindigkeit Schlichten
$v_{c_{SR/SL}}$	Schnittgeschwindigkeit Schruppen/Schlichten
t_{SR}	Schleif-Schruppzeit
t_{SL}	Schleif-Schlichtzeit

Randbedingungen beim Schleifen S:

Die Formeln (2.1) bis (2.17) definieren zugleich die Randbedingungen für das Schleifen. Die (3x2)-Schleifmatrix beinhaltet die Parameter für das Schleifen (Schruppen, Schlichten). Die formelmäßigen Zusammenhänge sind aus (5.1) bis (5.5) zu entnehmen:

$$t_{SR} = \frac{a_{eSR}}{v_{f_{SR}}} \quad (5.1)$$

$$t_{SL} = \frac{a_{eSL}}{v_{f_{SL}}} \quad (5.2)$$

$$\mu = \frac{t_{SR}}{t_{SL}} \quad \text{Schrupp - Schlichtverhältnis} \quad (5.3)$$

$$R_a = f(\langle t_{SR} \cdot \mu + t_{SL} \cdot (1 - \mu) \rangle, v_{f_{SR}}, v_{f_{SL}}, v_{c_{SR}}, v_{c_{SL}}, K_{SR}, K_{SL}, C_{SR}, C_{SL}, F_{SR}, F_{SL}, T_{SR}, T_{SL}, \dot{Q}_{SR}, \dot{Q}_{SL}) \quad (5.4)$$

$$h_{ges} = f(\langle t_{SR} \cdot \mu + t_{SL} \cdot (1 - \mu) \rangle, v_{f_{SR}}, v_{f_{SL}}) \quad (5.5)$$

Als weitere wichtige Randbedingungen gelten die Oberflächen-*Eingangswerte* des Rohteils:

$R_{a\ Anf}$	ca. 1,0 μm	arithmetischer Mittenrauhwert am Anfang.
$R_{max\ Anf}$	ca. 10,0 μm	maximale Rauhtiefe am Anfang.
$R_{z\ Anf}$	ca. 7,0 μm	Anfangsrauhigkeit.
$R_{t\ Anf}$	ca. 10,0 μm	Teilrauhiefe am Anfang.
$P_{t\ Anf}$	ca. 15,0 μm	Profiltiefe am Anfang.
$W_{t\ Anf}$	ca. 4,5 μm	Welligkeit am Anfang.

Als *Abbruchkriterium* für das Schleifen dienen folgende Grenzwerte:

- $R_a \leq 0.40\ \mu\text{m}$,
- $W_t \leq 0.60\ \mu\text{m}$,

5.2.2 Parameter beim Läppen L

Allgemeine Parameter sind:

v_c	Schnittgeschwindigkeit
t	Prozeßzeit
p	Druck
K	Scheibenspezifikation (Körnung, Konzentration, Bindung, etc.)
C	Abrichtkonditionen
F	Querkraftverläufe
T	Prozeßtemperatur

Läßt man die „konstanten“ Parameter außer Acht, so bleiben die variablen Parameter für dem Läpp-Prozeß:

$$A = [v_c, p, t], PS = 1, p = 3$$

Variable Parameter des Läpp-Prozesses L

v_{cL} Schnittgeschwindigkeit

t_L Läppzeit

p_L Läppdruck

$$R_a = f(t_L, p_L, v_{cL}, K_L, C_L, F_L, T_L, \dot{Q}_L) \quad (5.6)$$

$$\dot{h}_L = -0,081 + 2,241 \cdot p^{0,786} \cdot v^{0,566} + 0,0014 \cdot p^{2,133} \cdot v^{11,987} \quad (5.7)$$

$$h_{ges} = f(t_L, p_L, v_{cL}, K_L, C_L, F_L, T_L, \dot{Q}_L) \quad (5.8)$$

Randbedingungen beim Läppen L:

Die *Abbruchkriterien* für das Läppen sind:

- $R_a \leq 0.30 \mu\text{m}$,
- $W_t \leq 0.60 \mu\text{m}$,
- $t_p = 60 - 70\%$.

5.2.3 Parameter des Polier-Prozesses P

Allgemeine Parameter sind:

v_c Schnittgeschwindigkeit

t Prozeßzeit

p	Druck
K	Scheibenspezifikation (Körnung, Konzentration, Bindung, etc.)
C	Abrichtkonditionen
F	Querkraftverläufe
T	Prozeßtemperatur

Variable Parameter des Polier-Prozesses P

v_{cP}	Schnittgeschwindigkeit
t_p	Polierzeit
p_p	Polierdruck

$$A = [v_{cP}, p_p, t_p]$$

Randbedingungen beim Polieren P:

$$R_a = f(t_p, p_p, v_{cP}, K_p, F_p, T_p, \dot{Q}_p) \quad (5.9)$$

$$\dot{h}_p = -0,101 + 3,362 \cdot p^{0,396} \cdot v^{1,031} + 0,588 \cdot p^{0,464} \cdot v^{1,345} \quad (5.10)$$

$$h_{ges} = f(t_p, p_p, v_{cP}, K_p, F_p, T_p, \dot{Q}_p) \quad (5.11)$$

Die Abbruchkriterien für das Polieren sind:

- $R_a \leq 0.25 \mu\text{m}$,
- $W_t \leq 0.60 \mu\text{m}$,
- $t_p = 70 - 80\%$.

5.2.4 Randbedingungen für Oberflächengüte R_a und Abtrag h

Neben den Parametern und den spezifischen Randbedingungen in den einzelnen Prozeßstufen ergeben sich weitere Abbruchbedingungen aus folgender Maßgabe:

$$R_a \leq R_{a_{gef}} \quad (5.12)$$

$$h_{ges} = h_{gef} \pm \Delta h \quad (5.13)$$

Diese Bedingungen bilden eine „oder“-Verknüpfung. Bei Erreichen der geforderten Endoberflächengüte *oder* des geforderten Endabtrages ist die Bearbeitung der Werkstücke einzustellen.

5.3 Versuchswerte

5.3.1 Variation der Stellparameter

In der Tabelle 5.4 sind die Spannbreiten der variierten Parameter dargestellt.

	v_c [m/s]	v_t [µm/min]	n_t [min ⁻¹]	T_A [sec]	t [sec]	p [N/mm ²]
Schruppen S_{Schr}	ca. 19	10 - 1000	5 - 30	0	- 600	-
Schlichten S_{Schl}	ca. 19	0 - 30	5 - 30	0	20 - 60	-
Läppen L	1,7 – 7,7	-	67 - 267	-	- 600	0,1 – 3,1
Polieren P	- 2,0	-	- 133	-	- 1800	-

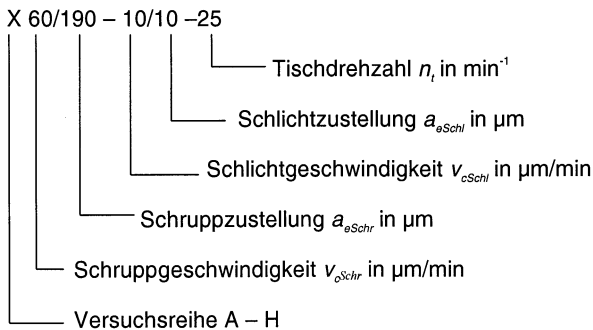
Tabelle 5.4: Variation der Stellparameter

Nach KROTTMAIER (1994) wurden zunächst voll faktorielle Experimente durchgeführt. Diese Methode wird angewendet, wenn über die gegenseitige

Abhängigkeit der Parameter keine Vorkenntnisse vorhanden sind, da die Ergebnisse im Rahmen der Versuchsbedingungen, das reale Zusammenspiel aller untersuchten Größen reflektiert. Bei der strategischen Versuchsplanung wurden die Ergebnisse der vorangegangenen Versuchsreihen berücksichtigt, um den Umfang der Versuche im sinnvollen Rahmen zu halten und Schnittstellenwerte für den Nachfolgeprozeß zu schaffen.

5.3.2 Schleifwerte

Bei den Schleifversuchen bedeuten:



Die Versuchsreihen A und B untersuchen den *Einfluß des Schlichtens* auf den Schleifprozeß. Zwar wirkt sich das Schlichten negativ auf die Prozeßdauer aus, ist aber aus Gründen der Oberflächengüten unverzichtbar für den Gesamtprozeß (ABAY 1997A). Der Einfluß des Schlichtens auf das Bearbeitungsergebnis beim Schleifen ist enorm. Schon einige Sekunden Schlichten reichen aus, um die Oberflächengüte deutlich zu verbessern. Das beste Resultat stellt sich durch eine kurze Schlichtzeit bei minimaler Schlichtgeschwindigkeit ein. In Bild 5.5 wurde exemplarisch am Zusammenhang zwischen Rauheit und Tischdrehzahl bzw. Schnittgeschwindigkeit die Auswirkung des Schlichtens gezeigt. Ohne Schlichten erreicht man bei identischen Einstellungen wesentlich geringere Oberflächengüten als mit anschließendem Schlichten über 10 Sekunden.

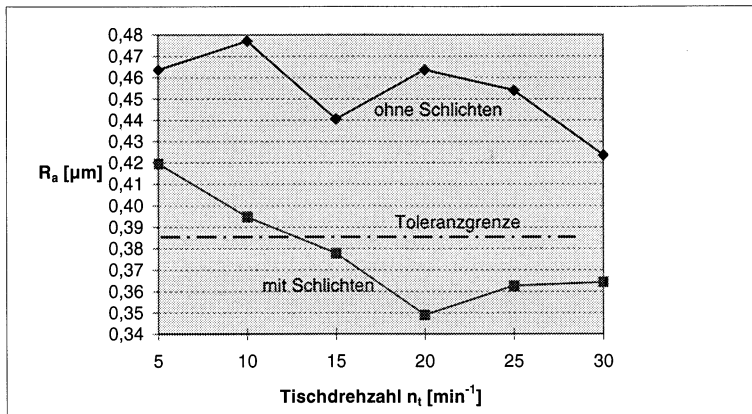


Bild 5.5: Einfluß eines vorangestellten Schleif-Schlichtprozesses auf die Oberflächengüte beim Läppen.

In den Versuchsreihen C und D wurde die *Vorschubgeschwindigkeit* bis in extrem hohe Geschwindigkeitsbereiche gesteigert ($v_{\text{Schr}} = \dots - 1000 \mu\text{m/min}$). Nach einer gewissen Phase der Verbesserung der Oberflächengüte, zeigte sich, daß eine weitere Erhöhung der Schrubb-Vorschubgeschwindigkeit von $100 \mu\text{m/min}$ auf $120 \mu\text{m/min}$ keine Verbesserung mehr nach sich zieht.

Die Erhöhung der Schlicht-Vorschubgeschwindigkeit (Versuchsreihe E) von $10 \mu\text{m/min}$ auf $30 \mu\text{m/min}$ ergab eine zunehmende Verschlechterung der Oberflächenwerte.

In der Versuchsreihe F wurde der Einfluß des Schrubb-/Schlichtverhältnisses beim Schleifen untersucht. Hauptsächlich erhöht sich dadurch die Schleifzeit bei einer Erhöhung des Schlichtanteils im Schleifprozeß.

In den Versuchsreihen G und H wurden die Einflüsse der Werkstückanzahl und die Schleifscheibentopographie untersucht. Die Bedeutung des Konditionierens der Schleifscheibe wird deutlich, wenn man vorangegangene Versuchsreihen mit den Werten der Reihe H vergleicht (Bild 5.6).

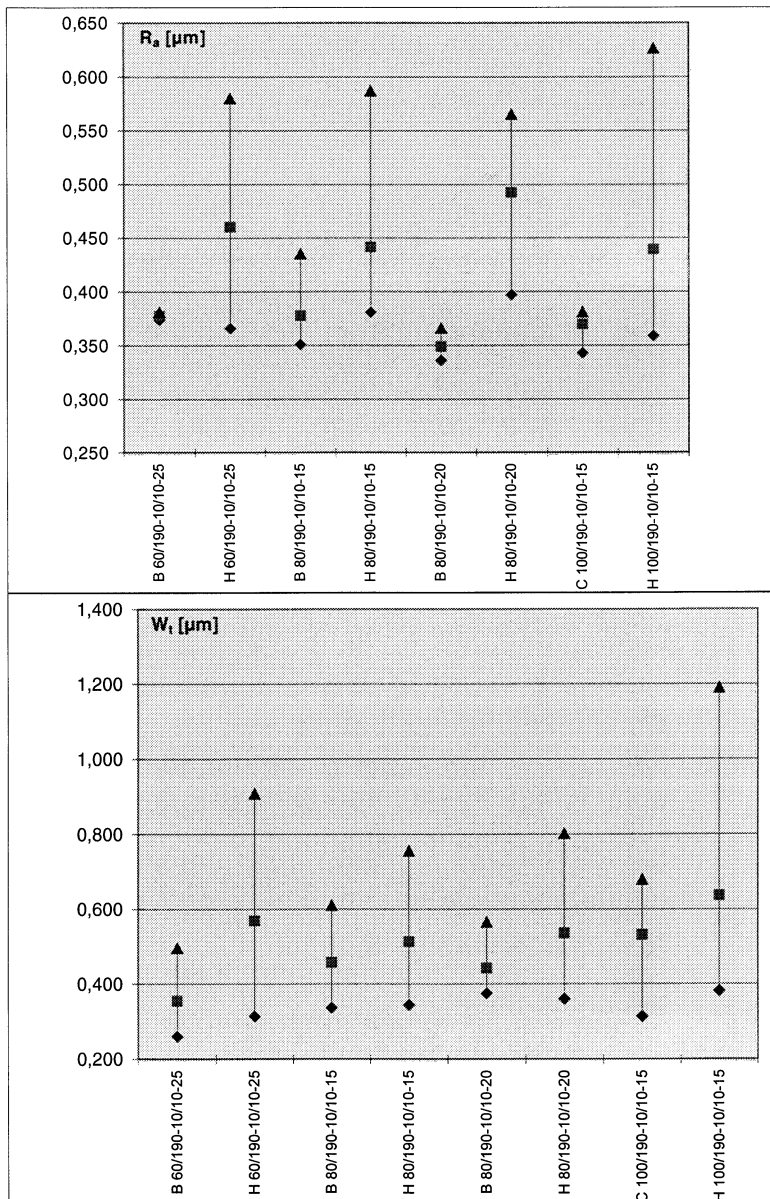


Bild 5.6: Vergleich der Streuung der R_a - und W_t -Werte bei ausgewählten Parametereinstellungen der Versuchsreihen B bzw. C mit H.

5.3.3 Läppwerte

Bei den Läpp-Versuchen wurden drei Versuchsreihen untersucht. In der Versuchsreihe A wurde durch die Variation des Läppdrucks p_L untersucht.

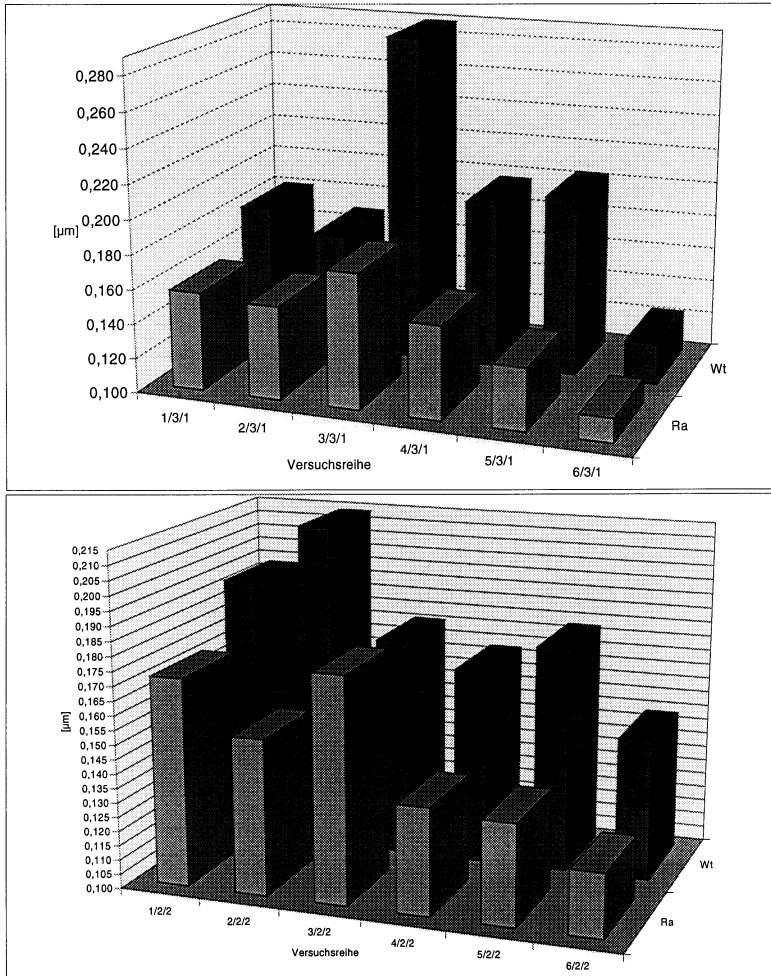
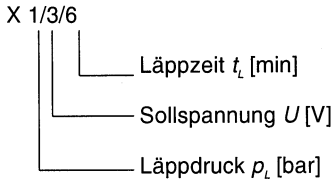


Bild 5.7: Oberflächenwerte bei Variation des Läppdruckes.

Im Diagramm bedeuten:



Mit steigendem Druck kommt es zu einer Verbesserung des arithmetischen Mittenrauhwertes R_a . Ursache dafür ist ein Abstumpfen der Läppkörner durch den hohen Anpreßdruck, der den Verschleiß am Einzelkorn beschleunigt und ein Abrunden der anfangs spitzen Körner bewirkt. Die Folge ist eine Abflachung der Einzelkörner und eine daraus resultierende Verbesserung des R_a - Wertes.

Bei der Wellentiefe kommt es bei einer Steigerung des Läppdruckes zunächst zu einer Verschlechterung der Oberflächengüte. Der Grund ist eine Vergrößerung des Reibmoments auf der Werkstückunterseite, woraus sich eine überproportionale Abtragssteigerung an den Werkstückrändern einstellt. Wird der Läppdruck jedoch weiter erhöht, so stellt sich eine Verbesserung der Oberflächengüte ein. Es wurde gezeigt, daß mit Zunahme des Läppdruckes eine Erhöhung der Scheibendrehzahl von Vorteil ist (Versuchsreihe B zur Untersuchung des Einflusses der Läppscheiben-Drehzahl n_L).

Die Variation der Läppzeit wurde in der Versuchsreihe C vorgenommen. Eine längere Läppdauer bewirkte bei geringen Drücken nahezu gleichbleibende oder geringfügig verbesserte R_a – Werte. Für höhere Drücke verbesserten sich die R_a – Werte im Gegensatz zu niedrigen Drücken anfangs sehr schnell, wurden aber mit steigender Zeit ein wenig schlechter. Bei der Wellentiefe W , verhielt es sich umgekehrt.

Ebenfalls einen Einfluß auf die Ergebnisse der Läppzeit, wenn auch geringer als der Läppdruck, hatte die Läppscheiben-Drehzahl. Bei kleineren Drehzahlen $n_L = 67 \text{ min}^{-1}$ führte eine längere Läppdauer zu einer Verbesserung des R_a – Wertes. Das gleiche ergab sich bei höheren

Drehzahlen wie z. B. $n_L = 200 \text{ min}^{-1}$ (3V am Motor) und ebenfalls langen Versuchszeiten, nur wurden die Werte in sich besser (Bild 5.8).

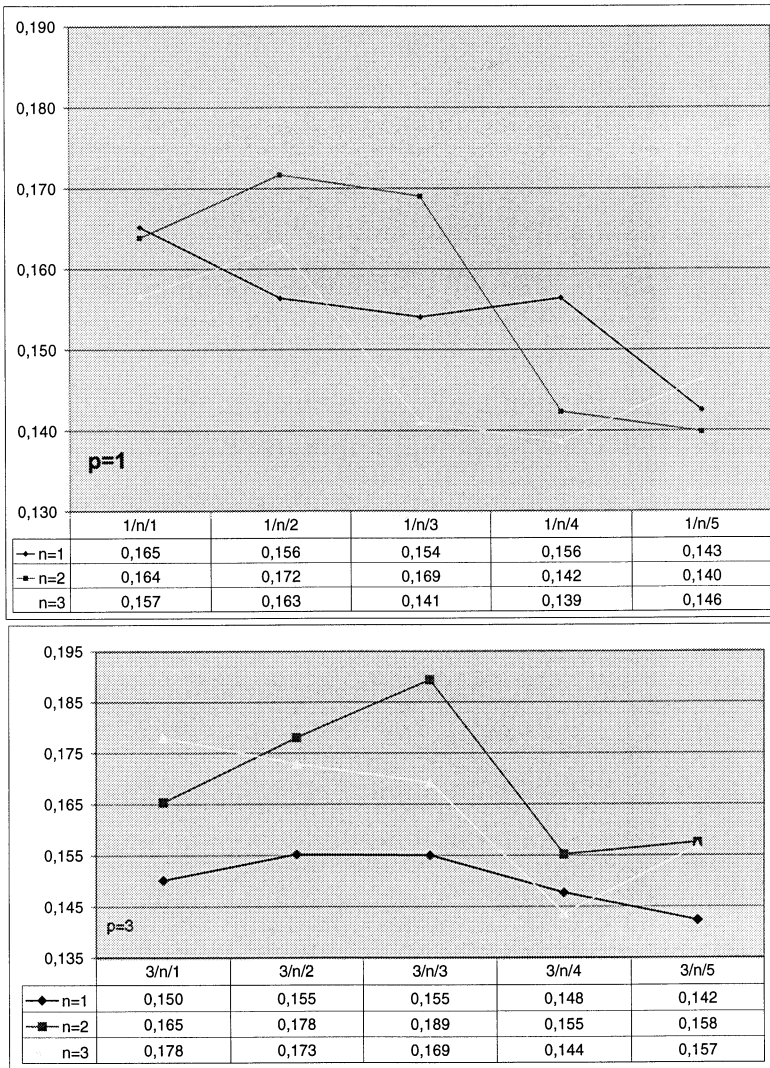


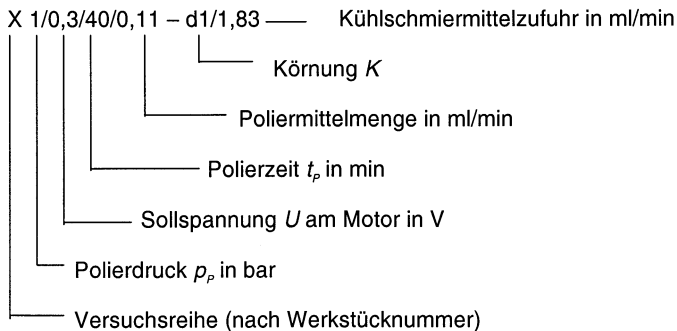
Bild 5.8: Änderung der Oberflächengüte bei Variation des Läppdruckes.

5.3.4 Polierwerte

Die Polierversuche sind analog aufgebaut wie die vorangegangenen Läppversuche. Der Unterschied besteht in der Bindung des Werkzeugs. Beim Polier-Prozeß wurde auf der beschriebenen Läppmaschine loses Korn mit sehr feiner Körnung verwendet. Im Gegensatz zum Läppen mit gebundenem Korn wurden hier die Drücke sehr klein gewählt. Damit wurde von der Variation des Druckes in Extrembereichen als Teil der Versuchsreihen abgesehen.

Die Polierversuche wurden besonders auf die Variation des Parameters Zeit ausgelegt. Weiterhin wurden der Druck, die Scheibendrehzahl bzw. die Schnittgeschwindigkeit, die Menge der kontinuierlichen Werkzeugzugabe und die Kühlschmiermittelmenge variiert.

Die Polierversuche wurden nach folgender Nomenklatur bezeichnet:



In der Versuchsreihe ö15 wird mit Honöl geschmiert und gekühlt; die Körnung wurde sehr fein gewählt (d1). Es werden wenige Parameter variiert. Hauptparameter in dieser Reihe ist die Zeit (bis zu 40 min). Es zeigte sich, daß nach einem anfänglichem hohen Abtrag und schneller Verbesserung der Oberflächengüte nach der vierten Minute fast keine Änderung mehr erreichbar war (Bild 5.9).

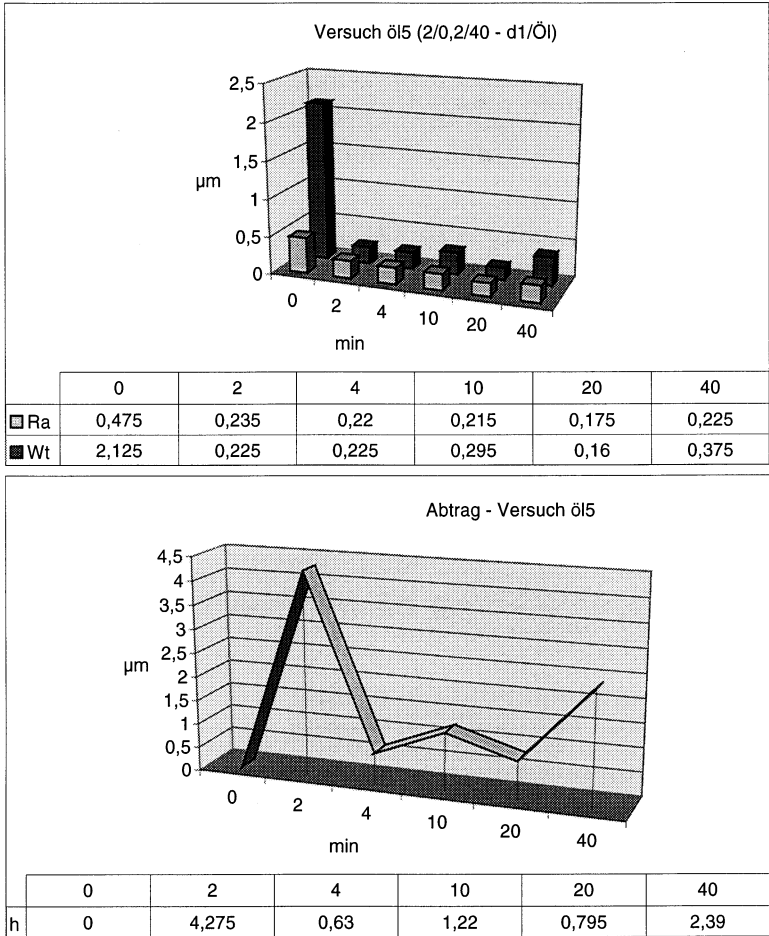


Bild 5.9: Zeitliche Abhängigkeit der Oberflächenwerte und des Abtrags (öl5).

In den Versuchsreihen ph36-59, ph59-82 und ph58-94 wurde auf gleichem Druckniveau neben der Zeit die Schnittgeschwindigkeit und die Läppmittelmenge variiert. Bild 5.10 zeigt die zeitlichen Zusammenhänge.

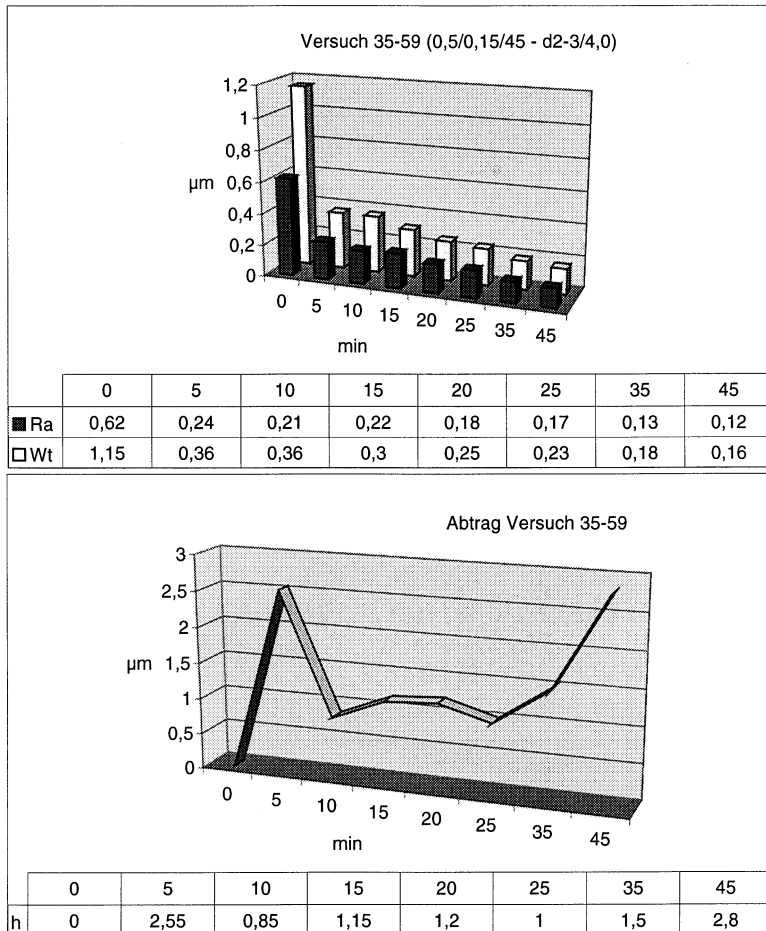


Bild 5.10: Zeitliche Abhängigkeit der Oberflächenwerte und des Abtrags (ph35-59).

Die Versuchsreihen ph66-76, ph60-93 und ph6-44 dienten zur Untersuchung der zeitlichen Abhängigkeiten zwischen Druckerhöhung und Läppmittelmenge. (Bild 5.11). Auffällig ist hierbei die kontinuierliche Erhöhung des partiellen Abtrages über der Zeit. Obwohl der Abtrag beim Polier-Prozeß nicht von großer Bedeutung ist, kann er von Vorteil sein.

Verglichen mit den vorhergegangenen Versuchsreihen ist hier anzumerken, daß mit steigendem Druck ein stabilerer Prozeß erreicht wird. Dies drückt sich u. a. durch die Regelmäßigkeit des Summenabtrags und durch die tendenziell steigende Verbesserung der Oberflächengüte aus.

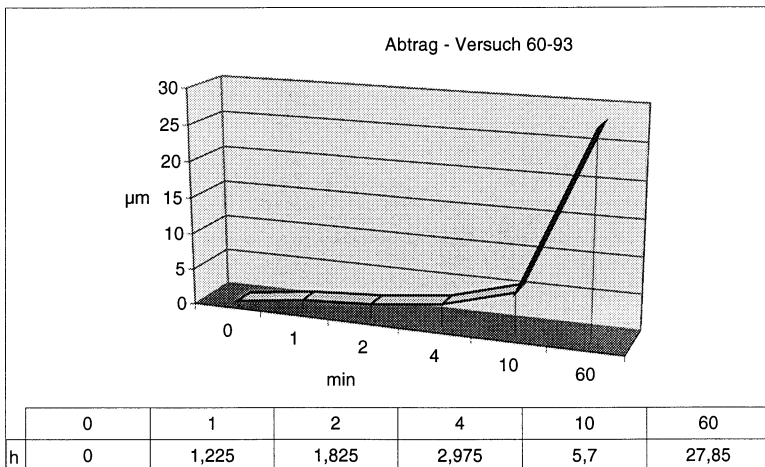
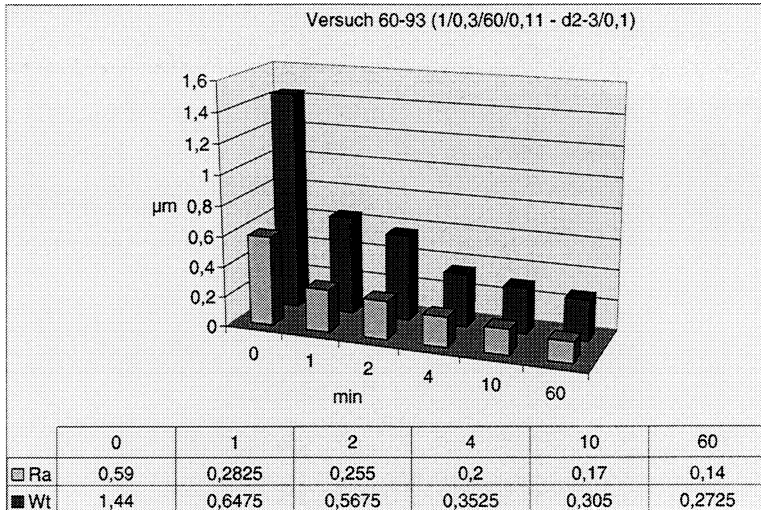
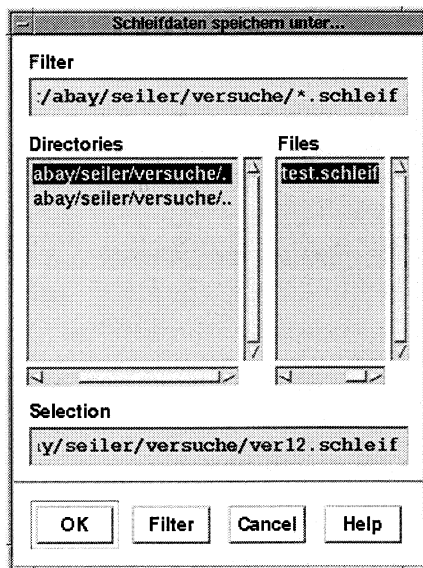


Bild 5.11: Zeitliche Abhängigkeit der Oberflächenwerte und des Abtrags (ph60-93).

6 Anwendung des mathematischen Modells auf die Fallstudie

Um das Optimierungsprogramm anwenderfreundlich zu gestalten, wurde eine ansprechende und übersichtliche Benutzeroberfläche programmiert. Der Benutzer hat die Möglichkeit, die in der Produktion verwendeten Maschinenparameter und Versuchsergebnisse einzugeben und abzuspeichern. Zur Programmierung wurde XDesigner, ein Tool zur Oberflächenprogrammierung verwendet. Die Verknüpfung mit dem Optimierungsprogramm, sowie die Datenarchivierung wurden in C++ realisiert.



XDesigner ist vergleichbar mit einem Dialogeditor, wie er bei verschiedenen PC-Programmen implementiert ist. Eine graphische Oberfläche läßt sich aus verschiedenen Bausteinen wie z. B. Fenstern, Buttons, Textfeldern, Eingabefeldern, usw. zusammensetzen. Die so entstandene Oberfläche läßt sich im XDesigner-Code abspeichern und in einen C++ Code übersetzen (Bild 6.1). Dieser kann dann mit Hilfe eines Editors weiter bearbeitet werden.

Bild 6.1: Benutzerdialog des Programms.

Die objektorientierte Programmiersprache C++ erlaubt es, im Gegensatz zu prozeduralen Programmiersprachen wie C oder Pascal, bestimmte Datenstrukturen, wie Meßergebnisse oder Maschinenparameter, mit den sie betreffenden Funktionen, z. B. Eingabe, Ausgabe oder Speicherung, zu

sogenannten Klassen zusammenzufassen. Auf diese Weise lassen sich komplexe Zusammenhänge einfach und übersichtlich realisieren, und zusammen unter einem Oberbegriff, beispielsweise „Läppwerte“ o. ä., verarbeiten. Durch ein sogenanntes „struct“, wie es in anderen Programmiersprachen existiert, läßt sich dies nur zum Teil realisieren.

Kontaktbearbeitungsprogramm

Programm Hilfe

Institut fuer Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften **iwmb**

Fertigungsverfahren:

☒ Schleifen

Maschinenparameter:

Spindeldrehzahl [1/min]: 0

Vorschubgeschwindigkeit [1/min]: 0

Konzentration: Kz 150

Schleifscheibendurchmesser [mm]: 400

Schleifscheibenkuehlung: Oel

Koemung: D 252

Maschinenstundensatz [DM]:

☒ Laeppen

Laepdruck [Bar]: 0

Laepgeschwindigkeit [1/min]: 0

Schmiermittel: Oel

Laepscheibendurchmesser [mm]: 400

Koemung: D 252

Maschinenstundensatz [DM]:

☒ Polieren

Poliergeschwindigkeit [1/min]: 0

Polierscheibendurchmesser [mm]: 400

Schmiermittel: Oel

Koemung: D 252

Maschinenstundensatz (DM):

Werkstueck:

Material:

Abtrag [mm]:

Gewuenschte Oberflaechenguete [Ra]:

weiter

Bild 6.2: Startmenü des Optimierungsprogramms.

Die Software wurde möglichst selbsterklärend erstellt. Der Anwender sieht nach dem Programmaufruf zunächst ein Hauptmenü bzw. Startmenü (Bild 6.2), in dem der Maschinenbediener die verwendeten Bearbeitungsverfahren sowie die Maschinenparameter und die zu bearbeitenden Werkstoffe eingibt. Von dort aus gelangt er in die Untermenüs zu den jeweiligen gewählten Bearbeitungsverfahren.

Dort werden dann die in den Experimenten ermittelten Versuchsergebnisse eingegeben. Die zu einem Versuch gehörenden Daten können gemeinsam in einer Datei abgespeichert werden und auch später noch ergänzt werden.

Nach Abschluß der Dateneingabe wird über eine Schnittstelle das Optimierungsprogramm in Mathematica gestartet. Mathematica ist ein Computeralgebra-Programm-System, das zur Lösung der verschiedensten mathematischen Problemstellungen zu verwenden ist. Mathematica ist in der Lage Aufgaben sowohl symbolisch als auch numerisch und graphisch zu bearbeiten. Im Gegensatz zu anderen handelsüblichen Mathematik-Tools wie z. B. Matlab rechnet Mathematica exakt und ohne unnötige Rundungsfehler. Dazu ist es erforderlich, daß in Mathematica über 750 grundlegende mathematische Algorithmen und Strukturen implementiert sind, im Gegensatz zu unter hundert in herkömmlichen Programmiersprachen. Mathematica hat gegenüber anderen Programmen für Computeralgebra, so z. B. Derive vor allem bei der graphischen Ausgabe von Ergebnissen einen bedeutenden Vorsprung. Auch numerische Verfahren wie z. B. das verwendete Levenberg-Marquardt-Verfahren oder statistische Verfahren sind in Mathematica implementiert und jederzeit verfügbar. Mathematica läßt sich auf verschiedene Weise steuern. Zum einen kann man vollständig in der Mathematica-Programmiersprache verfaßte Programme abarbeiten lassen, welche man auch als Subroutinen von anderen Programmen aus starten kann, zum anderen läßt sich Mathematica auch im Calculator-Modus betreiben, in dem Eingaben direkt ausgewertet und die erzeugten Ergebnisse sofort ausgegeben werden. Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise bei der hier vorgenommenen Optimierung wurden einige Schritte im Calculator-Modus ausgeführt und hier abgedruckt.

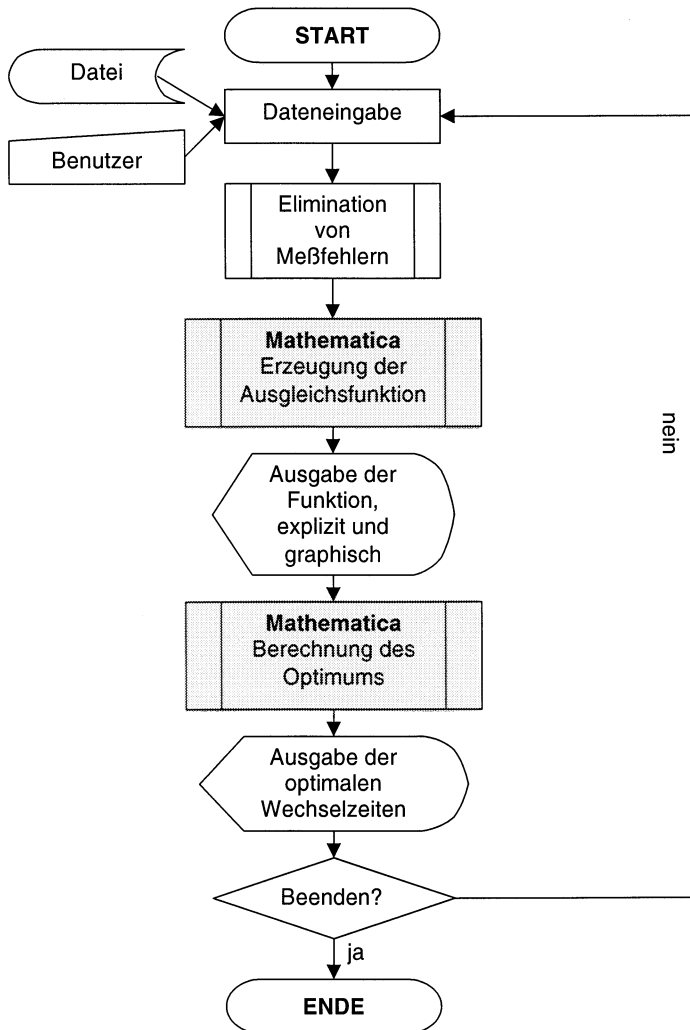


Bild 6.3: Ablaufdiagramm des Programms

6.1 Bestimmung der Ausgleichsfunktion nach dem Levenberg-Marquardt-Verfahren

Nach Versuchen mit nichtlinearen Ansätzen durch Gradientensuchverfahren und Entwicklungsverfahren, konnten keine akzeptablen Ergebnisse erzielt werden. Entweder war die Abweichung, gekennzeichnet durch das Chi-Quadrat X^2 , zu groß oder die Anzahl der benötigten Iterationen bis ein ausreichendes Ergebnis gefunden wurde war viel zu hoch.

Am besten läßt sich eine funktionale Darstellung für den realen Fertigungsprozess mit der Levenberg-Marquardt-Methode ermitteln.

Als Ausgleichsfunktion für das Levenberg-Marquardt-Verfahren wurden für das Fallbeispiel Exponentialfunktionen und Area-Funktionen betrachtet. Der Ansatz mit der Funktion:

$$R_a(t_1, t_2, t_3) = e^{at_1} + e^{bt_2} + e^{ct_3} \quad (6.1)$$

ergab zwar relativ akzeptable Lösungen, aber mußte mit fiktiven negativen Werten gestartet werden. Zudem war das Chi-Quadrat X^2 bezüglich der Güte der Annäherung nicht gut genug. Ein großes Problem bereitete der starke Anstieg bei großen positiven Exponenten. Gesucht waren also Funktionen, die sowohl bei großen positiven Werten als auch bei negativen Werten annähernd konstant verliefen.

Als Erweiterung wurden Hyperbelfunktionen herangezogen. Unter ihnen gibt es vergleichsweise einfache Funktionen, die diese geforderte Form um das Oberflächenverhalten darzustellen haben. Ansätze mit dem Tangens-Hyperbolicus stellten sich als unpassend heraus, da die Änderung der Steigung zu abrupt war.

Die Umkehrfunktionen der transzendenten Funktionen und Hyperbelfunktionen, nämlich die Arcus- bzw. Area-Funktionen, lieferten bedingt brauchbare Ergebnisse. So reichte zwar die Funktion:

$$R_a(t_1, t_2, t_3) = \text{Arsinh}(at_1) + \text{Arsinh}(bt_2) + \text{Arsinh}(ct_3) \quad (6.2)$$

für die Simulation der Verhältnisse im mehrstufigen Prozeß nicht aus, ergab aber sehr gute Chi-Quadrat X^2 -Werte. Dies brachte den Gedanken, die Areasinus-(Hyperbolicus)-Funktion mit der Exponentialfunktion zu kombinieren, um die jeweils spezifischen Vorteile zu vereinen.

Es hat sich gezeigt, daß die Funktion (6.3):

$$R_a(t_1, t_2, t_3) = a * (\text{Arsinh}(b+t_1) + \text{ArSinh}(c+t_2) + \text{ArSinh}(d+t_3) + e^{(a+1)} + e^{(f+12)} + e^{(g+13)} + h)$$

eine sehr gute Übereinstimmung zwischen realem Prozeßverhalten und der Simulation des Ausgleichsproblems lieferte. Die Funktion (6.3) ist fallspezifisch anzuwenden. Für das vorliegende Beispiel (siehe Kapitel 5 und Kapitel 6) der mehrstufigen Hartbearbeitung von Industriekeramik wurde eine hohe Übereinstimmung zwischen der mathematischen Funktion und dem dreistufigen Prozeß gefunden. Bei ähnlich gelagerten Problemstellungen in der Hartbearbeitung kann auf die gleiche oder ähnliche Funktionen zurückgegriffen werden. Lediglich die Koeffizienten und die Zusammensetzung aus den Summanden von (6.3) sind zu variieren. Dazu empfiehlt es sich Tendenzen aus dem Verlauf der geplotteten Funktionen zu analysieren und durch schrittweise Modulation der Funktion den Verlauf der Realität anzugleichen. Voraussetzung ist die Kenntnis der realen Zusammenhänge.

Die Eingangsdaten wurden in der Wertemaske eingegeben (Bild 6.4):

Zeit [s]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Abtrag [um]	2.5	2.4	2.5	2.7	2.6	3.0	3.5	3.5	3.4	3.5	3.7	4.0
Ra [um]	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Ra (Max):	0.4											
Ra (Min):	0.4											
Wechselzeitpunkt:	2.5											

weiter

Bild 6.4: Menü zur Eingabe der Versuchsergebnisse beim Läppen.

Nach der Eingabe der Daten der n Messungen in die Datenmatrix ergibt sich eine $(4 \times n)$ -Matrix der Form $(t_1, t_2, t_3, R_a)^{(n)}$. Hier wurde sie auf 16 Einträge gekürzt:

2.5	0	0	0.458750
3.375	0	0	0.378333
4.25	0	0	0.371750
5.125	0	0	0.341375
4.25	1	0	0.157360
4.25	2	0	0.154532
4.25	3	0	0.150000
4.25	4	0	0.149089
4.25	5	0	0.144917
2.5	1	0	0.319439
2.5	1	2	0.172919
2.5	1	4	0.157080
2.5	1	10	0.149159
2.5	1	20	0.132000
2.5	1	40	0.146520
5.125	0	4	0.160000

Es werden durch das Levenberg-Marquardt-Verfahren die Variablen a, b, \dots, h in der Funktion (6.3):

$$f(t_1, t_2, t_3) = a \cdot (\text{Arsinh}(b + t_1) + \text{ArSinh}(c + t_2) + \text{ArSinh}(d + t_3) + e^{(a+1)} + e^{(f+12)} + e^{(g+13)} + h)$$

innerhalb der angegebenen Grenzen numerisch gesucht; und zwar derart, daß das Chi-Quadrat X^2 möglichst klein wird. Vorhergegangene Versuche mit anderen Funktionen haben nicht zum Ziel geführt. Wie bereits beschrieben,

wurde über die Kombination der bereits angewandten Funktionen die oben angegebene generiert. Dabei wird die Zahl der Iterationsschritte auf 80 begrenzt, damit auch in Extremfällen die Lösung in akzeptabler Zeit gefunden wird. Die numerische Genauigkeit wird sowohl für X^2 als auch für die gesuchten Parameterwerte auf 12 Stellen festgelegt. Diese ist ausreichend um ohne Fehlerabschätzungen weiter rechnen zu können, und sie ist nicht so groß, daß sie das Verfahren unverhältnismäßig verlangsamt.

Die ersten und die letzten Schritte der Iteration zeigen deutlich den Verlauf von Chi-Quadrat X^2 :

```
Iteration:1 ChiSquared:119.169 Parameters:{1., -1., -1., -1., -1., -1., -1., 1.}
Iteration:2 ChiSquared:1.31243 Parameters:
{0.0550971, -0.872064, -1.01111, -0.929642, -0.253639, -1.18531, -1.35101, 1.12537}
Iteration:3 ChiSquared:0.448698 Parameters:
{0.0143553, -15.6567, -3.89147, -2.76604, -6.68495, -1.65233, -2.68054, 32.6567}
...
Iteration:11 ChiSquared:0.944578 Parameters:
{2.11504 × 10-47, -42.8186, -6.50333, -3.44675, -6.43216, 0.581138, 2.6388, 33.7603}
Iteration:12 ChiSquared:0.944578 Parameters:
{2.11504 × 10-47, -42.8186, -6.50333, -3.44675, -6.43216, 0.581138, 2.6388, 33.7603}
```

Den besten Wert für die Abweichung hat bereits der dritte Iterationsschritt ergeben. Alle weiteren Schritte dienten dazu, auszuschließen, daß es sich dabei nur um ein lokales Minimum handelt. Da sich nach dem 11. Iterationsschritt keine weitere Verbesserung erzielen ließ wurde die Berechnung automatisch abgebrochen.

Somit lautet die durch die Matrix *daten* (*A*) angepaßte Rauheitsfunktion:

$$R_a(t_1, t_2, t_3) = 0.0143553 (32.6567 + E^{-6.68494 t_1} + E^{-1.65233 t_2} + E^{-2.68053 t_3} - \text{ArcSinh}[15.6567 t_1] - \text{ArcSinh}[3.89146 t_2] - \text{ArcSinh}[2.76604 t_3]) \quad (6.4)$$

Diese Funktion simuliert weitgehend das Verhalten der drei verketteten Prozeßstufen. Die graphische Auswertung der Funktion (6.4) gibt einen sinnvollen Zusammenhang zwischen den Prozeßzeiten und dem Rauheitsverlauf (Bilderfolge 6.5– 6.12).

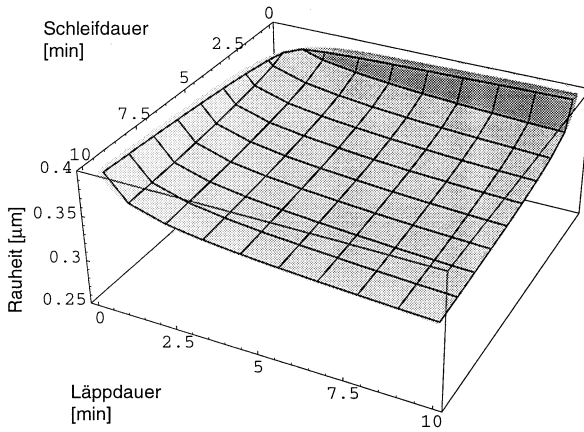


Bild 6.5: Rauigkeitsverlauf in Abhängigkeit von Läpp- und Schleifdauer bei Versuchen ohne Polieren.

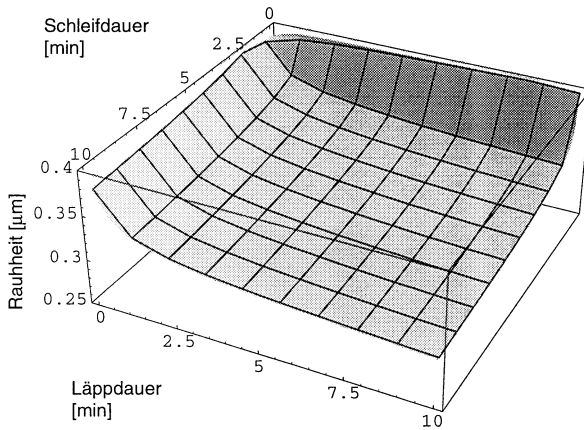


Bild 6.6: Rauigkeitsverlauf in Abhängigkeit von Läpp- und Schleifdauer bei Versuchen mit abschließendem Polieren von einer Minute.

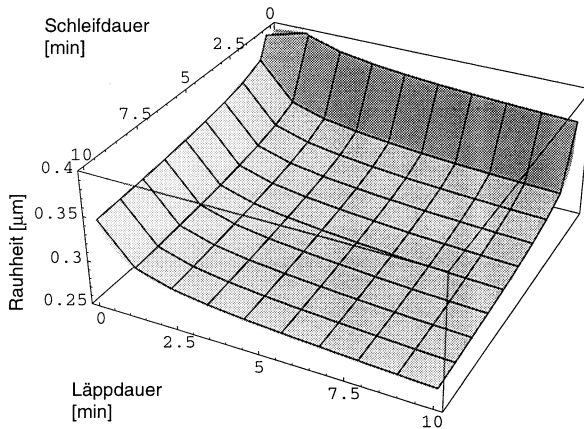


Bild 6.7: Rauigkeitsverlauf in Abhängigkeit von Läpp- und Schleifdauer bei Versuchen mit abschließendem Polieren von zehn Minuten.

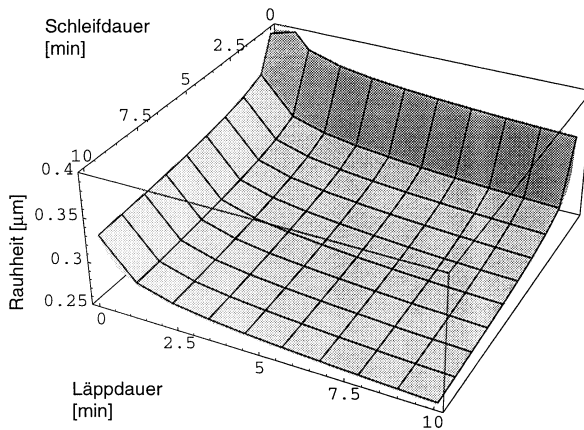


Bild 6.8: Rauigkeitsverlauf in Abhängigkeit von Läpp- und Schleifdauer bei Versuchen mit abschließendem Polieren von dreißig Minuten.

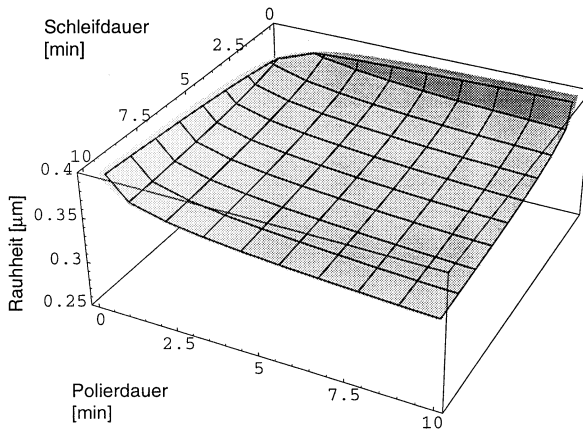


Bild 6.9: Rauigkeitsverlauf in Abhängigkeit von Polier- und Schleifdauer bei Versuchen ohne Läppen.

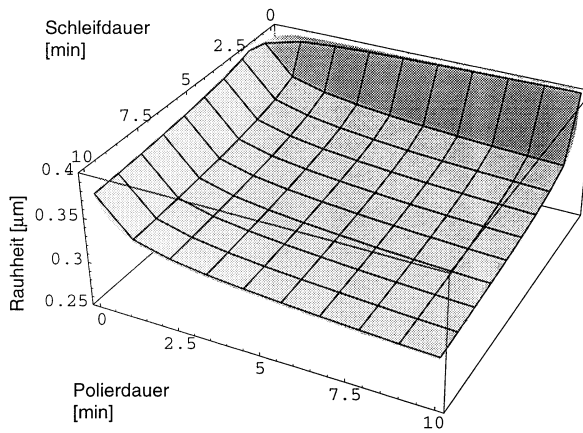


Bild 6.10: Rauigkeitsverlauf in Abhängigkeit von Polier- und Schleifdauer bei Versuchen mit einer Läppdauer von einer Minute.

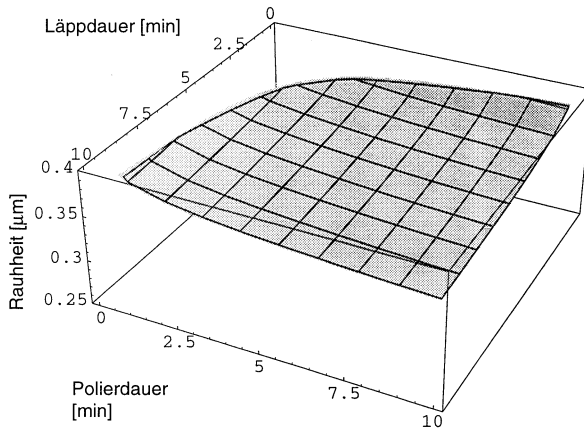


Bild 6.11: Rauigkeitsverlauf in Abhängigkeit von Polier- und Läppdauer bei Versuchen ohne Schleifen.

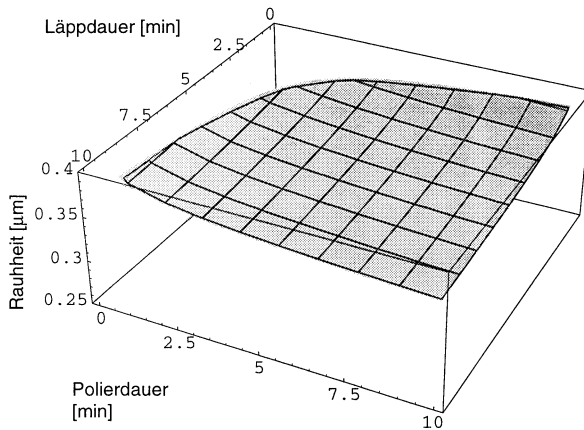


Bild 6.12: Rauigkeitsverlauf in Abhängigkeit von Polier- und Läppdauer bei Versuchen mit vorhergehendem Schleifen von einer Minute.

Allen Bildern liegt eine nichtlineare Optimierung nach dem Levenberg-Marquardt-Verfahren zugrunde. Die dabei verwendete Funktion (6.3) ist:

$$R_a(t_1, t_2, t_3) = a \cdot (\text{Arsinh}(b+t_1) + \text{ArSinh}(c+t_2) + \text{ArSinh}(d+t_3) + e^{(\theta+t_1)} + e^{(\varphi+t_2)} + e^{(\psi+t_3)} + h)$$

In den Bildern 6.5 bis 6.6 kann man sehen, daß bereits eine kurze Polierdauer zu einer signifikanten Verbesserung der Rauheit führt, während längere Polierzeiten nur noch geringe Änderungen bewirken.

In den Bildern 6.11 und 6.12 kann man sehr gut die Auswirkungen der Härteschicht sehen, die nach einer Schleifdauer von einer Minute fast vollständig entfernt ist.

6.2 Optimierung der Wechselzeitpunkte mit Hilfe des Lagrange-Ansatzes

Im nächsten Schritt wird die geforderte Rauheit (hier $R_{\text{agef}} = 0,35 \mu\text{m}$) von der Funktion subtrahiert. Damit wird eine adäquate Nullstellensuche der gesamten Funktion gewährleistet.

Die Lagrange-Funktion \mathcal{L} setzt sich aus der zu minimierenden Summe der Zeiten und der obigen Funktion im Sinne der Nebenbedingung zusammen (6.5):

$$\mathcal{L} = t_1 + t_2 + t_3 + \lambda \cdot \{-0,35 + 0,0143553(32,6567 + E^{-6,68494 t_1} + E^{-1,65233 t_2} + E^{-2,68053 t_3} - \text{ArcSinh}[15,6585 t_1] - \text{ArcSinh}[3,89146 t_2] - \text{ArcSinh}[2,76604 t_3])\}$$

Im folgenden werden die Unter- und Obergrenze für den Lagrange-Koeffizienten festgesetzt:

$\lambda_0 = 33$	Untergrenze
$\lambda_1 = 200$	Obergrenze
$l = \lambda_1$	aktueller Lagrange-Koeffizient

Die partiellen Ableitungen $\mathcal{L}_1, \mathcal{L}_2, \mathcal{L}_3$ der Lagrange-Funktion \mathcal{L} nach t_1, t_2 und t_3 lauten nun wie folgt:

$$\mathcal{L}_1 = 1 + 0.0143553 \left(-6.68495 E^{-6.68495 t_1} - \frac{15.6586}{\sqrt{1 + 245.192 t_1^2}} \right) \lambda$$

$$\mathcal{L}_2 = 1 + 0.0143553 \left(-1.65233 E^{-1.65233 t_2} - \frac{3.89147}{\sqrt{1 + 15.1435 t_2^2}} \right) \lambda$$

$$\mathcal{L}_3 = 1 + 0.0143553 \left(-2.68054 E^{-2.68054 t_3} - \frac{2.76604}{\sqrt{1 + 7.65098 t_3^2}} \right) \lambda$$

Durch Einsetzen des aktuellen Lagrange-Koeffizienten entstehen nun drei Gleichungen mit jeweils nur einer Unbekannten, nämlich den gesuchten Zeiten. Aus ihnen werden nun durch Nullsetzen die Zeiten berechnet.

Ein guter Startwert für die Nullstellensuche liegt hier z. B. bei $t_1 = t_2 = t_3 = 0,5$. Wird ein zu hoher Startwert gewählt, so könnte es sein, daß der Algorithmus nicht terminiert.

Als vorläufige Lösung ergeben sich die Wechselzeiten zu:

$$t_1 \rightarrow 2.87036, t_2 \rightarrow 2.96516, t_3 \rightarrow 2.85872$$

Die Zeiten, eingesetzt in die angenäherte Rauheitsfunktion (6.3) ergeben als Lösung die Abweichung vom erreichbaren Rauheitsendwert. Je näher der Wert an Null ist, desto besser sind die optimalen Zeiten mit einem numerischen Restfehler gefunden worden. Ist der Wert noch nicht hinreichend genau (hierfür wurde eine Schranke S vordefiniert), wird die Intervallschachtelung fortgesetzt.

In diesem Fall ist die Lösung mit einer Abweichung von der geforderten Rauheit von 0.0304468 noch außerhalb der Grenze S bei 0.0001. Die neue Oberschranke und der aktuelle Lagrange-Koeffizient werden neu gesetzt.

Der neue Lagrange-Koeffizient ergibt sich zu:

$$l = (\lambda_0 + \lambda_1)/2 = \frac{233}{2}$$

Der Vorgang der Nullstellensuche wird und Anpassung des Lagrange-Koeffizienten wird mehrmals wiederholt und ergibt nach 11 Iterationsschritten bei einem Lagrange-Koeffizienten von $\frac{388507}{4096}$ nun für die gesuchten Zeiten:

$$t_1 \rightarrow 1.36208, t_2 \rightarrow 1.6008, t_3 \rightarrow 1.43312$$

Der Restfehler ergibt sich zu $-5.92607 \cdot 10^{-6}$, ist also unterhalb der vorgegebenen Schranke.

Diese Zeiten werden nun an das Hauptprogramm zur Ausgabe zurückgegeben.

Die Ausgabemaske des Optimierprogramms gibt außerdem die Zeitanteile im Gesamtprozeß prozentual an. Die Möglichkeit eines Verfahrenswechsels wird in der linken Spalte der Maske angezeigt.

Optimierungswerte

OPTIMIERUNG

Ersten R _s -Werte		keine		Kombi		keine	
W _s -R _s -Werte		true		Schleif-Zeit		1.36208 min	
Letzten R _s -Werte		keine		Läpp-Zeit		1.60083 min	
				Polier-Zeit		1.43312 min	
Wechsel S-L (I)		1.3620		K(MH)-S		11.7340	
Wechsel S-L (R _s)		0.4650		K(MH)-L			
Kombi S-L true		1		K(MH)-P		12.3357	
Wechsel S-P		0		S-Zeitanteil		30.98432	
Wechsel L-P		1		L-Zeitanteil		36.41535	
Wechsel L-S		0		P-Zeitanteil		32.60032	
Wechsel P-L		0		S-Kostenanteil		23.91926	
Wechsel P-S		0		L-Kostenanteil		50.93493	
R _s -Start		90.05		P-Kostenanteil		25.14580	
R _s -End		20.04					

W

OK

Bild 6.13: Ausgabefenster für die optimierten Werte.

6.3 Gütevergleich der gefundenen Optimalwerte

In Vorversuchen wurde die Zeit der Einzelprozeßstufen variiert. Unter anderem wurden minimale Zeiten eingestellt, so daß die geforderte Oberflächengüte nach drei Stufen erreicht werden konnte. Jedoch waren diese Zeiten über 10% länger als die errechneten optimalen Zeiten. Tabelle 6.14 zeigt einige Beispiele für die Gesamtdauer der Bearbeitung, wobei nur solche Versuche angeführt sind, bei denen die geforderte Rauheit nur wenig unter- oder überschritten wurde. Zum Vergleich wurden die als optimal errechneten Zeiten angegeben:

	t_1 [min]	t_2 [min]	t_3 [min]	t_{ges} [min]	R_a [μm]
Versuch 1	1,000	5,000	0	6,000	0,338
Versuch 2	2,500	2,500	0	5,000	0,353
Versuch 3	1,000	2,500	2,000	5,500	0,340
<i>errechnet</i>	<i>1,36</i>	<i>1,60</i>	<i>1,43</i>	<i>4,49</i>	<i>0,350</i>

Tabelle 6.14: Zeiten aus den Vorversuchen (*optimal*).

Die optimale Gesamtzeit t_{ges} ergibt sich zu $t_{ges} = 4,49$ min. Im Fallbeispiel wurden folgende Parametereinstellungen vorgenommen:

Schleifen	Läppen	Polieren
$n_t = 20 \text{ min}^{-1}$ $a_{eSchl} = 5 \mu\text{m}$ $v_{cSchl} = 10 \mu\text{m/min}$ $a_{eSchr} = 86 \mu\text{m}$ $v_{cSchr} = 100 \mu\text{m/min}$	$p_L = 2 \text{ bar}$ $n = 133 \text{ min}^{-1}$ D 30	$p_L = 2 \text{ bar}$ $n = 15 \text{ min}^{-1}$ D1 Öl

Tabelle 6.15: Parametereinstellungen.

Mit den optimal errechneten Zeiten ergaben sich hinreichend gute Annäherungen für die geforderte Oberflächengüte von $R_a = 0,35 \mu\text{m}$. In Bild 6.16 sieht man die Streubreite der gemessenen Endrauheiten ($n=40$ Versuche, Mittelwert $R_a = 0,3494 \mu\text{m}$):

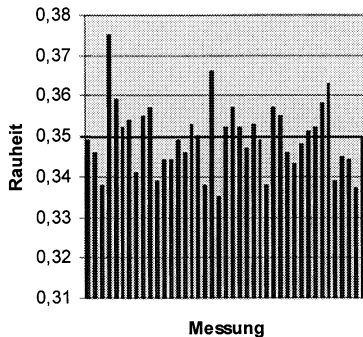


Bild 6.16: Mittelwert aus $n=40$ Messungen.

Durch die numerische Berechnung optimaler Wechselzeitpunkte ergeben sich für den Planer mehrere Vorteile. Da ein kontinuierlicher Bereich von möglichen Einstellungen nach dem Optimum durchsucht wird findet man mit großer Wahrscheinlichkeit ein globales Minimum als bei herkömmlicher Versuchsdurchführung, bei der nur diskrete Zeitpunkte überprüft werden können. Die graphische Darstellung der Funktion bietet den Vorteil, daß Bearbeitungstendenzen erkennbar werden. Das Verfahren kann in der Praxis auch iterativ verwendet werden, d. h. es können reale Meßwerte für die berechneten Optimalzeiten zur weiteren Verbesserung der Näherung zusätzlich in das System eingegeben werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel verfolgt, eine mathematische Methode zur zeitoptimalen Gestaltung von mehrstufigen, multivariaten Prozessen zu entwickeln und diese an einem Fallbeispiel zu demonstrieren.

Es wurde zur Verfolgung, Konkretisierung und Erfüllung vorgegebener Ziele systemtechnisch vorgegangen. Zur Analyse des gegenwärtigen Fertigungszustandes wurde neben Stand der Forschung und Technik in der Hartbearbeitung auf die Besonderheiten der eingesetzten Fertigungsverfahren eingegangen. So stellen das Schleifen, Läppen und Polieren die Hauptverfahren für die Hartbearbeitung dar. In folgenden Kapiteln wurde verdeutlicht, welche Randbedingungen und Parameter typisch für die einzelnen Fertigungsstufen der Produktion sind. Aus der Analyse des gegenwärtigen Fertigungszustands in der Hartbearbeitung, speziell von Industriekeramik, wurde das Problem, nämlich die zu geringe Ausnutzung einer potentiellen Zeitreduktion in den Einzelprozeßstufen und damit in der gesamten Fertigungskette in der mehrfach verketteten Produktion von Hartstoff-Funktionsteilen abgeleitet und begründet. Gleichzeitig wurde das Ziel definiert, eine zeitliche Optimierung multivariater, mehrstufiger Fertigungsprozesse durch reproduzierbare, fundierte Methoden zu erreichen.

Als geeignete Methoden eigneten sich in erster Linie anerkannte mathematische Ansätze. Die analytische Lösung des Problems führte aber durch Überbestimmtheit der Gleichungssysteme alsbald ad absurdum. Die Komplexität des Systems im Sinne der obigen Definition machte den Einsatz numerischer Rechenverfahren unumgänglich. Zum einen verlangte die Lösung des Problems hohe Genauigkeiten über hunderte von Rechenschritten hinweg, zum anderen durfte das Endergebnis, nämlich die optimalen, aufeinander abgestimmten Prozeßwechselzeiten einer mehrstufigen Fertigungskette nicht einem unvertretbar hohem Fehler unterliegen.

In der Konzeptentwurfsphase wurden Methoden untersucht, mit deren Hilfe eine explizite Funktion mit multivariater Parameterzuordnung in eine implizite Darstellung umgewandelt werden konnte, um dann auf ihr eine Optimumsuche zu ermöglichen.

Für diesen Zweck wurden zunächst Methoden der linearen numerischen Ausgleichsrechnung angewandt. Ansätze mit diversen mathematischen Approximations-Funktionen, wie Polynome höherer Ordnungen oder Exponentialfunktionen ergaben zwar eine mathematisch stets korrekte explizite Funktion, aber lieferten unlogische Endwerte bei der anschließenden Optimumsuche nach der Euklidischen 2-Norm und Plausibilitätsüberprüfung für die gesuchten Zeiten. Das zu minimierende Residuum – ein Kontrollinstrument für die Güte der Rechnung - war nicht zufriedenstellend. Dies lag neben der unzureichenden Konditionierung des Problems v. a. an den endlich stark begrenzten Bereichen der höchsten Aussagewahrscheinlichkeit. Die Annäherung war derart unzulänglich, daß eine weitere Verfolgung dieses Ansatzes verworfen wurde. Verbesserte Ergebnisse stellten sich durch den Einsatz von Hyperbelfunktionen, im Gegensatz zu anderen transzendenten Funktionen, ein.

Es wurde als sinnvoller erachtet, auf Methoden der nichtlinearen numerischen Ausgleichsrechnung auszuweichen. Der immense Rechenaufwand wurde durch Verzicht auf Standard-Methoden im Vorversuchsstadium verringert. Die Modifikation des Gauß-Newton-Verfahrens durch teilschrittbezogene Substitution einer Diagonalmatrix, lieferte das erfolgversprechendste Verfahren der nichtlinearen Ausgleichsrechnung für den vorliegenden Fall, nämlich das Levenberg-Marquardt-Verfahren. Das Levenberg-Marquardt-Verfahren bildet im Gegensatz zum Gauß-Newton-Verfahren, das ein reines Entwicklungsverfahren zur nichtlinearen Optimierung darstellt, eine Kombination zwischen Gradientensuchverfahren und Entwicklungsverfahren und bietet die Synthese aus deren Vorteilen.

Der Konzeptanalyse folgte die Bewertung und Auswahl der Konzepte. Durch das Levenberg-Marquardt-Verfahren wurde eine Methode von höchstem Erfüllungsgrad beschrieben. Die Anwendung dieses Verfahrens auf die

Eingangsdaten des Problems lieferte eine hinreichend genaue und aussagekräftige Funktion zur Beschreibung der multivariaten, mehrstufigen Prozesse. Die Ergebnisse waren zufriedenstellend und konnten verknüpft mit der Nebenbedingung in der Lagrange-Funktion weiterverarbeitet werden. Durch einen Iterationsalgorithmus ergab die numerische Näherungslösung des Lagrange-Gleichungssystems ein eindeutiges und plausibles Zeitoptimum.

Das Ziel, eine zeitliche Optimierung multivariater, mehrstufiger Fertigungsprozesse durch reproduzierbare, fundierte Methoden zu beschreiben wurde erreicht und an einem speziellen Fallbeispiel demonstriert. Die Herstellung von Wasserdichtscheiben aus technischer Keramik stellt enorme Herausforderungen an die Fertigungsplanung. Anhand eines dreistufigen Fertigungsverfahrenes, bestehend aus Schleifen, Läppen und Polieren, wurden die optimalen Wechselzeiten zwischen den Stufen errechnet. Dazu wurde zu einem früheren Zeitpunkt ein Bearbeitungsversuchsstand aufgebaut. Die Werte aus der Praxis wurden für die Beispielrechnung verwendet.

Durch diese Arbeit steht nun für die mehrstufige Prozeßplanung ein optimales Hilfsmittel zur empirischen Berechnung von optimalen Wechselzeiten in Hinsicht auf eine geforderte Randbedingung zur Verfügung.

Es wurde eine allgemeingültige mathematische Methode zur Beherrschung ähnlich gelagerter Fertigungsprobleme vorgestellt. Die Einzigartigkeit besteht in der Problematik der Kombination zwischen mehrstufigen, instationären bzw. quasi-stationären Prozessen und deren multivariaten Abhängigkeiten, sowie der Anwendung von diversen Funktionen durch nichtlineare numerische Ausgleichsrechnung. Der spezielle Bezug zur Keramikhartbearbeitung sichert eine neue sinnvolle Anwendung der mathematischen Methode in der Praxis. Weiterhin könnte die Universalität des Verfahrens auf ähnliche Anwendungsfelder angewandt werden.

Zur Aufwandsabschätzung wurden Versuche durchgeführt. Sie belegten die Richtigkeit der Vorgehensweise. In der heutigen Fertigung werden aus den einzelnen Prozessen Meßdaten gespeichert. Diese bereits existenten Daten

dienen in dieser Arbeit für die beschriebene Optimierung. Der Eingabeaufwand wurde durch Maskeneingabe wesentlich reduziert. Der Planer muß für den Durchlauf der Optimierung lediglich ein vorgefertigtes Programm ablaufen lassen. Als Lösung kommen die Einstellparameter heraus, die die minimalsten Einzelfertigungszeiten ergeben. Der Aufwand reduziert sich vor allem bei hohen Stückzahlen.

Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sind gegeben. Es ist denkbar die Kapazitäten des Gesamtfertigungsdurchlaufs in die Betrachtung einzubeziehen. So könnten die kapazitive Auslastung und Verfügbarkeit einzelner Stationen, die Verteilzeiten und Rüstzeiten sowie die Ausweichstrategien durch Ausweitung der Anzahl der errechneten Stufen mitberücksichtigt werden. Es müssen dazu passende Parameterfelder definiert werden. In Kombination mit bereits existenten PPS- Systemen zur technischen Auftragsabwicklung ergeben die hier erarbeiteten Ergebnisse eine sinnvolle Ergänzung.

8 Literaturangabe

ABAY 1996A

ABAY, C.: Mehrstufige Prozeßoptimierung bei der Hartbearbeitung von Keramik. Maschinenmarkt (1996) 11, S. 32-37.

ABAY 1996B

ABAY, C.: Mehrstufige Prozeßoptimierung bei der Hartbearbeitung von Keramik. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Industriekeramik in Forschung und Praxis. München: Herbert Utz Wissenschaft 1996, S. 1 - 13. (iwb-Seminarberichte 17).

ABAY 1996C

ABAY, C.: Mehrstufige Prozeßoptimierung bei der Hartbearbeitung von Keramik. In: Westkämper, S. (Hrsg.): Jahrbuch "Schleifen, Honen, Läppen und Polieren", Ausgabe 58. Essen: Vulkan 1996, S. 523 ff.

ABAY 1997A

ABAY, C.: Prozeßoptimierte Endbearbeitung keramischer Werkstoffe. Maschinenmarkt (1997) 25, S.26-30.

ABAY 1997B

ABAY, C.: Mehrstufige Prozeßoptimierung bei der Hartbearbeitung von Keramik. In: VDMA (Hrsg.): Technologiebörse, Forscherwissen für den bayerischen Maschinenbau. Nürnberg: Bayern Innovativ 1997, S.24-25.

ABAY 1997C

ABAY, C.: Hartbearbeitung von Industriekeramik. Die Neue Fabrik (1997), S.88-89.

ARNOLD 1994

ARNOLD, J. M.: Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern. Stuttgart: Teubner 1994. (Forschungsberichte des IFSW).

ARNOT & FISCHBACHER 1995

ARNOT, R. N., FISCHBACHER, M.J.: Werkzeugscheiben im Trockenschliff. VDI-Z 137 (1997) 7/8, S. 36-39.

BAMBERG & BAUR 1994

BAMBERG, G.; BAUR, F.: Statistik – Arbeitsbuch. 4. Aufl. München: R. Oldenbourg, 1994.

BARTH U. A. 1985

BARTH, F. U. A.: Mathematische Formeln und Definitionen. 4.Aufl. München: Lindauer, 1985.

BEVINGTON 1992

BEVINGTON, P. R.: Data reduction and error analysis for the physical sciences. 2.Aufl. New York : McGraw-Hill, 1992.

BITTERMANN 1997

BITTERMANN, H.-J.: Intelligente Formgebung drückt Keramik in die Märkte. VDI Nachrichten (1997) 43, S. 16.

BITTERMANN 1997A

BITTERMANN, H.-J.: Vom Ziegelstein bis zum Supraleiter. VDI Nachrichten (1997) 43, S. 17.

BODSCHWINNA & HILLMANN 1992

BODSCHWINNA, H.; HILLMANN, W.: Oberflächenmeßtechnik mit Tastschnittgeräten in der industriellen Praxis. 1. Aufl. Berlin: Beuth, 1992.

BOETZ 1996

BOETZ, V.: Die Verfahrenswahl hängt vom Einzelfall ab. Industrieanzeiger (1992) 50, S. 28-29.

BOSCH 1993

BOSCH, K.: Statistik – Taschenbuch. 2. Aufl. München: R. Oldenbourg, 1993.

BRONSTEIN & SEMENDJAJEW 1986

BRONSTEIN, I. N., SEMENDJAJEW, K. A.: Taschenbuch der Mathematik, Ergänzende Kapitel. Grosche, G. u. a. (Hrsg.) 4. Aufl. Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft, 1986.

BRONSTEIN & SEMENDJAJEW 1987

BRONSTEIN, I. N., SEMENDJAJEW, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. 23. Aufl. Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft, 1987. Moskau: Nauka, 1979.

BRÜCHER 1994

BRÜCHER, T.: Kühlschmierung beim Keramikscheifen. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik –Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

BURGMANN 1988

FIRMA BURGMANN: ABC der Gleitringdichtung - Burgmann Lexikon. München: Oldenbourg, 1988.

CARTSBURG 1993

CARTSBURG, H.: Hartbearbeitung keramischer Verbundwerkstoffe. München: Carl Hanser 1993. (Forschungsberichte 122).

DA VINCI 1974

DA VINCI, L.: Codices Madrid I. Tratado de estatica y mechanica en italiano. Faksimile Ausgabe. Schweiz: S. Fische 1974.

DENKENA 1992

DENKENA, B.: Verschleißverhalten von Schneidkeramik bei instationärer Belastung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992 (VDI-Berichte 249).

DENNIS & MACKENSEN 1996

DENNIS, P.; MACKENSEN, V. v.: Diamant- und CBN-Feinschleifen auf Maschinen mit Läppkinematik. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bearbeitung neuer Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (VDI-Berichte 1276).

DUPUY & FLAMANT 1995

DUPUY, C. H. S.; FLAMANT, G.: Definitionsversuch einer generellen Methodologie für die Optimierung von Prozessen, die Ultra-Materialien enthalten. Entropie 31 (1995) 188/189, S. 61-69.

EMMELMANN 1992

EMMELMANN, C.: Trennen von Keramik mit Laserstrahlung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. (VDI-Berichte 253).

ENCERAM 1998

ENCERAM: Studie „Markt für Technische Keramik“.
Industrieanzeiger 5 (1998), S. 47.

EVERSHEIM U.A 1996A

EVERSHEIM, W. U. A.: Die Qualität keramischer Produkte
systematisch verbessern. VDI-Z Spezial Ingenieur-
Werkstoffe (1996) 5, S.54-58.

EVERSHEIM U. A. 1996B

EVERSHEIM, W. U. A.: Qualitätssicherung und
Prozeßbeherrschung in der Serie keramischer Bauteile. In:
Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bearbeitung neuer
Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (VDI-
Berichte 1276).

FANZOTT 1987

FANZOTT, S. M.: Technische Keramik. Landsberg/Lech:
Moderne Industrie 1987.

FLACKE 1997

FLACKE, H.-R.: Aussteller auf der Hannover-Messe 97
zeigten leichte und hochfeste Teile. Maschinenmarkt 103
(1997) 22, S. 50-53.

FROBIN U. A. 1989

FROBIN, R. U. A.: Bearbeitung von Maschinenbaukeramik
durch Schleifen. Fertigungstechnik und Betrieb 39 (1989)
9, S. 534-538.

FUNCK 1995

FUNCK, A.: Planschleifen mit Läppkinematik. München:
Hanser, 1995.

GÄBLER U. A. 1996

GÄBLER, J. U. A.: Läppen und Polieren von Ingenieurskeramik. In: Werkstoffe für die Fertigungstechnik. Werkstoffwoche 96, Symp.5, Stuttgart. Frankfurt: Informationsges. 1996.

GÄBLER 1997

GÄBLER, J.: Funktionsorientierte Läpp- und Polierbearbeitung von keramischen Wälzkörpern. In: Saljè, E.; Westkämper E. (Hrsg.): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 57. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag 1997.

GATZEN & MÄTZIG 1996

GATZEN, H.-H.; MÄTZIG, C.: Minimierung der Rauigkeit beim Nanoschleifen isostatisch heißgepreßter Keramikwerkstoffe. In: Westkämper, E. (Hrsg.): 8. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium. Essen: Vulkan-Verlag 1996.

GERLITZKY 1994

GERLITZKY, M.: Derzeitige Möglichkeiten und Grenzen der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von technischer Keramik am Beispiel von Ventilen. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik – Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

GONSCHIOR 1995

GONSCHIOR, M.: Trennen von keramischen Werkstoffen mit Nd:YAG-Laserstrahlung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995 (VDI-Berichte 334).

GREIL & MENZLER 1998

GREIL, P.; MENZLER, N.: Bayerischer Forschungsverbund für keramische Materialentwicklung und Prozeßtechnik. In: Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (Hrsg.): Symposium Neue Werkstoffe in Bayern. Bayreuth 1998, S.21-35.

GREINER 1996

GREINER, M.: Untersuchung und Entwicklung mathematischer Optimierungsverfahren zur Dimensionierung von Rechensystemen. München: CS Press 1996.

GRONER 1987

GRONER, R.: Methods of heuristics. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1987.

GROSCHKE U. A. 1995

GROSCHKE, G. U. A.: Teubner-Taschenbuch der Mathematik, Teil 2. Groschke, G. u. a. (Hrsg.) 7. Aufl. Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft, 1995.

HAMM & LANGERMANTEL 1994

HAMM, G.; LANGERMANTEL, A.: Die industrielle Bearbeitung von SiC-Keramiken unter Berücksichtigung der spezifischen Bauteilanforderungen von Gleitringdichtungen. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik –Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

HÄMMERLIN & HOFFMANN 1992

HÄMMERLIN, G.; HOFFMANN, K.-H.: Numerische Mathematik.
3. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1992.

HARTUNG & ELPELT 1995

HARTUNG, J.; ELPELT, B.: Multivariate Statistik. 5. Aufl.
München: R. Oldenbourg, 1995.

HARTUNG U. A. 1995

HARTUNG, J. U. A.: Statistik. München: R. Oldenbourg,
1995.

HEGER 1993

HEGER, A.: Zuverlässigkeit von Keramik. Düsseldorf: VDI-
Verlag 1993. (VDI-Berichte 132).

HEISEL U. A. 1997

HEISEL, U. U. A.: Kornbewegung beim Läppen. VDI-Z
Special Werkzeuge (1997), S. 36-38.

HEUER 1992

HEUER, W.: Außenrundscheifen mit kleinen keramisch
gebundenen CBN-Schleifscheiben. Düsseldorf: VDI-Verlag
1992. (VDI-Berichte 270).

HOFFMAN & KHAYYAL 1987

HOFFMAN, K. L.; KHAYYAL, F. A.: Computational
mathematical programming. Amsterdam: North-Holland,
1987.

HOFFMANN & PÖSCHL 1994

HOFFMANN, B.; PÖSCHL, G.: Aufgabenspezifische
Prozeßgestaltung zur Schleifbearbeitung von Bauteilen
aus Hochleistungskeramik. In: Warnecke, G. (Hrsg.):
Schleifen von Hochleistungskeramik –
Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes.
Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern
1994.

HOFFMEISTER & MICHEL 1996

HOFFMEISTER, H.-W.; MICHEL, S.: Qualitätsorientierte
Prozeßkettenoptimierung. In: Westkämper, E. (Hrsg.): 8.
Internationales Braunschweiger
Feinbearbeitungskolloquium. Essen: Vulkan-Verlag 1996.

HOLZ 1994

HOLZ, B. F.: Oberflächenqualität und
Randzonenbeeinflussung beim Planschleifen einkristalliner
Siliciumscheiben. München: Carl Hanser 1994.
(Forschungsberichte 143).

HORNIK & SALERNO 1992

HORNIK, S; SALERNO, R.: Einfluß der Läppbearbeitung auf
die Qualität von Keramiken für die Elektroindustrie. Szkło i
Ceramika 42 (1992) 2, S.1-4.

HUBER 1993

HUBER, A.: Mehrstufige Prozessoptimierung bei der
Hartbearbeitung von Keramik. In: Saljè, E.; Westkämper
E.: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 57.
Auslage. Essen: Vulkan-Verlag 1993.

HUBER 1995

HUBER, A.: Arbeitsfolgeplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung. In: Milberg, J. (Hrsg.); Reinhart, G. (Hrsg.): iwv Forschungsberichte. Berlin: Springer, 1995 (Band 83)

IWANOW U. A. 1993

IWANOW, W. U. A.: Beitrag zur Temperatur- und Spannungsberechnung beim Schleifen. In: Salje, E.; Westkämper E.: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 57. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag 1993.

JAHANMIR 1996

JAHANMIR, S.: Mechanismen des Materialabtrags beim Schleifen von Hochleistungskeramik. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bearbeitung neuer Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (VDI-Berichte 1276).

JANSSEN 1996

JANSSEN, J. M.: Neue Maschinenkonzepte für die Hart- und Präzisionstechnik. In: Westkämper, E. (Hrsg.): 8. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium. Essen: Vulkan-Verlag 1996.

JUNG 1996

JUNG, R.: Feinbearbeitungsverfahren unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten im industriellen Einsatz. In: Westkämper, E. (Hrsg.): 8. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungs-kolloquium. Essen: Vulkan-Verlag 1996.

JÜTTING 1993

JÜTTING, Y.: Neue Ergebnisse zum mechanischen Polieren. In: Saljè, E.; Westkämper E.: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 57. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag 1993.

KACALAK & LEWKOWICZ 1996

KACALAK, W.; LEWKOWICZ, R.: Methoden und Probleme bei der Präzisionsbearbeitung kleiner Keramikformstücke. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bearbeitung neuer Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (VDI-Berichte 1276).

KÄM 1997

KÄM: Ultraschall hält den Schleifprozeß auf Trab. VDI Nachrichten (1997) 22, S. 12.

KAPPEL 1998

KAPPEL, H.: Oberflächenmodifikation technischer Keramik mit Excimer-Laserstrahlung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998. (VDI-Berichte 469).

KARPUSCHEWSKI & LIERSE 1996

KARPUSCHEWSKI, B.; LIERSE, T.: Feinbearbeitung von Hochleistungskeramik. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bearbeitung neuer Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (VDI-Berichte 1276).

KARPUSCHEWSKI U. A. 1998

KARPUSCHEWSKI, B. U. A.: Effiziente Feinschleifprozesse ersetzen das Läppen. Maschinenmarkt 104 (1998) 18, S. 44-48.

KEMPTER 1994

KEMPTER, K.: Entwicklungspotential der Funktionskeramik.
In: Materialforschung - neue Werkstoffe, Symp. des BMFT,
Jülich, Würzburg. Jülich: Forsch.-Zentrum 1994.

KESSEL 1988

KESSEL, H.: Bauteile aus technischer Keramik wirtschaftlich
fertigen. IDR (1988) 4, S.254-259.

KISTNER 1993

KISTNER, K.-P.: Optimierungsmethoden. 2. Aufl.
Heidelberg: Physica-Verlag, 1993.

KLOCKE U. A. 1995

KLOCKE, F. U. A.: Hochleistungskeramik im Automobilbau -
nur eine Vision ? VDI-Z Special Ingenieur-Werkstoffe
(1995) 9, S.20-23.

KLOCKE U. A. 1997

KLOCKE, F. U. A.: Hochleistungswerkstoffe erfordern
angepaßte Bearbeitungstechnologien. VDI-Z 139 (1997) 6,
S. 18-23.

KLUMPEN 1994

KLUMPEN, T.: Acoustic Emission (AE) beim Schleifen.
Aachen: Shaker 1994. (Berichte 4).

KNÖSEL 1993

KNÖSEL, E.: Der Schleifdruck als bestimmende Größe für
Oberflächendefekte an Hochleistungskeramiken. In: Saljè,
E.; Westkämper E.: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen
und Polieren. 57. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag 1993.

KOCH 1996

KOCH, N.: Schleifscheiben zur Bearbeitung von Hochleistungskeramik. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bearbeitung neuer Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (VDI-Berichte 1276).

KÖNIG & LUDEWIG 1995

KÖNIG, W.; LUDEWIG, T.: Sol-Gel-Korunde eröffnen neue Leistungspotentiale, wt Werkstattstechnik (1995), S. 22-27.

KÖNIG & POPP 1989

KÖNIG, W.; POPP, M.: Precision Machining of Advanced Ceramics. Ceramic Bulletin 68 (1998) 3, S. 550-553.

KÖNIG & ZABOKLICKI 1994

KÖNIG, W.; ZABOKLICKI, A.: Laserunterstützte Oberflächenbearbeitung von Keramiken. In: DKG (Hrsg.): Korrosion und Verschleiß von keramischen Werkstoffen, 2. Statusseminar Aachen. Köln: Dt. Keramische Ges. (DKG) 1994.

KÖNIG U. A. 1994

KÖNIG, W. U. A.: Prozeßgestaltung beim Hochgeschwindigkeitsaußenrundscheifen von Ingenieurskeramik. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik –Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

KOSMOL 1993

KOSMOL, P.: Methoden zur numerischen Behandlung nichtlinearer Gleichungen und Optimierungsaufgaben. Stuttgart: Teubner 1993.

KRAUÁ 1988

KRAUÁ, D.: Polieren von Keramikteilen in einem Durchgang. IDR (1988) 4, S.211-213.

KROTTMAIER 1994

KROTTMAIER, J.: Versuchsplanung. 3. Aufl. Köln: TÜV Rheinland 1994.

KUNZ 1996

KUNZ, H.: Systematische Erprobung von Schneidstoffen, wt Werkstattstechnik (1996), S. 153-160.

LANG & SALJÈ 1989

LANG, G.: Moderne Schleiftechnologie und Schleifmaschinen. Essen: Vulkan-Verlag 1989.

LIERSE 1998

LIERSE, T.: Mechanische und thermische Wirkungen beim Schleifen keramischer Werkstoffe. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998. (VDI-Berichte 471).

LOCHER 1993

LOCHER, F.: Numerische Mathematik. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1993.

LÖFFLER 1990

LÖFFLER, F.: Keramische Hartstoffschichten. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990. (VDI-Berichte 180).

LUTZ 1988

LUTZ, E.: Keramische Werkstoffe gewinnen an Bedeutung für technische Anwendungen. Maschinenmarkt 94 (1988) 39, S. 24-33.

LUTZ & GEIGER 1993

LUTZ, N.; GEIGER, M.: Veränderungen der Oberflächengestalt keramischer Bauteile durch XeCl-Excimerlaserstrahlung. In: Saljè, E.; Westkämper E.: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 57. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag 1993.

MACKENSEN U. A. 1996

MACKENSEN, V. V. U. A.: Feinschleifen mit hochharten Schleifmitteln auf Maschinen mit Läppkinematik. In: Westkämper, E. (Hrsg.): 8. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium. Essen: Vulkan-Verlag 1996.

MARINESCU 1996

MARINESCU, I. D.: Laser Assisted Grinding of Ceramics. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bearbeitung neuer Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (VDI-Berichte 1276).

MEYER & KOCH 1994

MEYER, H.-R.; KOCH, N.: Schleifen keramischer Werkstoffe mit Diamantwerkzeugen. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik – Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

MILLER 1998

MILLER, F.: Keramik schlägt eigene Rekorde. VDI nachrichten (1996) 16, S.14.

MÖRGENTHALER 1994

MÖRGENTHALER, K. D.: Keramik im Fahrzeug. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik –Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

MORLOCK 1993

MORLOCK, N.: Operations Research. München: Carl Hanser 1993.

MOSER 1993

MOSER, M.: Regelung der Maschinenbelegung in der flexiblen Fertigung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993. (VDI-Forschungsberichte 96).

MUNDRY 1995

MUNDRY, G.: Bruchverhalten von Al_2O_3 -Keramik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995. (VDI-Forschungsberichte 95).

NEISES 1995

NEISES, A.: Hochharte Schneidstoffe. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995. (VDI-Forschungsberichte 332).

NETZSCH 1997

NETZSCH : Exzenterschneckenpumpe hat Rotor aus keramischem Werkstoff. Maschinenmarkt 103 (1997) 23, S.75.

NICHOLSON 1992

NICHOLSON, P. S.: Praktische Ergebnisse der ZfP von modernen Keramiken. Nondestructive Testing and Evaluation, 8-9 (1992), S. 651-669.

NIESTER 1992

NIESTER, T.: Tribologisches Verhalten von nichtoxidischen
Keramiken unter praxisnahen Bedingungen. Düsseldorf:
VDI-Verlag 1992. (VDI-Forschungsberichte 208).

NYÁRSIK U. A. 1997

NYÁRSIK, L.: Fehleruntersuchungen an keramischen
Dichtscheiben. ZWF 92 (1997) 4, S. 151.

PAPAGEORGIOU 1991

PAPAGEORGIOU, M.: Optimierung. München: R.
Oldenbourg, 1991.

PAULMANN 1991

PAULMANN, R.: Schleifen Honen Läppen. Düsseldorf: VDI
Verlag 1991.

PFEIFFER U. A. 1994

PFEIFFER, B. U. A.: Auswirkungen verschiedener
Schleifverfahren auf den Oberflächenzustand und das
mechanische Verhalten von Hochleistungskeramiken. In:
Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik
–Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes.
Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern
1994.

PFEUFER 1996

PFEUFER, V.: Mikromaterialbearbeitung mit Excimer-
Lasern. In: Westkämper, E. (Hrsg.): 8. Internationales
Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium. Essen:
Vulkan-Verlag 1996.

RABE 1997

RABE, H.: Neue Aufgaben für Härte 10. Werkzeuge Juni (1997), S. 48-50.

REINSCH 1995

REINSCH, C.: Numerische Mathematik 1 und 2. 3. Aufl. München: Mathematisches Institut und Institut für Informatik der Technischen Universität München, 1995.

REEVES 1993

REEVES, C. R.: Modern heuristic techniques for combinatorial problems. Oxford: Blackwell, 1993.

ROTH 1992

ROTH, H.-P.: Ein Beitrag zur Planung und Optimierung der Verfahrensteilung in der Fertigung. Berlin: Springer, 1992.

SABOTKA 1991

SABOTKA, I. A. W.: Planläppen technischer Keramiken. München: Carl Hanser 1991. (Forschungsberichte 90).

SALJË 1991

SALJË, E.: Begriffe der Schleif- und Konditioniertechnik. Essen: Vulkan-Verlag 1991.

SALJË & WESTKÄMPER 1993

SALJË, E.; WESTKÄMPER E.: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 57. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag 1993.

SCHIELE-TRAUTH 1997

SCHIELE-TRAUTH, U.: Keramik aus dem Baukasten. VDI Nachrichten (1997) 5, S. 16.

SCHIRMER 1995

SCHIRMER, K. S.: Entwicklung von Versagenskriterien für keramische Bauteile unter mehrachsiger Belastung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995. (VDI-Berichte 174).

SCHNEIDER 1996

SCHNEIDER, J.: Schneidkeramik. Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 1996.

SCHNEIDER 1997

SCHNEIDER, J.: Trocken-, Hart- und HSC-Bearbeitung - Einsatzgebiete von Schneidkeramik und polykristallinem Bornitrid. VDI-Z Spezialwerkzeuge (1997) 8, S. 31-35.

SCHULZ & KALHÖFER 1998

SCHULZ, H.; KALHÖFER, E.: Zerspanungsparameter mit neuronalen Netzen bestimmen. wt Werkstattstechnik 88 (1998) H.3, S. 125-128.

SMIRNOV, DUNIN-BARKOVSKIJ 1973

SMIRNOV, N. V.; DUNIN-BARKOVSKIJ, I. V.: Mathematische Statistik in der Technik. Berlin: Dt. Verlag d. Wiss., 1973.

SPELUCCI 1993

SPELUCCI, P.: Numerische Verfahren der nichtlinearen Optimierung. Basel: Birkhäuser, 1993.

SPIEGEL 1977

SPIEGEL, M. R.: Vektoranalysis. Düsseldorf: McGraw-Hill Book Company GmbH, 1977.

SPUR 1972

SPUR, G.: Optimierung des Fertigungssystems Werkzeugmaschine. München: Carl Hanser, 1972.

SPUR 1989

SPUR, G.: Keramikbearbeitung – Schleifen, Honen, Läppen, Abtragen. München: Carl Hanser, 1989.

SPUR & ENGEL 1997

SPUR, G.; ENGEL, H.: Kennwerte des Werkzeugeingriffs beim Läppen spröder Werkstoffe. ZWF 92 (1997) 6, S. 273-277.

SPUR U. A. 1993

SPUR, G. U. A.: Werkstoffspezifische Schleiftechnologie - Schlüssel für erhöhte Prozeßfähigkeit in der Keramikbearbeitung. In: Saljè, E.; Westkämper E.: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 57. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag 1993.

SPUR U. A. 1995

SPUR, G.: Optimierung von Fertigungsprozessen. ZWF 90 (1995) 10, S. 503-506.

SPUR U. A. 1996

SPUR, G. U. A.: Kühlschmierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bearbeitung neuer Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (VDI-Berichte 1276).

STARK 1997

STARK, C.: Potentiale von Schleifwerkzeugen mit mikrokristallinem Sinterkorund. VDI-Z Special Werkzeuge (1997) 4, S.32-35.

STÄHLI & JÜTTING 1995

STÄHLI, A. W.; JÜTTING, Y.: Untersuchungen zum Läppen und Polieren keramischer Werkstoffe. Industrie Diamanten Rundschau 29 (1995) 2, S. 95-101

TAGUCHI 1989

TAGUCHI, G.: Quality Engineering. 1. Aufl. München: gfmt, 1989.

TAYLOR 1988

TAYLOR, J. R.: Fehleranalyse. 1. Aufl. Weinheim: VCH, 1988.

TAWAKOLI 1990

TAWAKOLI, T.: Hochleistungs-Flachschleifen. Düsseldorf: VDI Verlag 1990.

TELLE 1994

TELLE, R.: Oberflächengüte und Randzoneneigenschaften von hartbearbeiteten Aluminiumoxid-Keramiken. . In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik - Ergebnis-präsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

Tio 1990

Tio, T.-H.: Pendelplanschleifen nichtoxidischer Keramiken. München: Carl Hanser 1991. (Forschungsberichte 80).

TÖNSHOFF & WOBKER. 1993

TÖNSHOFF, H. K.; WOBKER, H.-G.: Prozeßführung beim Schleifen von Keramiken. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik – Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

TÖNSHOFF & SCHMIDT. 1996

TÖNSHOFF, H. K.; SCHMIDT, J.: Feinbearbeitungsverfahren im technischen Wettbewerb. In: Westkämper, E. (Hrsg.): 8. Internationales Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium. Essen: Vulkan-Verlag 1996.

TÖNSHOFF U. A. 1993

TÖNSHOFF, H. K. U. A.: Seitenschleifen von Keramiken. In: Saljè, E.; Westkämper E.: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 57. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag 1993.

TÖNSHOFF U. A. 1996

TÖNSHOFF, H. K. U. A.: Innenrundsleifen von Hochleistungskeramik. wt Werkstatttechnik (1996), S. 257-261.

TREFFERT 1995

TREFFERT, C.: Hochgeschwindigkeitsschleifen mit galvanisch gebundenen CBN-Schleifscheiben. Aachen: Shaker 1995. (Berichte 4).

TRÖHLER 1993

TRÖHLER, S.: Das saubere Läppen. In: Saljè, E.; Westkämper E.: Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. 57. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag 1993.

TUERSLEY U. A. 1994

TUERSLEY, I. P. U. A.: Verschiedene Verfahren der Bearbeitung von fortgeschrittener Keramik. Journal of Materials Processing Technology 42 (1994) 4, S. 377-390.

UHLMANN 1994A

UHLMANN, E. G: Erhöhung der Bauteilqualität und der Wirtschaftlichkeit durch modifiziertes Tiefschleifen. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik –Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

UHLMANN 1994B

UHLMANN, E. G: Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe. München: Carl Hanser 1994. (Forschungsberichte 129).

VDI 1996

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (HRSG.): Bearbeitung neuer Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: CDI-Verlag 1996. (VDI-Berichte 1276).

VERLEMANN 1992

VERLEMANN, E.: Bearbeitungstechnologien und –strategien für keramische Bauteile. In: TASK Aachen (Hrsg.): Strukturkeramik I, Werkstoffe, Technologien, Anwendungen. TASK Aachen 1992.

VERLEMANN 1994

VERLEMANN, E.: Prozeßgestaltung beim Hochgeschwindigkeits-schleifen von Ingenieurskeramik. Aachen: Shaker 1994.

VIT 1997

VIT : Ventilloses Keramikpumpe für aggressive und abrasive Medien. Maschinenmarkt 103 (1997) 23, S.81.

WARNECKE 1994

WARNECKE, G.: Schleifen von Hochleistungskeramik. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik –Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

WARNECKE 1996

WARNECKE, G.: Bauteil und Prozeßgestaltung als ganzheitliche Aufgabe beim Einsatz keramischer Werkstoffe. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bearbeitung neuer Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (VDI-Berichte 1276).

WARNECKE & ROTH 1990

WARNECKE, G.; ROTH, H.-P.: Komplettbearbeitung Verfahrensteilung - ein neues Planungsverfahren zur Optimierung. wt Werkstatttechnik 80 (1990), S. 667-671.

WARNECKE & WIMMER1994

WARNECKE, G.; WIMMER, J.: Strategien zur bearbeitungsgerechten Werkzeugvorbereitung und –auswahl beim Schleifen von Hochleistungskeramik. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik –Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

WARNECKE U. A. 1994A

WARNECKE, G. U. A.: Schleifen von Hochleistungskeramik. Köln: TÜV Rheinland 1994.

WARNECKE U. A. 1994B

WARNECKE, G. U. A.: Aufgabengerechte System- und Prozeßauslegung beim Schleifen von Hochleistungskeramik. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik –Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

WECK & MARPERT 1996

WECK, M.; MARPERT, M.: Anforderungen neuer Werkstoffe an die Werkzeugmaschine. VDI-Z 139 (1997) 4, S.22-26.

WEINGRABER & ABOU-ALY 1989

WEINGRABER, H. V.; ABOU-ALY, M.: Handbuch Technische Oberflächen. Braunschweig: Vieweg, 1989.

WEMHÖNER 1994

WEMHÖNER, J.: Wälzlager aus Hochleistungskeramik: Schleiftechnik für Fortgeschrittene. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik – Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

WEMHÖNER 1996

WEMHÖNER, J.: Wälzlager aus Hochleistungskeramik. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Bearbeitung neuer Werkstoffe. Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (VDI-Berichte 1276).

WESTKÄMPER U. A. 1994

WESTKÄMPER, E. U. A.: Rationelle Feinbearbeitung von Hochleistungskeramik. In: Warnecke, G. (Hrsg.): Schleifen von Hochleistungskeramik –Ergebnispräsentation des BMFT-Verbundprojektes. Kaiserslautern: Eigenverlag der Universität Kaiserslautern 1994.

WESTKÄMPER & GÄBLER 1996

WESTKÄMPER, E.; GÄBLER, J.: Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften beim Läppen und Polieren von Keramikbauteilen. In: Werkstoffe für die Fertigungstechnik. Werkstoffwoche 96, Symp.5, Stuttgart. Frankfurt: Informationsges. 1996.

WIEBACH 1988

WIEBACH, H. G.: Statische Kostenrechnungsverfahren für Zerspanvorgänge im Fahrzeug-Aggregatebau. Werkstatt und Betrieb 121 (1988) 3, S. 225-228.

WIMMER 1995

WIMMER, J.: Konditionieren hochharter Schleifscheiben zum Schleifen von Hochleistungskeramik. Warnecke, G. (Hrsg.) Kaiserslautern 1995. (Forschungsberichte 18).

WINTER 1993

WINTER, E.& SOHN: Schleiftechnisches Handbuch. Essen: Vulkan-Verlag 1993.

WOBKER 1990

WOBKER, H.-G.: Schleifen keramischer Werkstoffe (Teil II). Magazin Neue Werkstoffe (1990) 3, S. 11-16.

WOBKER 1997

WOBKER, H.-G.: Hartbearbeitung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997 (VDI-Berichte 420).

WOLTERS 1996

WOLTERS, P.: Feinschleifen kann für schwer zu schleifende Werkstoffe die Lösung sein. Tooling and Produktion 62 (1996) 3, S. 45-46.

ZINS 1998

ZINS, M.: Nachbearbeiten möglichst meiden. Industrieanzeiger 5 (1998), S. 50-51.

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spannenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmaß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wrbas, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschränkungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung · ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schrüfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationalen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helml, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayer, R.*
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringereinrichtungen
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrierobotereinsatzes
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woенckhaus, Ch.*
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelman, F.*
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer
flexiblen Fertigung
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozessmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*
Technologisches Prozessmodell für die
Kugelschleifbearbeitung
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionszellen
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deuschle, U.*
Prozessorientierte Organisation der Auftragsentwicklung
in mittelständischen Unternehmen
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und
variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen -
Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit
3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in
Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60598-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver
Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und
integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und
rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der
Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement
unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen
variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte
Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch
Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für
maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in
produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche
und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur
Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische
Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und
Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung
ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und
Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter
Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehrer, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit
Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von
hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur
herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-
Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Plöb, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei
Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iw b sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 15 **Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 **Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation**
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 **Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion**
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 122 Burghard Schneider
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Bernd Goldstein
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · 65 Abb. · 1999 · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Helmut E. Mößmer
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
156 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Ralf-Gunter Gräser
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Hans-Jürgen Trossin
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Doris Kugelmann
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
158 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Rolf Diesch
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · 69 Abb. · 1999 · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Werner E. Lulay
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
170 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Otto Murr
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Michael Macht
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Bruno H. Mehler
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbindungen
152 Seiten · 44 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Knut Heitmann
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Stefan Blessing
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · 1999 · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Can Abay
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · 2000 · ISBN 3-89675-697-4

