

Joachim Schmid

*Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern*

Joachim Schmid

*Beitrag zum automatisierten
Bearbeiten von Keramikguß
mit Industrierobotern*

Herausgegeben von
Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,
Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Carl Hanser Verlag München Wien

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	06. 05. 1991
Tag der Promotion:	21. 06. 1991
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. K. Meyer-Wegener
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Schmid, Joachim:

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguss
mit Industrierobotern / Joachim Schmid. Hrsg. von
Klaus Feldmann. - München; Wien; Hanser 1991
(Fertigungstechnik - Erlangen; 20)
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1991
ISBN 3-446-16560-6

NE: GT

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle - , reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Carl Hanser Verlag München, Wien 1991
Herstellung: Copy Center 2000, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg.

Dem Leiter des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, danke ich für die Anregung zu diesem Thema und für die großzügige Förderung der Forschungen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm, Leiter der selbständigen Abteilung für Maschinenelemente und fertigungsgerechtes Konstruieren der Universität Erlangen-Nürnberg, bin ich für seine Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats sehr verbunden.

Der Firma Hoechst CeramTec AG in Selb, besonders deren Technischen Vorstand, Herrn Dr. rer. nat. W. Weber, und dem damaligen Leiter der Abteilung Fertigungstechnik, Herrn Dipl.-Ing. B. Lorenz, aber auch allen beteiligten Mitarbeitern danke ich für die Förderung des Projekts und für die vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Weiter gilt mein Dank allen Kollegen für ihre Mithilfe und Diskussionsbereitschaft, insbesondere Herrn Dr.-Ing. G. Kleineidam für die technische und organisatorische Unterstützung im CAD-Bereich, Herrn Dipl.-Ing. M. Steber für die vielfältigen fachlichen und gestalterischen Anregungen sowie ihm und Herrn Dipl.-Ing. W. Blöchl für die gründliche Durchsicht des Manuskripts.

Ein herzlicher Dank sei ferner den Mitarbeitern der Versuchswerkstatt des Lehrstuhls sowie allen Studenten ausgesprochen, die durch ihre engagierte Mitarbeit zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Eine namentliche Nennung einzelner würde den Beitrag der anderen schmälern.

Nicht zuletzt aber möchte ich auch meinen Eltern danken, die mir meine Ausbildung ermöglicht haben, und ganz besonders herzlich meiner Frau für ihre vielfältige Unterstützung und ihr Verständnis während der zurückliegenden Zeit.

Inhalt

Abkürzungen	iv
Formelzeichen	iv
Indices	vi
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
1.3 Begriffsdefinitionen	5
2 Ausgangssituation	9
2.1 Herstellung und Bearbeitung von Keramik	9
2.1.1 Schlickergießen	10
2.1.2 Verputzen der Formlinge	12
2.1.3 Brennen und Hartbearbeitung	13
2.2 CAD/CAM in der keramischen Industrie	15
2.3 Automatisiertes Entgraten von Gußteilen	17
3 Werkstück- und Systemanalyse	19
3.1 Schwindung und Verzug von Keramik	19
3.2 Eigenschaften von Keramik bei der Weichbearbeitung	24
3.3 Geometrische Merkmale von Schlickerguß-Erzeugnissen in der Ingenieurkeramik	29
3.4 Qualitätsmerkmale und Grateigenschaften	34
3.5 Form- und Maßhaltigkeit	38
3.6 Anforderungsprofil an das Verputzsystem	45
4 Auswahl von Verputzverfahren	48
4.1 Verfahrensalternativen beim Entgraten	48
4.2 Verfahrensauswahl für das Entgraten	50

4.3	Verfahrensalternativen beim Verschwämmen	54
4.4	Verfahrensauswahl für das Verschwämmen	56
5	Experimentelle Untersuchung der gewählten Verfahren	59
5.1	Versuchsaufbau und Werkzeuge	59
5.2	Grundlegende mechanische Betrachtungen am Entgratwerkzeug	62
5.2.1	Einfluß der Umlenkrollen	62
5.2.2	Auslenkung und Längenänderung des Drahtes infolge Zustellbewegung	64
5.2.3	Äußere Kräfte am Schabdraht	66
5.2.4	Biegelinie des Schabdrahtes	68
5.2.5	Druckspannung an der Berührstelle Draht - Werkstück	71
5.3	Erprobung des Drahtschabens	75
5.3.1	Grundsätzliche Eignung, Bearbeitungsqualität	75
5.3.2	Verfahrensparameter	76
5.3.3	Geschwindigkeiten und Bearbeitungszeiten	81
5.3.4	Abtragsvorgang	82
5.4	Erprobung des Verschwämmwerkzeugs	88
5.4.1	Schwammauswahl	88
5.4.2	Verfahrensparameter	90
5.5	Anforderungen an die Programmierung des Handhabungsgeräts	93
5.6	Anforderungsprofil an Verfahren zum Toleranzausgleich	95
6	Möglichkeiten zur Toleranzkompensation	97
6.1	Kompensationsstrategien	99
6.1.1	Passiver Toleranzausgleich	99
6.1.2	Werkstück-Vorvermessung	100
6.1.3	Online-Bahnregelung durch Konturerfassung	102
6.1.4	Technologie-Adaption	105
6.2	Mögliche Wirkprinzipien für Sensoren in der Keramikproduktion	105
6.2.1	Eindimensionale Abstandssensoren	105
6.2.2	Zweidimensionale Sensoren	106
6.2.3	Mehrdimensionale Sensoren	107
6.2.4	Auswertung von Technologiedaten	107

6.3	Konzeptauswahl	109
6.4	Ausführung des gewählten Systems	112
6.4.1	Werkzeug-Endlagenüberwachung	113
6.4.2	Werkstück-Vorvermessung	114
6.4.3	Rückführung der Werkzeugauslenkung und Technologiewert- Adaption	115
6.5	Erprobungsergebnisse	120
7	Rechnerunterstützung in der Schlickergußproduktion	124
7.1	Forderungen an ein CAD/CAM-Konzept	124
7.2	Konstruktion von Keramik-Freiformteilen mit einem 3D-CAD-System	126
7.2.1	Grundkonzept	126
7.2.2	Variantenmodul zur 3D-Modellierung von Tauchformen	127
7.2.3	Modellierung der Werkstück-Geometrie	130
7.3	Einbindung von Formenbau und Putzerei in eine CAD/CAM- Verfahrenskette	136
7.3.1	Grundkonzept	136
7.3.2	Programmierung von Verputzrobotern	140
7.3.3	Offline-Programmierung	142
7.3.4	Zusammenfassende Bewertung	146
8	Anwendungsbeispiele	148
8.1	Verputzen von Tauchformen	149
8.2	Entgraten von Bauteilen für Verbrennungsmotoren	151
9	Zusammenfassung und Ausblick	155
10	Schrifttum	158

Abkürzungen

AV	Arbeitsvorbereitung
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CASE	Computer Aided Software Engineering
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control
DNC	Direct Numerical Controlled
IR	Industrieroboter
NC	Numerical Control
PI	Regler mit Proportional- und Integralkomponente
PID	Regler mit Proportional-, Integral- und Differentialkomponente
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RC	Robot Control
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Tool Center Point
VDA/FS	Flächenschnittstelle des Verbands Deutscher Automobilhersteller

Formelzeichen

a	Stützpunktabstand
a_x	Länge der Druckellipse
A	Schwindungsaufmaß, Querschnittsfläche
b	Breite der Bearbeitungsspur
c	Rißlänge
d	Durchmesser, Wandstärke
e	Exzentrizität der Druckellipse
E	Elastizitätsmodul
E(e)	LEGENDRESches Integral zweiter Gattung
f	Zustelltiefe
F	Kraft
G	Schubmodul
h	Höhe
J	Flächenträgheitsmoment
K	Schwindungskonstante, Integralfaktor

K(e)	LEGENDRESches Integral erster Gattung
K_c	kritischer Spannungsintensitätsfaktor
l, L	Länge
m	Masse, WEIBULL-Modul, Steigung
M	Abkürzung für $ MS = \sqrt{a^2/4 + (f - r_w)^2}$
M	Moment
p	Flächenpressung
P	Abkürzung für $\sqrt{F_{\delta x}} / (E \cdot l)$
Q	Abkürzung für $F_{\delta y} / F_{\delta x}$
Q	Effektive Verdampfungsenthalpie
r	Radius, Gratscheitelradius
R	Allgemeine Gaskonstante, Oberflächenkrümmungsradius
s	Verschiebung, Abstand
S	Schwindung, Standardabweichung
t	Zeit
T	Temperatur
T_t	Totzeitkonstante
U	Spannung
v	Geschwindigkeit
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
w	Wasserezulauftrate
x	Position in Richtung der x-Koordinate
y	Position in Richtung der y-Koordinate
Y	Geometriefaktor für Reißspannungen
z	Position in Richtung der z-Koordinate
α	Auslenkwinkel
β	Hilfswinkel
γ	Korngrenzenenergie, Hilfswinkel
Γ	Kompensationswinkel
δ	relativer Steigungswinkel
Δ	Differenz
ϵ	Dehnung
μ	Querkontraktionszahl, Reibungszahl
σ	(Zug-, Biege-) Spannung
ϑ	Deformationskonstante
τ	Zeitkonstante
Φ	Packungsdichte
Ψ	Integrationsbereich der LEGENDRESchen Funktionen

Indices

0	Ausgangswert
1	Körper 1, Punkt 2
2	Körper 2, Punkt 2
3	Punkt 3
b	Biegung
B	Band
Dr	Draht
Ges	Gesamt
i	Platzhalter für Kenn-Nummer
k	korrigierbar, Korrektur
max	Maximum
min	Minimum
M	Messung, gemessen
n	in Normalenrichtung
P	Programm
Q	quer
r	Reaktion
R	Rolle, Reibung, Roboter
Ref	Referenz
S	Vorspannung, Schnittstelle
W	Werkstück
x	in x-Richtung
y	in y-Richtung
z	in z-Richtung
zul	zulässig

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Keramik ist einer der ältesten Werkstoffe in der Geschichte der Menschheit und auch heute noch von großer Bedeutung. Dies liegt nicht nur an den reichlich verfügbaren und preisgünstigen Rohstoffen, sondern darüber hinaus an den besonderen Eigenschaften keramischer Werkstoffe. Für Anwendungen im technischen Bereich besitzen sie insbesondere wegen ihrer großen Härte und Verschleißfestigkeit, der hohen chemischen und Wärmebeständigkeit, des verhältnismäßig geringen spezifischen Gewichts sowie der breiten Palette unterschiedlicher elektrischer und thermodynamischer Eigenschaften eine erhebliche Bedeutung.

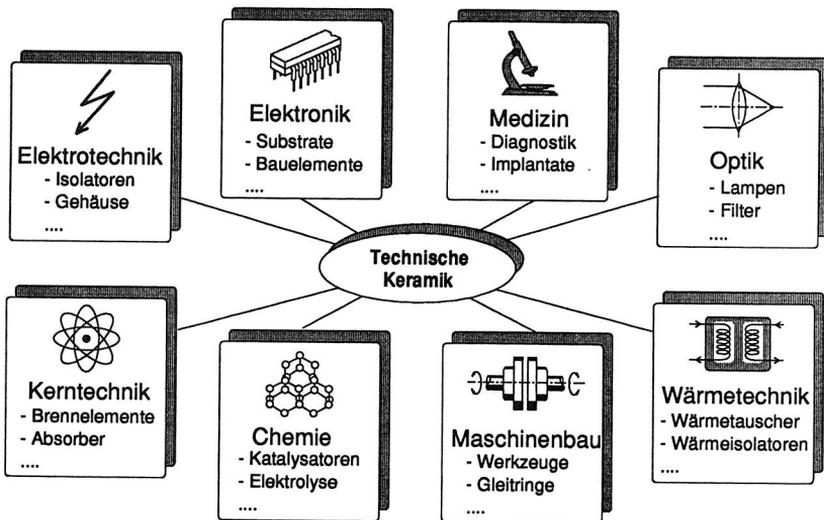


Bild 1: Anwendungsbereiche technischer Keramik

Keramikerzeugnisse für technische Anwendungen haben sich in jüngerer Zeit neben ihren vorwiegend in der Elektro- und Verfahrenstechnik liegenden klassischen

Einsatzbereichen etliche neue Märkte erschlossen (Bild 1). Teilweise wird dies durch werkstofftechnologische Fortschritte ermöglicht (unter anderem bei Keramikwerkzeugen für die spanabhebende Metallbearbeitung), teilweise bedingen gestiegene Anforderungen die Substitution anderer Werkstoffe (zum Beispiel bei tribologisch stark beanspruchten Bauteilen oder in Verbrennungskraftmaschinen), teilweise kommen völlig neue Anwendungsbereiche hinzu (so etwa Trägersubstrate für elektronische Schaltungen).

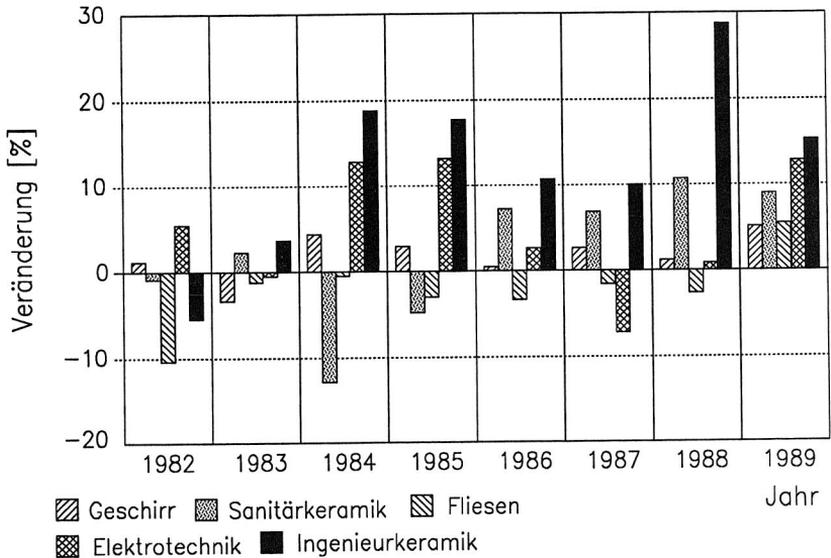


Bild 2: Umsatzveränderung der feinkeramischen Industrie in der Bundesrepublik Deutschland [1, 2]

Der Bereich der technischen Keramik hat demzufolge in den vergangenen Jahren überdurchschnittliche Zuwachsraten gezeigt (Bild 2). Ein wichtiger Umsatzträger mit weiteren Wachstumserwartungen für die Zukunft ist dabei die Herstellung von Hohlkörpern mit Freiformflächen nach dem Schlickergußverfahren. Derartige Teile sind vor allem in Verbrennungskraftmaschinen (Bild 3) sowie als Tauchformen für die Herstellung von Gummierzeugnissen anzutreffen.

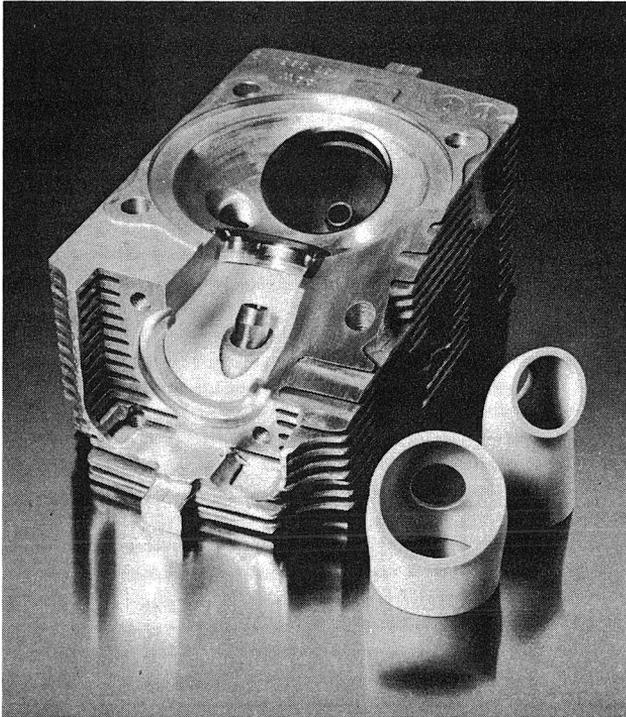


Bild 3: Abgaskanalauskleidungen ("Portliner") für Verbrennungsmotoren
(Werkbild Feldmühle AG, Plochingen)

In letzter Zeit sieht sich die keramische Industrie nun auch im Bereich der Ingenieurkeramik einer schärfer werdenden internationalen Konkurrenz ausgesetzt. Neben der Produktqualität ist auch die Qualität der Fertigung hinsichtlich Kosten, Flexibilität und Lieferzeit zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor geworden.

Die konventionellen Arbeitsweisen und Produktionsmittel in der Schlickergußherstellung lassen jedoch keine signifikante Steigerung ihrer Effektivität mehr erwarten. Ein strategischer Ansatz zur Verbesserung der Produktion ist es, durch eine ganzheitliche Betrachtung und Weiterentwicklung der Fertigungssegmente im Sinne eines CIM-Konzepts den Material- und Informationsfluß innerhalb der Werke zu verbessern

und dadurch zu Kosten-, Qualitäts- und Durchlaufzeitvorteilen zu gelangen (Bild 4) [10, 11]. Diese Anpassung historisch gewachsener Strukturen muß von der Einführung neuer Technologien in Entwicklung, Arbeitsvorbereitung, Produktion und Qualitätswesen begleitet werden, um eine echte Durchgängigkeit der Verfahrensketten zu erreichen und das Rationalisierungspotential voll auszuschöpfen [12].

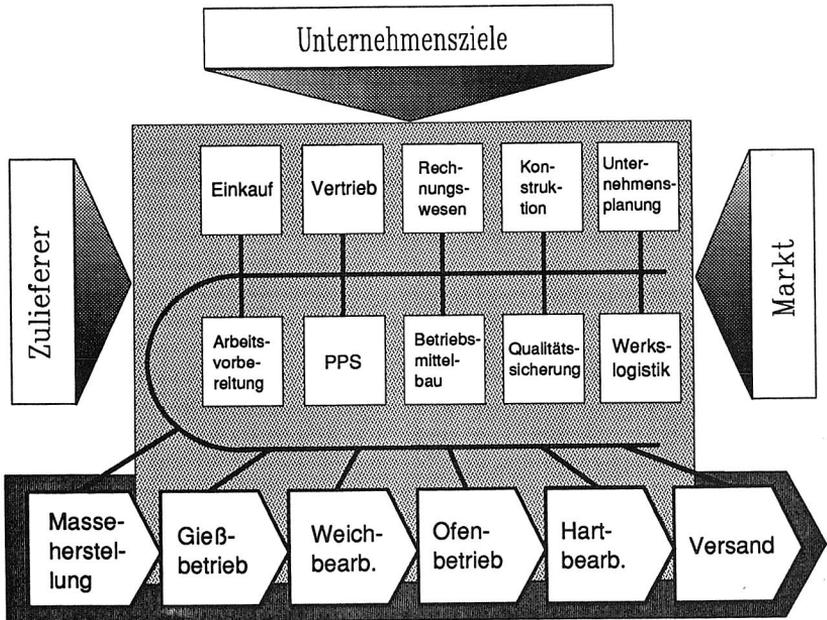


Bild 4: Die keramische Fabrik der Zukunft

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Eine Mechanisierung des Verputzens von Keramik-Werkstücken ist aus wirtschaftlicher Sicht, zur Humanisierung der Arbeitsplätze in der Putzerei und zur Sicherung einer konstanten Qualität auf hohem Niveau erwünscht. Bei den vorherrschenden kleinen bis mittleren Losgrößen liegt der Einsatz von Industrierobotern für diese

Aufgabe aus verschiedenen Gründen nahe [13]. Dies sind die hohe Flexibilität dieser Geräte, ihre damit einhergehende gute Anpassungsfähigkeit an unterschiedlichste Werkstücke sowie der im Vergleich zu Sondermaschinen relativ geringe Investitionsaufwand [14].

Ziel der vorliegenden Arbeit soll es sein, Wege für einen erfolgreichen Einsatz von Industrierobotern zum flexibel automatisierten Verputzen von Schlickerguß-Erzeugnissen für Anwendungen in der Ingenieurkeramik aufzuzeigen. Hierfür ist zunächst das Werkstückspektrum auf seine Eigenschaften hin zu untersuchen. Nach der Ermittlung der qualitätsbestimmenden Kenngrößen kann dann ein Anforderungsprofil an das Verputzverfahren definiert werden. Die Untersuchung und Bewertung der möglichen Verputzverfahren soll Anhaltspunkte für eine problemadäquate Verfahrensauswahl anhand der aufgestellten Kriterien liefern. Die ausgewählten Verfahren sind experimentell weiter zu verifizieren. Ferner sollen Methoden zur Kompensation von Werkstück- und Aufspanntoleranzen entwickelt sowie Ansätze zur Realisierung technologiespezifischer durchgehender Verfahrensketten mit Rechnerunterstützung aufgezeigt werden.

1.3 Begriffsdefinitionen

Keramik ist im deutschen Sprachgebrauch die Sammelbezeichnung für eine Gruppe anorganischer, nichtmetallischer Werkstoffe mit zu wenigstens 30 % kristallinem Gefüge, die durch thermisches Sintern eines Stoffgemenges bzw. durch Stoffumwandlung unter Temperatureinwirkung (*Brennen*) ihre Gebrauchseigenschaften erhalten [15].

Der Bereich der technischen Keramik, auch *Industriekeramik* genannt, läßt sich gliedern in *Funktionskeramik*, bei der es im wesentlichen auf eine physikalische Funktion des Bauteils ankommt (zum Beispiel elektrische Isolation oder magnetische Anziehung), und *Konstruktionskeramik* oder *Strukturkeramik*, bei der die mechanische Belastung des Bauteils im Vordergrund steht [16]. Der Ausdruck *Ingenieurkeramik* wird nicht ganz einheitlich gebraucht; hier soll der in [17] angegebenen

Definition gefolgt werden, welche darunter "Keramik für den ingenieurmäßigen Einsatz, insbesondere in Maschinenbau und Elektrotechnik" versteht. Dies entspricht dem in den USA verwendeten Ausdruck *Engineering Ceramics*.

Mit *Feinkeramik* werden im Unterschied zur *Grobkeramik* Keramiken bezeichnet, deren mittlere Korngröße und mittlere Porengröße unter 0,1 mm liegt [16]. Im Unterschied hierzu hebt der englische Ausdruck "fine ceramics", wie ihn vor allem die japanischen Hersteller verwenden, zusätzlich auf eine Gütesteigerung gegenüber herkömmlicher Keramik ab, meint also insbesondere die Ingenieurkeramik [18].

Hinsichtlich der Klassifizierung von Keramik nach ihrem Verwendungszweck sei auf [19] verwiesen. Eine Einteilung nach der Werkstoffcharakteristik führt zu vier Hauptgruppen [17, 20]:

1. *Silikatkeramik* (Kennzeichen: hoher Glasphasenanteil)
2. *Oxidkeramik* (glasphasenarm)
3. *Nichtoxidkeramik*
4. *Verbundwerkstoffe* mit keramischer Matrix

In der Regel werden die Keramik-Rohstoffe zu ihrer Verarbeitung und Formung mit Wasser zu einer plastischen bis flüssigen Rohmasse, dem sogenannten *Schlicker*, aufbereitet. Die Rezeptur des Werkstoffs nennt man *Versatz* (dieser Ausdruck darf nicht mit einer Verlagerung im geometrischen Sinne verwechselt werden, wie etwa dem noch zu besprechenden Formversatz). Die feste Masse, welche sich beim Aushärten des Schlickers durch Wasserentzug bildet, heißt *Scherben*. Nach dem Wassergehalt lassen sich verschiedene Werkstoffzustände unterscheiden. In der ersten Trocknungsphase, wo der Scherben noch plastisch-weich ist, wird er als *lederhart* bezeichnet. Mit fortschreitender Trocknung verfestigt sich die Masse weiter, bis ein fester, spröder Zustand erreicht ist, der die Bezeichnung *weißtrocken* trägt. *Grün* ist eine traditionelle Sammelbezeichnung für den festen bzw. halbfesten Werkstoffzustand vor dem Brennen und umfaßt sowohl lederhart als auch weißtrocken. Ungebrannte Keramikteile werden dementsprechend *Grünling* oder *Formling* genannt.

Entsprechend der besonderen Rolle des Brennens und der damit verbundenen tiefgreifenden Werkstoffumwandlung wird bei der Keramikproduktion zwischen der sogenannten *Grün- oder Weichbearbeitung*, also Produktionsschritten am ungebrannten Formling, der *Weißbearbeitung* nach einem verfestigenden Vorbrand und der *Hartbearbeitung*, also nach dem Brand, unterschieden [21]. Die Grünbearbeitung im engeren Sinne dient dem Herausarbeiten der gewünschten Werkstückgeometrie aus einem lederharten Formling einfacher Gestalt, dem *Hubel*. Im weiteren Sinn umfaßt sie alle nicht unmittelbar dem Urformen zuzurechnenden Vorgänge bei der Formgebung. Hierzu gehört neben dem Nachbearbeiten der Formlinge auch das *Garnieren*, mit dem in der Keramikproduktion das Zusammenfügen mehrerer Einzelteile in ungebranntem Zustand gemeint ist.

Viele Begriffe aus der allgemeinen Gießertechnik sind auch in der Keramikindustrie üblich bzw. sollen der Klarheit und Einheitlichkeit halber auch für die Darstellung von Zusammenhängen bei der Bearbeitung von Werkstücken aus Keramik verwendet werden. Ein *Grat* ist ein Werkstoffgebilde, das an Kanten oder auf der Oberfläche von Werkstücken bei deren Fertigung entsteht und über die ideale Werkstückoberfläche hinausragt [22]. Seine Geometrie wird durch das *Gratquerschnittsprofil* und

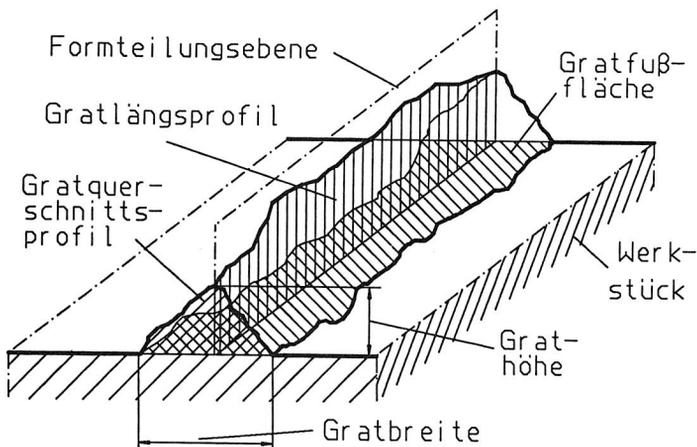


Bild 5: Bezeichnungen für Gratmerkmale

das *Gratlängsprofil* definiert (Bild 5). Diese Profile werden zum Werkstück durch den *Gratfuß* begrenzt. Die *Gratfußfläche* ist die theoretisch ideale Begrenzungsfläche des Werkstücks im Gratbereich. Die *Gratbreite* sei die Breite des Gratfußes, die *Grathöhe* der im Gratquerschnittsprofil gemessene größte Abstand zwischen dem Gratfuß und der Gratquerschnittskontur [14].

Von der Gratbildung ist die Auswirkung des *Formversatzes* deutlich abzugrenzen. Man versteht darunter eine durch fehlerhaftes Zusammensetzen einer Gieß- oder Preßform entstandene Verschiebung der Hälften der Form zueinander. Dies führt in der Trennebene zur Entstehung einer Stufe am Werkstück (Bild 6).

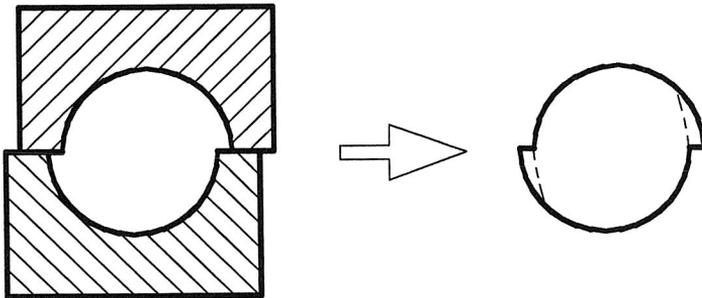


Bild 6: Auswirkung von Formversatz

Entgraten ist ein Arbeitsgang mit dem Ziel, aus funktionellen, ergonomischen oder ästhetischen Gründen störende Grate an Werkstücken zu entfernen. Unter *Putzen* versteht man alle Arbeiten an einem ausgeformten Gußstück mit dem Ziel der Beseitigung von verfahrensbedingten Werkstoffzugaben und Unregelmäßigkeiten der Werkstückgeometrie [23]. Hierzu gehört beim *Rohputzen* das Abtrennen von Einläufen usw., aber auch das Richten, das Entgraten und die Egalisierung von Formversatz. *Feinputzen* ist eine anschließende Behandlung der Gußstücke zur Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit.

2 Ausgangssituation

2.1 Herstellung und Bearbeitung von Keramik

Die Keramikindustrie wird bis heute von der langen handwerklichen Tradition bei der Verarbeitung dieses Werkstoffs geprägt. Auch große Unternehmen sind meist in Betriebe mittelständischen Charakters mit produktorientierten Arbeits- und Organisationsstrukturen gegliedert. Der Automatisierungsgrad ist sehr unterschiedlich und liegt insgesamt gesehen deutlich unter dem der meisten anderen Industriezweige. Noch heute machen die Personalkosten in der Regel mehr als die Hälfte der gesamten Herstellungskosten aus. Flexible Automatisierungslösungen sowie mehrere Verfahrensschritte übergreifende, durchgängige Konzepte sind selten.

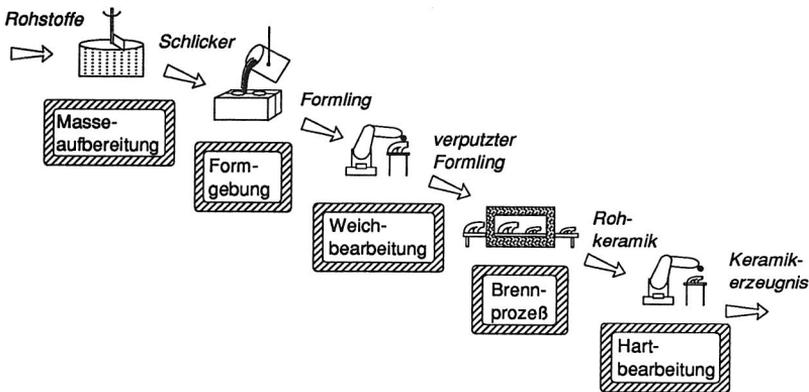


Bild 7: Die hauptsächlichen Prozessstufen der keramischen Technologie

Der Herstellungsprozeß von Keramikartikeln umfaßt vier wesentliche Prozessschritte: **Aufbereitung der Rohstoffe, Formgebung, Brennen** sowie **Hartbearbeitung** (Bild 6). Die **Weichbearbeitung** wird üblicherweise der Formgebung zugerechnet.

Für die keramische Formgebung steht eine ganze Reihe von Verfahren zur Verfügung. Ihre Auswahl hängt von der Gestalt des Werkstücks, der geforderten Ge-

nauigkeit und den zu fertigenden Stückzahlen ab. Hauptsächlich konkurrieren verschiedene Dreh- und Präßverfahren sowie das Schlickergießen. Für Teile, die anders nicht hergestellt werden können, finden spanende Verfahren Anwendung.

2.1.1 Schlickergießen

Die Technik des Schlickergusses zur Herstellung keramischer Hohlkörper beliebiger - auch unregelmäßiger - Geometrie mit konstanter Wandstärke ist bereits seit über zweihundertfünfzig Jahren bekannt, fand aber erst Ende des vergangenen Jahrhunderts in größerem Umfang Anwendung [24]. Neben technischen Keramikartikeln und Sanitärware werden auf diese Weise hauptsächlich Zierfiguren und un rundes Geschirr gefertigt. Hauptmerkmal des Verfahrens ist, daß der Schlicker in geteilte, wiederverwendbare Hohlformen aus hygroskopischem Werkstoff (in der Regel Gips) gegossen wird. Das Material der Form entzieht dem eingegossenen Schlicker das Wasser, so daß dieser von der Formwandung her allmählich aushärtet. Die Verweildauer des Schlickers in der Form bestimmt die Wandstärke des Scherbens. Nach dem Abkippen des noch nicht ausgehärteten Schlickerrests und einer Trockenphase kann der Formling in lederhartem Zustand entnommen werden (Bild 8).

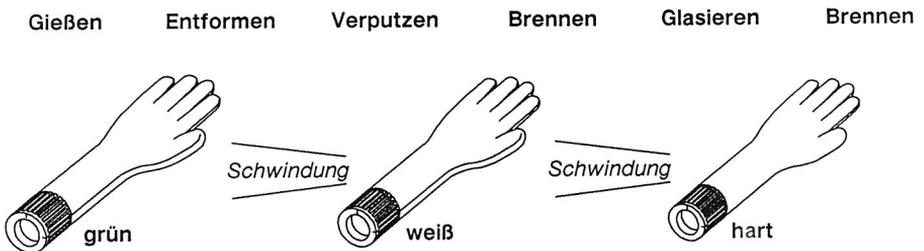


Bild 8: Arbeitsgangfolge und Werkstoffzustände beim Schlickergießen

Gießt man über einen längeren Zeitraum ständig Schlicker nach, so können massive Körper hergestellt werden (*Vollguß*), bei Einsatz fester Gipskerne auch Hohlkörper

ungleichmäßiger Wandstärke (*Kernguß*). Dieses Vorgehen findet seine Grenzen aber in der Reißfestigkeit des Schlickers beim trocknungsbedingten Schwinden sowie in der mit der Scherbanddicke rasch zunehmenden Gießzeit.

Die Technologie des Schlickergusses unterscheidet sich wesentlich vom Urformen von Metallen oder Kunststoffen. Für den Gießvorgang entstanden deshalb speziell ausgelegte Fertigungseinrichtungen. Je nach den zu fertigenden Stückzahlen werden manuell bediente Gießkarussells eingesetzt oder bei größeren Stückzahlen weitgehend automatisierte Gießlinien, bei denen die Gießformen auf einem Längsfördersystem die einzelnen Arbeitsschritte durchlaufen (Bild 9). Diese erreichen Leistungen von bis zu 1200 Gießvorgängen pro Schicht. Auch bei derartigen Anlagen erfolgt jedoch das Zusammenstellen der Gießformen und das Entnehmen der fertigen Formlinge manuell, da sich diese Vorgänge bisher noch nicht automatisieren ließen.

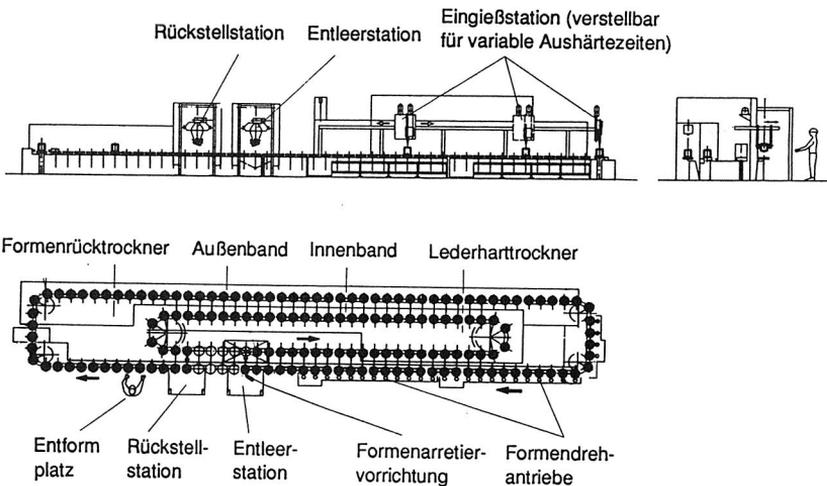


Bild 9: Weitgehend mechanisierte Schlickergießanlage (Werkbild Maschinen- und Stahlbau J. Lippert GmbH & Co. KG, Pressath)

Auch beim Schlickergießen kommt mitunter als zusätzlicher Formgebungsschritt eine spanende Bearbeitung des Formlings vor, um durch Gießen nicht bzw. nicht hin-

reichend genau herstellbare Geometrieelemente auszuarbeiten. Hierfür kommen meist Dreh- und Fräsmaschinen mit Hartmetall-Werkzeugen zum Einsatz. Neben Kopiersteuerungen ist hier die CNC-Technik bereits weit verbreitet.

2.1.2 Verputzen der Formlinge

Das Verputzen der gegossenen Formlinge besteht aus mehreren Teilverrichtungen. Zunächst wird mit einem mechanischen Werkzeug der Grat entfernt und sonstige Oberflächenunebenheiten beseitigt (*Trockenbearbeitung*). Diese Tätigkeit kann dem Rohputzen zugeordnet werden. Anschließend erfolgt in vielen Fällen eine Oberflächen-Nachbehandlung mit einem feuchten Schwamm. Dieses *Verschwämmen* gehört zum Feinputzen und hat entscheidende Auswirkung auf die Oberflächenqualität. Auch das Garnieren wird in der Regel in der Putzerei vorgenommen.

Das Verputzen und Garnieren erfolgt in vielen Fällen nach wie vor manuell mit einfachsten Werkzeugen (Schabemesser, Handschwamm). Automatische Fertigungsmittel sind weitgehend auf die Bearbeitung von Fliesen, Sanitär- und Geschirrkераmik in größeren Serien beschränkt, wobei es für jede Bearbeitungsaufgabe und Teileart besondere Maschinen gibt. Für das Entgraten werden Schleifscheiben bzw. -bänder mit SiC-Korn-Beschichtung oder aus Schleifvlies verwendet. Das Verschwämmen erfolgt mit Walzen oder Bändern aus Schaumstoffen (Bild 10). Gemeinsames Kennzeichen aller Systeme ist die Tatsache, daß sie nur für Werkstücke mit im mathematischen Sinn stetiger Oberfläche ohne Hinterschneidungen geeignet sind. Durch die enge Verbindung zwischen Wirkprinzip und Werkstückgestalt und wegen des aufwendigen Rüstvorgangs ist ihre Flexibilität eingeschränkt. Maschinen mit CNC-Steuerungen werden angeboten, haben sich aber noch nicht durchsetzen können. Da sie in ihrer Bauart eng an die üblichen mechanisch gesteuerten Verputzmaschinen angelehnt sind, ermöglichen sie keine nennenswerte Erweiterung des Einsatzspektrums.

Die Verwendung von Industrierobotern wurde in der keramischen Industrie schon für verschiedene Arbeiten erprobt [25]. Zum weiter unten angesprochenen Glasieren

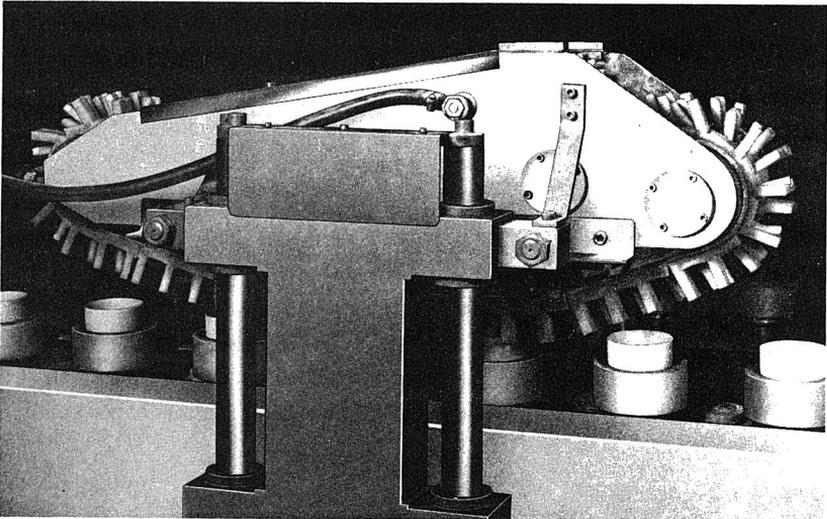


Bild 10: Sondermaschine zum Verschwämmen von Tassen (Werkbild Maschinenfabrik H. Zeidler GmbH & Co. KG, Selb)

befinden sich etliche Geräte im Einsatz [26]. Beim Entgraten und Garnieren sind hingegen noch keine erfolgreichen Anwendungen bekannt geworden. Vereinzelt beschriebene sensorgeführte Robotersysteme mit werkstückspezifischer Kinematik [27] sind nicht zum Dauerbetrieb gelangt. Trotz des offenkundigen Automatisierungsdefizits wird die Grünbearbeitung von Keramik auch forschungsmäßig nicht in nennenswertem Umfang verfolgt. Soweit bekannt gibt es Arbeiten mit fertigungstechnischer Thematik nur für den Bereich der Hartbearbeitung.

2.1.3 Brennen und Hartbearbeitung

Nach dem Formgebungs- und Trocknungsprozeß besteht zwischen den einzelnen Teilchen eines Grünlings nur eine geringe Haftung durch physikalische Effekte. Erst bei Temperaturen, die ein Sintern ermöglichen, also beim Brennen, entsteht eine stoffliche Bindung.

Die Reaktionen beim keramischen Brand sind ziemlich kompliziert. Ihre detaillierte Beschreibung würde hier zu weit führen (sehr gute Darstellungen finden sich in [28, 29]). Es soll der Hinweis genügen, daß der Brennprozeß in der Regel unter mehrstufigen Gefügeumwandlungen abläuft, wobei neben einer Dehydratation der Grünmasse und dem eigentlichen Sinterungsvorgang meist auch noch chemische Reaktionen einiger Versatzkomponenten auftreten. Um diese Vorgänge optimal zu steuern, muß während des mehrere Stunden dauernden Brennens ein bestimmtes Temperatur-Zeit-Profil gefahren werden, welches den Reaktionen in den einzelnen Brennphasen angepaßt ist. Häufig wird der Brennprozeß in mehrere Teilschritte, zum Beispiel bei Porzellan ein Glühbrand bei rund 900 °C und ein Glattbrand bei 1300-1450 °C, unterteilt. Neben dem Temperatur-Zeit-Profil stellt auch die Zusammensetzung der Ofenatmosphäre eine wichtige Einflußgröße auf das Brennergebnis dar.

Zum Erzielen bestimmter Oberflächeneigenschaften kann vor dem Brennen oder zwischen den Brennphasen eine Glasur aufgetragen werden. Der Auftrag erfolgt je nach Glasur und Werkstück durch Eintauchen, Begießen oder Aufspritzen. Die Glasur schmilzt beim Brennen auf und überzieht das Werkstück mit einer gleichmäßigen Schicht, wobei sie im Grenzbereich eine innige chemische Verbindung mit dem Scherben eingeht.

Die Hartbearbeitung hat bei den meisten gebrannten Keramiken wegen derer großen Härte mehr den Charakter einer Nachbearbeitung zur Egalisierung kleinerer Unregelmäßigkeiten, zum Abtrennen von Angüssen und Spannflächen oder zum Einstellen eng tolerierter Funktionsmaße. Am gebräuchlichsten ist hierbei das Naßschleifen mit Siliziumkarbid- oder Diamant-Schleifscheiben [30, 31, 32]. Auch Trennschleifen, Lochsägen und Honen mit Diamant-Werkzeugen werden häufig angewendet. Kompliziertere Werkstücke können mit Ultraschall, durch Elektroerodieren oder Laserschneiden bearbeitet werden [33, 34, 35].

2.2 CAD/CAM in der keramischen Industrie

Bei der traditionellen und noch immer dominierenden Arbeitsweise in der Schlicker-
gußproduktion findet der Vorgang der Gestaltung eines neuen Produkts unmittelbar
bei der handwerklichen Anfertigung eines Urmodells im Formenbau statt. Daraus
wird dann durch Abformen und Modifizieren die Gießform abgeleitet. Eine Kon-
struktion im eigentlichen Sinne erfolgt üblicherweise nicht. Das technische Büro ist
nur insoweit beteiligt, wie für die Bereitstellung von Vorrichtungen und Werkzeugen
erforderlich. Nur bei Werkstücken mit einfacher Geometrie werden vereinzelt bereits
erfolgreich CAD-Systeme für die Formenkonstruktion eingesetzt [36, 37].

Hauptursache dieses Zustandes sind die vielfältigen Einflußgrößen, welche bei der
Gestaltung einer Gießform berücksichtigt werden müssen (Bild 11). Hierzu gehören
beispielsweise Trocken- und Brandschwindung, Verzüge, gießtechnische Maß-
nahmen sowie anwendungstechnische Forderungen an die Geometrie des Endpro-
dukts. Ihre Berücksichtigung erfordert ein hohes Maß an technologischem Exper-
tenwissen, dessen Dokumentation nicht selten auf Schwierigkeiten stößt. In vielen
Fällen existiert überhaupt kein algorithmierbares oder heuristisches Regelwerk,
sondern es wird intuitiv vorgegangen. Daher werden im Formenbau hochqualifizierte
Facharbeiter mit jahrelanger Erfahrung benötigt.

Grundvoraussetzung für die Einführung industrieller Abläufe in Produktentwicklung
und Formenbau ist daher die Bereitstellung von Methoden zur Vorherbestimmung
der Trocken- und Brandschwindung. Hierzu liegen etliche Untersuchungen vor, die
jedoch bisher noch nicht zu einer geschlossenen Theorie geführt haben [38, 39, 40].
Eine quantitative Vorhersage der auftretenden Schwindungen ist derzeit nur für eng
begrenzte Werkstückspektren mit relativ einfacher, ähnlicher Geometrie und
identischem Werkstoff möglich. Entsprechende, zum großen Teil von den Anwendern
aus empirischen Erfahrungen selbst entwickelte Berechnungsprogramme befinden
sich bereits im Einsatz.

Die Aufgabe, Keramik-Gießformen mit Freiformflächen maschinell herzustellen, ist
von der fertigungstechnischen Seite her als grundsätzlich gelöst zu betrachten und

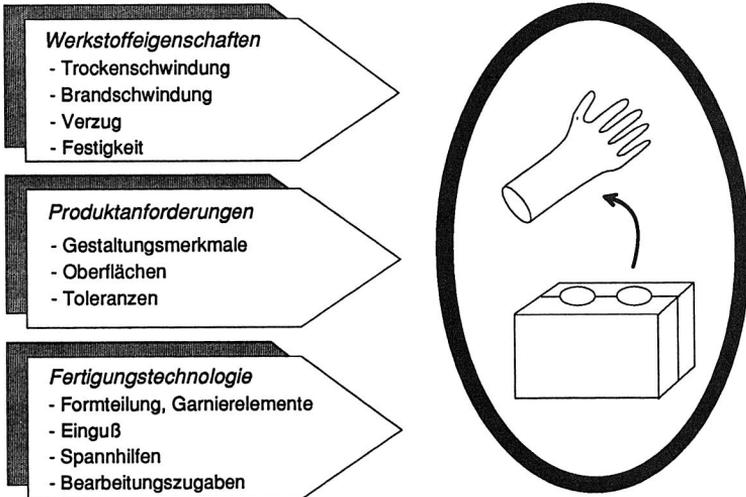


Bild 11: Einflußgrößen bei der Anfertigung einer Keramik-Gießform

wurde versuchsweise bereits durchgeführt. Hierbei kann auf Verfahren aus dem Vorrichtungs- und Musterbau zurückgegriffen werden. Es kommen insbesondere das 5-Achs-NC-Fräsen [41] und die Stereolithographie [42, 43] in Betracht.

Eine CAD/CAM-Kopplung für Freiformteile ist zwar nicht bei jedem CAD-Anbieter verfügbar, aber dennoch als Stand der Technik anzusehen [44]. Die derzeit gebräuchlichen Steuerdatenformate für NC-Programme von Werkzeugmaschinen führen hierbei zu sehr langen Programmen, deren Erzeugung und Verwaltung nicht effektiv ist. Nachträgliche Korrekturen an der Maschine sind fast unmöglich [45]. Erste Verbesserungen in dieser Hinsicht verspricht der Einsatz von NC-Steuerungen, welche die Spline-Interpolation beherrschen [46]. Als günstigster Ansatz erscheint jedoch, nicht mehr Bewegungsanweisungen an die Maschine zu übertragen, sondern eine um technologische Bedingungen ergänzte Beschreibung der Flächenform [47]. Hierfür stehen bereits verschiedene Standardformate wie VDA/FS oder ISO 6983 bereit.

2.3 Automatisiertes Entgraten von Gußteilen

Das automatische Entgraten von Werkstücken aus Metall und neuerdings auch aus Kunststoff war und ist Gegenstand eingehender Aktivitäten. Es wurden bereits alle gängigen Bearbeitungsverfahren auf ihre Eignung hin untersucht [48], und zwar sowohl für das Entfernen von Primärgraten als auch von Sekundärgraten und für das Abtrennen von Angüssen, Steigern und Kernlagern.

Die häufigsten Entgratverfahren sind Fräsen und Schleifen. Ersteres wird in der Hauptsache bei Aluminium [14, 49] und Kunststoff [50, 51, 52] sowie bei kleinen Teilen (bis ca. 150 g) aus Grauguß oder Stahl angewendet, letzteres vorwiegend für größere Werkstücke aus Eisenwerkstoffen [53, 54, 55]. Mitunter kommen auch Meißeln, Feilen oder Bürsten vor. Wasserstrahl- und Plasmaschneiden oder andere Sonderverfahren werden hingegen nur selten eingesetzt.

Zum Entgraten bei geringen Flexibilitätsanforderungen sind werkstoff- und werkstückspezifisch ausgelegte Sondermaschinen im Gebrauch. Für das Verputzen kleinerer Serien metallischer Werkstücke werden spezielle Verputz- und Polierautomaten mit unterschiedlichsten kinematischen Konzepten angeboten. Ihre Verbreitung ist nicht besonders groß, denn die relativ groben Toleranzen von Gußteilen, deren komplizierte Gestalt und die Tatsache, daß Gußgrate in der Regel geometrisch nicht eindeutig bestimmt sind, erschweren die Realisierung technisch und wirtschaftlich befriedigender Systeme [56].

Die Verwendung von flexiblen Handhabungsgeräten beim Gußputzen ist bisher trotz hoher Erwartungen und vielfältiger Forschungsanstrengungen weit hinter den Erwartungen zurückgeblieben. Als Ursache hierfür ist neben den genannten besonderen technologischen Anforderungen beim Entgraten vor allem die geringe Steifheit und Genauigkeit von Universalrobotern sowie ihr hoher Rüstaufwand für das Programmieren komplizierter Konturen anzusehen. Etwas günstiger als bei Metallteilen sind die Verhältnisse bei Werkstücken aus Kunststoff, die genauer sind und sich

leichter entgraten lassen. Daher verzeichnet dieses Einsatzfeld in jüngster Zeit einen beachtlichen Zuwachs.

Die Anpassung des Bearbeitungssystems an Abweichungen zwischen Werkstückgeometrie und programmierter Bewegung erfolgt in der Mehrzahl der Fälle auf passive Weise durch elastisch-nachgiebige Lagerung des Werkzeugs bzw. Werkstücks [50, 52, 54, 57]. Sensoren finden aus Kostengründen und wegen noch immer bestehender technischer Schwierigkeiten nur in geringem Umfang Anwendung. Obwohl bereits verschiedentlich mehrdimensionale Bahnregelungen mit taktilen oder optischen Sensoren beschrieben worden sind und teilweise auch auf dem Markt angeboten werden, beruhen die realisierten Lösungen meist auf eindimensionalen Regelkreisen mit verhältnismäßig einfachen Meßwertaufnehmern [54, 55].

Programmierhilfen und höherentwickelte Programmiersysteme für Entgratanwendungen werden verschiedentlich vorgestellt [14, 58, 59, 60, 61], in Beschreibungen tatsächlich ausgeführter Anlagen jedoch nur selten erwähnt. Sie basieren in der Regel auf einer sensorgestützten Konturaufnahme, mitunter kombiniert mit Offline-Programmiersystemen zur Generierung einer vorläufigen Stützbahn bzw. mit Auswerterechnern zur nachträglichen Datenreduktion.

3 Werkstück- und Systemanalyse

3.1 Schwindung und Verzug von Keramik

Die keramische Technologie ist ganz wesentlich durch wiederholte Stoffumwandlungen gekennzeichnet. In erster Näherung entspricht jeder Prozeßstufe ein anderer Werkstoffzustand. Von wesentlicher Bedeutung für die Entwicklung von Verputzverfahren und für die Realisierung einer über mehrere Produktionsschritte gehenden Verfahrenskette in der Schlickergußproduktion ist daher das Verständnis der Vorgänge, die sich bei den Zustandsänderungen des Schlickers bzw. Scherbens abspielen, denn diese haben sowohl Auswirkungen auf die Bearbeitungseigenschaften des Werkstoffs als auch auf die Geometrie des Werkstücks. Damit werden entscheidende Einflußgrößen für integrierte Fertigungssysteme berührt (Bild 12).

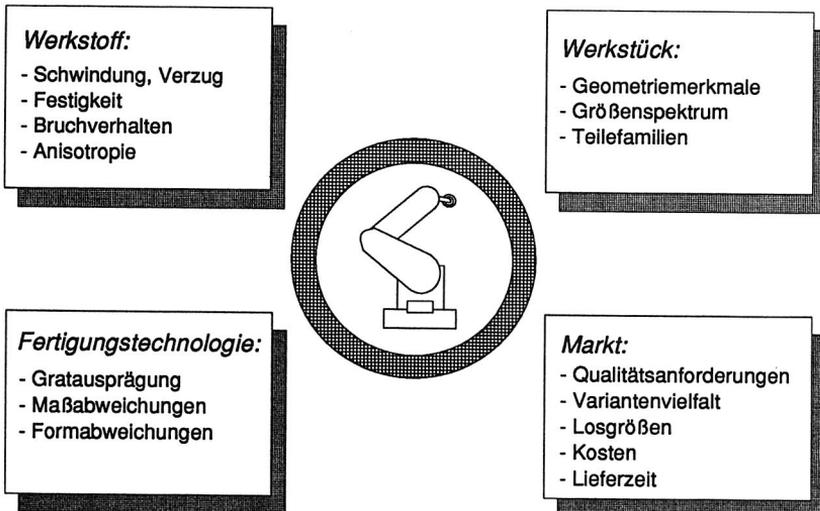


Bild 12: Einflußgrößen beim automatischen Verputzen von Keramik mit Industrierobotern

In einer Rohmasse mit hohem Wassergehalt sind alle Teilchen von einer Wasserhülle umgeben (Bild 13, links). Das Verhalten des Schlickers beim Trocknen läßt sich in drei Phasen untergliedern [39, 62, 63]: Zunächst wird das freie sowie das Adhäsionswasser abgegeben (Bild 13, zweite Skizze). Dessen Volumen fehlt dem Schlicker, so daß dieser eine Schwindung erfährt, welche proportional zum Wasserverlust ist (Bild 14, Phase 1) und durch die Gleichung

$$S = (1 - L/L_0) \cdot 100 \% \quad (3.1)$$

definiert wird. Später tritt allmählich auch das Wasser aus den Partikelzwischenräumen aus. Da die Keramikeilchen nun bereits teilweise zusammenstoßen, bilden sich zwischen ihnen Poren; der Zusammenhang zwischen Schwindung und Wasserverlust ist nicht mehr linear (Bild 14, Phase 2). Wenn sich die Teilchen vollständig berühren (Bild 13, dritte Skizze), erfolgt bei ungefähr 12 % Wassergehalt der Übergang zum lederharten Zustand. Bei weiterer Trocknung wird nun immer mehr Porenwasser abgegeben (Bild 14, Phase 3), bis bei etwa 3 % Restfeuchtigkeit der weißtrockene Zustand erreicht ist (Bild 13, rechts). In dieser Phase tritt kaum noch eine Schwindung auf, sondern hauptsächlich eine Vergrößerung der Poren.

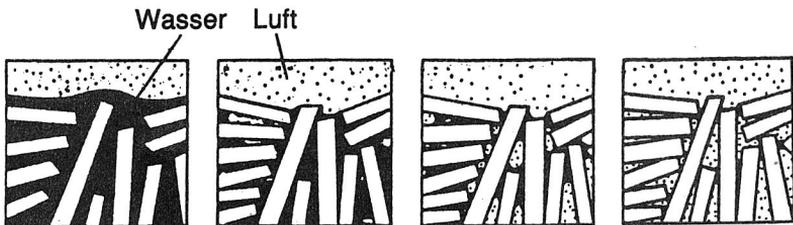


Bild 13: Schwindung von Keramik durch Wasserverlust beim Trocknen (aus [38])

Um die gewünschten Abmessungen am Fertigteil einzuhalten, muß die Trockenschwindung bereits bei der Formgebung bzw. beim Modellbau durch entsprechende Aufmaße berücksichtigt werden. Das bei einer gegebenen prozentualen Schwindung S aufzuschlagende Aufmaß A errechnet sich wie folgt:

$$A = 100 \cdot S / (100 - S) \quad (3.2)$$

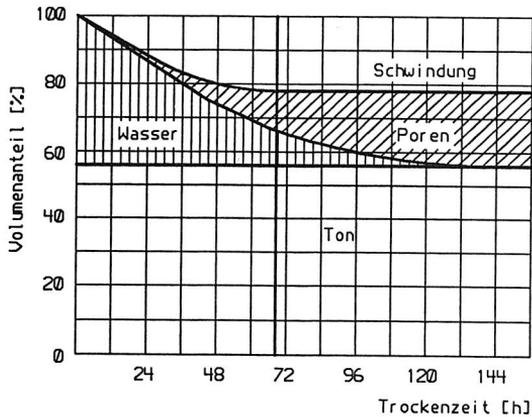


Bild 14: Bourry-Diagramm eines Tonwerkstoffs (aus [24])

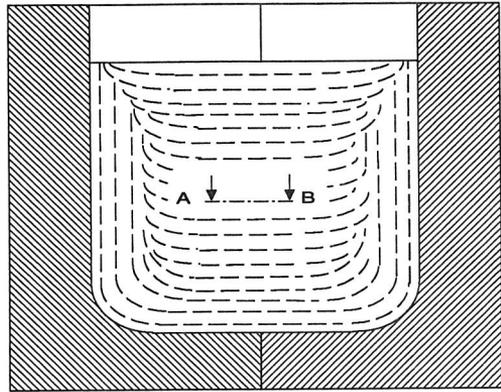
Das Ausmaß der Schwindung hängt von vielen Faktoren ab, insbesondere von der genauen Zusammensetzung, der Korngröße und dem anfänglichen Wassergehalt der Masse sowie der Trocknungsgeschwindigkeit. In [39] wird eine Formel für die Berechnung der linearen Trockenschwindung aufgestellt:

$$l = l_0 + K \cdot e^{RT/Q} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.3)$$

- mit
- R = allgemeine Gaskonstante
 - T = Trocknungstemperatur
 - t = Trockenzeit
 - K = Schwindungsfaktor (abhängig von Werkstoff und Formgebungsverfahren)
 - Q = effektive Verdampfungsenthalpie des Versatzes
 - τ = Zeitkonstante (werkstoffabhängig)

Die Faktoren K und τ sind nur für reine Kaolinmassen angegeben. Die Resultate der Rechnung stimmen dort bei nicht zu extremen Bedingungen recht gut mit den empirischen Werten überein, die zwischen 3 und 8 % liegen. Die experimentelle Basis müßte jedoch noch auf andere Werkstoffe und Formgebungsverfahren ausgedehnt werden. Bei Tonen wurden Trockenschwindungen von 4 bis 10 % beobachtet [64], während die feinkörnigeren Montmorillonitmassen bis zu 25 % erreichen können [24].

Viele Minerale besitzen flächig-blättchenhafte bis nadelförmige Kristalle. Ein typischer Vertreter ist Kaolinit mit ausgeprägt langgestreckten Kristallen von ca. $3 \times 0,1 \times 0,05 \mu\text{m}$ [40]. Derartige Teilchen zeigen eine Tendenz zu einheitlicher Ausrichtung, die noch durch die Oberflächenladung an den Gitterabbruchstellen der Kristalle sowie viskositätsvermindernde Zusätze bei der Schlickeraufbereitung unterstützt wird [65]. Bild 15 zeigt die idealisierte Darstellung eines Ton-Wasser-Systems, wie es sich beim Vergießen von kaolinitischem Schlicker ergibt. Die Plättchen richten sich da-



Schnitt A-B (vergrößert)

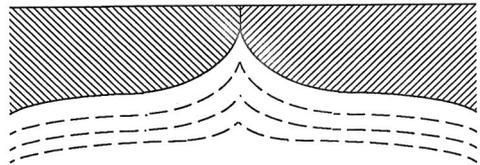


Bild 15: Orientierung der Kristalle am Rand gegossener Keramik

bei mit ihren Hauptflächen rechtwinklig zum Feuchtigkeitsgradienten aus [66]. Ähnlich erfolgt bei starken plastischen Verformungen eine Orientierung parallel zum Geschwindigkeitsgradienten [64]. Häufig findet bei der Formgebung auch eine durch Reibungs- und Verdrängungseffekte hervorgerufene Entmischung des Versatzes mit dem Resultat einer inhomogenen Phasenverteilung statt [64]. Es ist einleuchtend, daß solche texturierten Massen ein deutlich anisotropes Schwindungsverhalten aufweisen. Daher kann meist nicht mit globalen Schwindungsfaktoren gearbeitet werden, sondern das Aufmaß ist unter Berücksichtigung der lokalen Werkstückgeometrie unterschiedlich festzusetzen. Die ungleichmäßige Schwindung führt außerdem zu einem Verzug des Werkstücks, zu dessen Ausgleich gezielte Gestaltkorrekturen bei der Formgebung erforderlich sind.

Außer bei den Trocknungsvorgängen erfährt der Werkstoff auch beim Brennen Gewichts- und Volumenreduzierungen (Bild 16). Ursache hierfür ist neben der Volumenänderung durch Dehydratation und Gefügeumwandlungen insbesondere das Zusammensintern der Einzelteilchen an ihren Berührungspunkten, oft aber auch die Bildung einer flüssigen Glasphase beim Brennen, welche in die Poren zwischen den Teilchen fließt. Die Brandschwindigkeit wird in [28] für gegossenes Porzellan in Abhängigkeit von der Aufheizgeschwindigkeit mit 11 bis 18 % angegeben. Zusammen mit der Trockenschwindigkeit ist damit je nach Formgebungs- und Brennverfahren

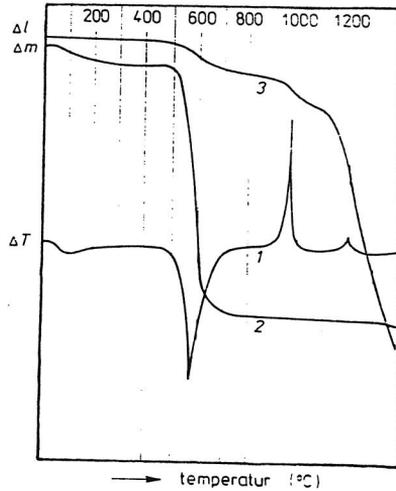


Bild 16: Endothermischer Effekt, Massenverlust und Brandschwindigkeit von Kaolinit (aus [40])

einige Gesamtschwindigkeit von über 25 % möglich. Praktische Erfahrungswerte für die Gesamtschwindigkeit von Porzellan schwanken zwischen 7 bis 10 % für trockengepreßte Formlinge [67] und 10 bis 15 % für Gußware [67, 68, 69]. Für gegossenes Aluminiumtitanat wird in der Praxis mit Schwindungen um 13 % gerechnet. Die genaue Vorhersage der Brandschwindigkeit ist wegen der vielfältigen werkstoff- und verfahrensbedingten Einflußgrößen sehr schwierig [29, 70]. Eine quantitative, formelmäßige Darstellung liegt daher noch nicht vor.

Bei hoher Brenntemperatur kann es nicht nur wegen anisotroper Schwindung zu Deformationen kommen, sondern auch, weil die Masse durch Schmelzvorgänge erweicht und sich dabei Werkstückbereiche mit exzentrischem Schwerpunkt infolge ihres Eigengewichts einseitig senken. Auch dieser Verzug muß bei der Formgebung berücksichtigt werden, soweit nicht durch geneigte oder hängende Anordnung der Werkstücke im Ofen sowie in besonders schwierigen Fällen durch Einbau von Stützen, sogenannten Bomsen, bei der Ofenbeschickung Abhilfe geschaffen wird.

3.2 Eigenschaften von Keramik bei der Weichbearbeitung

Der nach wie vor wichtigste Werkstoff der Ingenieurkeramik ist das Porzellan in vielfältigen Varianten. Sein wichtigster Bestandteil ist Kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); daneben sind noch Quarz (SiO_2) und Feldspat ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) enthalten, die auf die Eigenschaften der ungebrannten Masse jedoch nur eine untergeordnete Wirkung ausüben [71]. Damit ist Porzellan eine typische Silikatkeramik. Die meisten anderen Keramiken für technische Anwendungen gehören zur Oxidkeramik.

Die Eigenschaften keramischer Werkstoffe hängen nicht nur von ihrer chemischen Zusammensetzung ab, sondern auch von den angewendeten Verfahren bei Aufbereitung, Formgebung und Brand sowie den dabei eingestellten Parametern. Die in der Literatur angegebenen Kennwerte schwanken daher und auch wegen uneinheitlicher Prüfverfahren erheblich [72, 73]. Tafel 1 kann nur einige Beispiele angeben.

Werkstoff (Nr. nach DIN VDE 0335)	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [N/mm ²]	Quer- zahl [-]	Druck- festigkeit [N/mm ²]	Biege- festigkeit [N/mm ²]	Rißzählig- keit K_{Ic} [N/mm ^{3/2}]	Wärmeleit- fähigkeit [W/mK]	Wärme- dehnung [1/mK]
Porzellan 110.1	2,2	50.000	0,18	450	50	1,0		
Porzellan 110.3	2,4	70.000	0,18	650	140			
Porzellan 111	2,2	80.000	0,18	250	40	1,3	1,0 - 2,5	3 - 6
Porzellan PR	2,4	70.000	0,18	650	150			3,8
Steatit 220	2,6	80.000			120		2,0 - 3,0	7 - 9
Cordierit por.	1,9	40.000			25	5,0	1,3 - 1,8	4 - 6
Al_2O_3 799	3,9	380.000	0,20	4000	400	5,0	27,7	8,5
Al_2TiO_5	3,1	16.000	0,20		30	>10	2,0	1,2
ZrO_2 stab.	6,0	200.000	0,22	1700	800	5,0	2,5	11,0
SiSiC	3,0	380.000	0,20	2000	360		110	4,2
B_4C	2,5	450.000		2800	>300	2,0	29	5,0
RBSN ¹⁾	2,6	180.000		800	250	5,0	13	3,0
SSN ²⁾	3,1	300.000	0,20	3000	620		32	3,6
St 37	7,8	210.000	0,30	240	240	>100		11,1
GG-25	7,2	80.000		250		15 - 25	50	10,5
AlRMg0,5	2,7	70.000		210	210		>70	24,0
WC/Co Hartmet.						15		

¹⁾ RBSN = reaktionsgebundenes Si_3N_4

²⁾ SSN = gesintertes Si_3N_4

Tafel 1: Kennwerte einiger technischer Keramikwerkstoffe und Metalle (nach [4 - 9])

Der fundamentale Nachteil keramischer Werkstoffe mit entsprechenden Auswirkungen auch auf die Automatisierung von Bearbeitungsvorgängen ist ihre große Sprödigkeit, das heißt die mangelnde Fähigkeit zum Abbau von Spannungsspitzen durch plastische Deformation. So liegt der kritische Spannungsintensitätsfaktor

$$K_{Ic} = \sigma \cdot \sqrt{l} \cdot Y \quad (3.4)$$

- mit σ = äußere Spannung
- l = Rißlänge
- Y = dimensionsloser Geometriefaktor

als Maß für die Duktilität bei den besten keramischen Werkstoffen um mehr als das dreifache unter der von spröden Metallegierungen (Tafel 1). Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm entspricht nahezu der Geraden des idealen HOOKESchen Gesetzes [73], wobei die Steigung deutlich größer ist als bei den meisten Metallen (Bild 17).

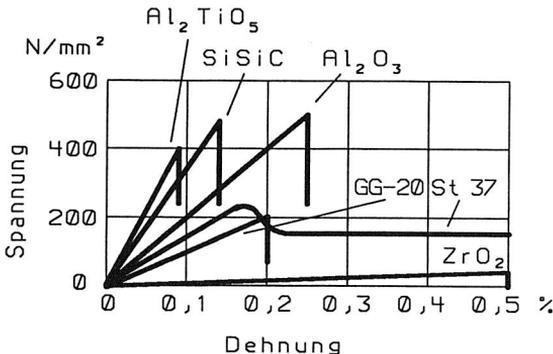


Bild 17: Spannungs-Dehnungs-Diagramme einiger wichtiger Werkstoffe (nach [84], für Stahl nur ausschnittsweise wiedergegeben)

Diese Eigenschaft keramischer Werkstoffe wird durch ihren kristallinen Aufbau mit kovalenter bzw. ionischer Bindung bestimmt, der nur eine geringe Anzahl von Gleitsystemen aufweist, die zudem durch hohe Gitterenergien weitgehend blockiert sind [24, 74]. Eine Selbstheilung durch Kriechen oder Fließen kann daher nicht eintreten [75]. Die Folgen sind Neigung zu unterkritischem Rißwachstum auch unter

kleinen Spannungen und sogar bei Raumtemperatur [76, 77, 78], geringer Widerstand gegen instabile Rißausbreitung [79] sowie Anfälligkeit gegen mechanische und thermische Schockeinwirkung [80].

Bedingt durch die Herstellungstechnologie sind Risse, Poren und sonstige Fehlstellen bei keramischen Werkstoffen unvermeidbar [81]. Zusammen mit den bei vielen Versatzten eingelagerten festen Quarzkörnern wirken sie als bruchauslsende Kerben [82]. Hieraus resultiert die gegenüber der Druckfestigkeit deutlich geringere Zug- und Biegefestigkeit von Keramiken (vgl. Tafel 1). Da Rißbildung und -wachstum stochastische Vorgänge sind, streuen die Festigkeitskennwerte der einzelnen Proben einer Charge deutlich stärker als bei Metallen, und zwar asymmetrisch hin zu kleineren Festigkeiten bis nahe Null (Bild 18). Dieser Umstand kann durch den WEIBULL-Modul m charakterisiert werden [76]:

$$m \approx 1,2 \cdot (\sigma / S) \quad (3.5)$$

mit σ = Mittelwert der Festigkeit
 S = Standardabweichung der Meßwerte

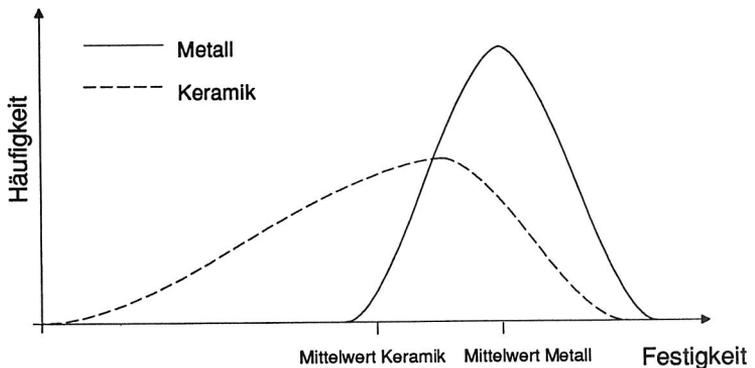


Bild 18: Schematische Häufigkeitsverteilung von Festigkeiten bei Metallen, Glas und Keramik (nach [84])

Je kleiner der WEIBULL-Modul, desto größer also die Streuung der Festigkeitswerte und desto geringer die Homogenität des Werkstoffs. Eine Folge davon ist der

starke Einfluß des unter Last stehenden Bauteilvolumens V auf die zulässige Beanspruchung. Hierfür gilt nach [83]:

$$(\sigma_{zul,1} / \sigma_{zul,2}) = (V_2 / V_1)^{1/m} \quad (3.6)$$

Vor dem Bruch eines Keramikteils tritt außer bei sehr hohen Temperaturen praktisch keine plastische Verformung im Makrobereich auf [84]. Plastische Verformung eines Körpers aus Keramik ist nur im lederharten Zustand möglich. Die dabei stattfindende Verzerrung des Gefüges unter Verdrängung des Porenwassers bildet sich jedoch beim Trocknen häufig wieder um bis zu 50 % der Gesamtverformung zurück [85, 86]. Die Ursachen dieses Effekts, der mit "Gedächtnis der Massen" bezeichnet wird, konnten noch nicht vollständig geklärt werden. Im weißtrockenen Zustand sind die Kristalle starr miteinander verkeilt, so daß bereits bei der Weichbearbeitung dieselben schlechten duktilen Eigenschaften wie im gebrannten Zustand bestehen.

Da die Kristalle jedoch noch nicht zusammengesintert sind, sondern nur durch Adhäsions- und Reibungskräfte zusammengehalten werden, liegen die Festigkeitskennwerte von Grünlingen insbesondere bei schlagartiger Belastung erheblich unter denen im gebrannten Endzustand. Die Rohbruchfestigkeit - aus prüftechnischen Gründen als Trockenbiegefestigkeit bestimmt - ist stark von Masseaufbereitungs- und Formgebungsverfahren, Trocknungsgeschwindigkeit, Restwassergehalt des Formlings sowie Umgebungstemperatur abhängig [87, 88, 89]. MCCOLM und CLARK [90] geben auf der Basis nicht eindeutig zitierter Arbeiten von KENDALL eine Formel zur Berechnung der Grünfestigkeit an, die diese Einflußgrößen widerspiegelt:

$$\sigma = \frac{0,85 \cdot \phi^2 \cdot E^{1/8} \cdot \gamma^{5/8}}{c^{1/2} \cdot r^{2/3}} \quad (3.7)$$

mit ϕ = Packungsdichte
 E = Elastizitätsmodul
 γ = Korngrenzenenergie
 c = Rißlänge
 r = Partikelradius

In der Praxis liegt die Trockenbiegefestigkeit keramischer Massen zwischen 1 und 8 N/mm², also bei weniger als einem Zwanzigstel des Wertes in gebranntem Zu-

stand, wie ein Vergleich der Werte in Tafel 1 und Tafel 2 zeigt. Die Zugfestigkeit üblicher Keramikwerkstoffe im Grünzustand beträgt ungefähr ein Fünftel, die Druckfestigkeit das Doppelte der Biegefestigkeit. Da schon kleine Mengen hygroskopisch gebundenen Wassers die Trockenfestigkeit beträchtlich absinken läßt, sollte eine längere Lagerung weißtrockener Formlinge vor der Handhabung und Bearbeitung vermieden werden.

Werkstoff	Trockenbiegefestigkeit [N/mm ²]
Kaolin	0,5 ... 2
Ton	1 ... 6
Porzellan	3 ... 8
Al ₂ TiO ₅	3 ... 5
Al ₂ O ₃	8 ... 15

Tafel 2: Trockenbiegefestigkeit einiger Keramikwerkstoffe (nach [64, 89])

Die Reißanfälligkeit keramischer Werkstoffe hat in mehrfacher Hinsicht Auswirkungen auf die Gestaltung von Fertigungsprozessen: Erstens muß eine aus Aufspan-, Zustell- und Vorschubkräften resultierende Zug- oder Biegebeanspruchung des Werkstücks bereits im Hinblick auf die Gefahr einer Zerstörung während der Bearbeitung möglichst klein gehalten werden. Zweitens können durch derartige Kräfte entstandene Risse wegen der dadurch eintretenden Kerbwirkung an der Oberfläche und des unterkritischen Rißwachstums die Lebensdauer des fertigen Keramikteils beeinträchtigen [30, 91]. Dies gilt auch für die Grün-

bearbeitung, da beim Brennen nur selten eine nennenswerte Heilung von Rissen auftritt, wie der gegenüber dem Grünzustand meist kaum veränderte WEIBULL-Modul von Keramiken zeigt [90]. Drittens schließlich können Oberflächenrauigkeiten zu einem ähnlichen Effekt führen.

Ist ein Formling zu tief angeschnitten worden (zum Beispiel beim Abtrennen eines besonders dicken Grates), so liegen die Kristalle nicht mehr, wie beschrieben, parallel zur Oberfläche, sondern sie treten schräg stehend zutage (Bild 15). Dies kann zu Oberflächen- und Gestaltfehlern nach dem Brennen führen, weil das Werkstück in diesem Bereich eine andere Hauptschwindungsrichtung aufweist [92]. Daher muß die Schnittiefe gering gehalten werden; gegebenenfalls ist ein zusätzliches Verschwämmen des Formlings zur Homogenisierung des Gefüges erforderlich.

Bei der Auswahl des Entgratverfahrens ist schließlich noch die hohe chemische Beständigkeit von Keramiken zu beachten sowie die Tatsache, daß bei der Grünbearbeitung wegen möglicher Vorglüh- und Vorbrenneffekte die Einwirkung höherer Temperaturen nicht erlaubt ist.

3.3 Geometrische Merkmale von Schlickerguß-Erzeugnissen in der Ingenieurkeramik

Die durch das Werkstück bedingten Einflußgrößen auf den Putzvorgang unterteilen sich in determinierte Gestaltungsmerkmale (linke Hälfte von Bild 19), welche Gegenstand dieses Kapitels sind, und durch den Fertigungsprozeß eingebrachte Störgrößen weitgehend stochastischer Natur (Bild 19, rechte Hälfte), die später bestimmt werden sollen.

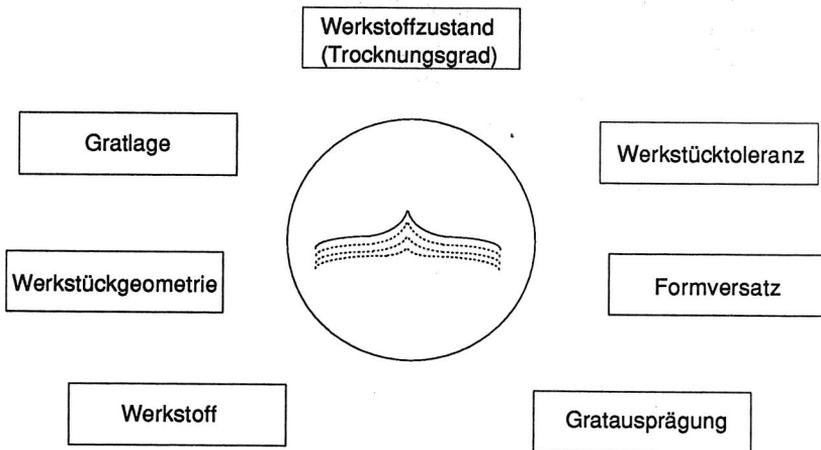


Bild 19: Werkstückbezogene Einflußgrößen beim Verputzen von Keramik mit Industrierobotern

Die Analyse der Schlickergußfertigung bei einem bedeutenden Hersteller technischer Keramik ergab, daß zwei Produktgruppen den weit überwiegenden Teil des Um-

satzes in diesem Bereich ausmachen: Tauchformen für Latex-Erzeugnisse (Bild 20) und Abgaskanalauskleidungen für Turboladernmotoren (sogenannte Portliner; Bild 3). Im Normalfall liegt ein Fertigungslos bei deutlich über 2000 Stück. Der Anteil von Aufträgen mit neuer oder geänderter Geometrie beträgt fast 50 %.

Tauchformen werden in der Regel aus Spezialporzellanen hergestellt. Nach ihren Gestaltungsmerkmalen lassen sie sich in drei Hauptgruppen gliedern:

1. Tauchformen für Handschuhe in anatomisch angepaßter Form, häufig mit reliefierter Oberfläche (Bild 20, links und Mitte hinten)
2. Handschuh-Tauchformen in Ambitextrous-Form (d. h. alle Finger in einer Ebene, selbe Form für rechte und linke Hand), glatt (Bild 20, rechts)
3. Tauchformen für sonstige Latex-Erzeugnisse, zum Beispiel für Spielzeug, Laborzubehör, Artikel zur Kranken- und Säuglingspflege (Bild 20, vorne)

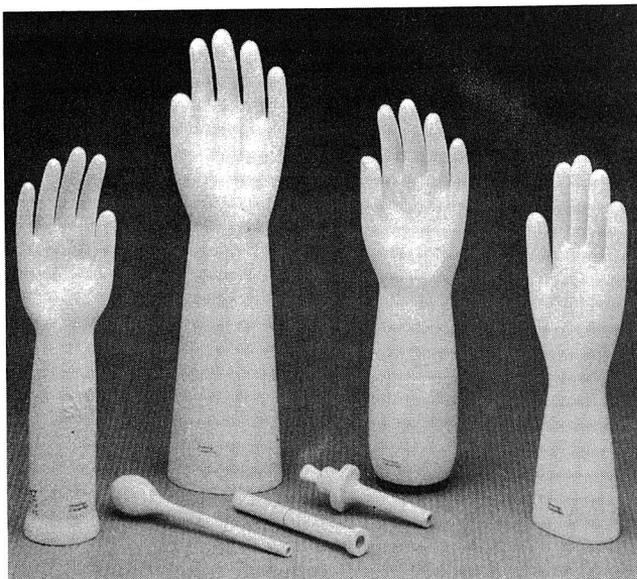


Bild 20: Tauchformen für Gummiwaren (Werkbild Hoechst CeramTec AG, Selb)

Gegenüber den Handschuh-Tauchformen ist die dritte Gruppe mengenmäßig ohne große Bedeutung. Diese Formen sind Sondertypen. Bei den anderen beiden

Gruppen werden diverse, sich durch bestimmte Gestaltungsmerkmale unterscheidende Basistypen angeboten, die jeweils in beliebigen Größen, mit verschiedenen Oberflächen und in kundenspezifischen Abwandlungen erhältlich sind. Dies hat zur Folge, daß derzeit mehrere tausend "lebende" Modelle existieren. Betrachtet man jedoch die Verteilung der Liefermengen in Bild 21, so zeigt sich, daß über 80 % der Gesamtstückzahl auf nur 20 % der Typen entfallen, wobei die Ambitextrous-Formen mit nur 40 Typen mehr als die Hälfte ausmachen ¹.

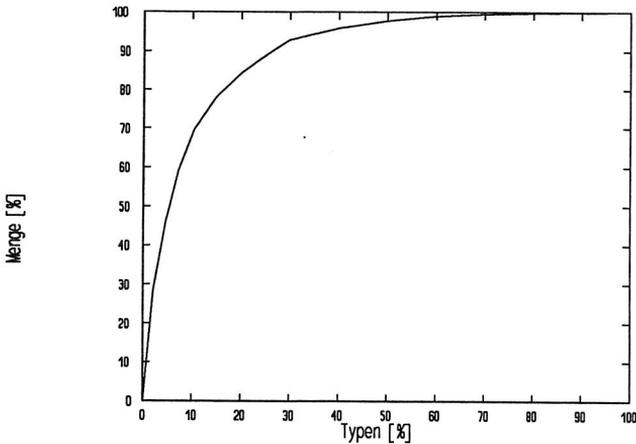
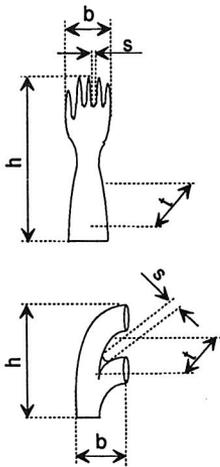


Bild 21: Verteilung der Produktion von Tauchformen auf die einzelnen Typen

Portliner können in einfache Typen von der Art eines Rohrkrümmers, solche mit doppelten Einlaß von der Bauform eines Hosenrohrs und solche mit mehrfacher Verzweigung unterschieden werden. Die einfache Form überwiegt dabei mit 75 % der Typen deutlich. Mehr als zwei Einlaßöffnungen kommen nur sehr selten vor. Die rasche Entwicklung im Motorenbau, insbesondere die zunehmende Verbreitung der Vierventiltechnik, läßt allerdings für die Zukunft eine Verschiebung der Schwerpunkte erwarten. Da Verbrennungsmotoren Großserienprodukte sind, ist die

¹ Weitergehende Details zur Auftrags- und Kostenstruktur können an dieser Stelle aus Vertraulichkeitsgründen nicht genannt werden.

Vielfalt an Portlinern deutlich geringer als bei Tauchformen. Als Werkstoff kommt Aluminiumtitanat (Al_2TiO_5) zur Anwendung, das sich durch besondere Temperaturwechselbeständigkeit auszeichnet [93].



Merkmal	Ausprägung bei	
	Tauchformen	Portlinern
Höhe (h)	min	400 mm
	max	650 mm
Breite (b)	min	160 mm
	max	250 mm
Tiefe (t)	min	80 mm
	max	160 mm
kleinster Gratfußradius	2,5 mm	15 mm
lichte Höhe über Grat (s)	> 6 mm	>20 mm
Freiformflächen	ja	ja
Gewicht max	1,5 kg	500 g
Werkstoff	Porzellan	Al-Titanat

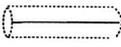
Tafel 3: Geometrische Merkmale wichtiger technischer Schlickerguß-Erzeugnisse

In Tafel 3 ist die Bandbreite der wichtigsten Abmessungen des untersuchten Werkstückspektrums zusammengestellt. Es fällt auf, daß die Tauchformen nicht nur in Bezug auf die Variantenvielfalt, sondern auch hinsichtlich ihrer geometrischen Merkmale erheblich höhere Anforderungen an die Verputztechnik stellen. An den Sattelflächen zwischen den Fingern weist der Gratverlauf sehr kleine Krümmungsradien auf, und auch die lichte Höhe über dem Grat, die dem Werkzeug zur Verfügung steht, ist sehr gering. Hinsichtlich der Querschnittsformen sind Tauchformen dafür sehr einheitlich, denn bis auf die stark kannelierten Schäfte von OP-Handschuh-Formen liegen fast ausschließlich ellipsenähnliche Profile vor. Portliner zeigen hier eine bedeutend größere Varianz (Tafel 4). Wichtig ist in diesem Zusammenhang, daß bei allen untersuchten Werkstücken die Profile quer zum Grat konvex gewölbt sind. Dies gilt auch für Flächen, die am Fertigteil eben sein sollen, weil diese später aufgrund der Brandschwindung nach innen eingezogen werden.

	 Kreis	 ellipt.	 poly- gonal
 Tauch- formen	0 %	85 %	15 %
 Portliner	40 %	52 %	8 %

Tafel 4: Anteile der Querschnittsformen am Werkstückspektrum

Wie Tafel 5 zeigt, kommen bei Schlickergußteilen keine Grate mit exakt linearem Verlauf vor. Dies ist einsichtig, denn solche Grate sind nur an prismatischen Werkstücken möglich, die aber mit anderen Verfahren preisgünstiger hergestellt werden können. Die Tauchformen mit zweidimensionalem Gratverlauf sind die Ambitextrous-Typen mit ihrem hohen Marktanteil. Bei Portlinern weisen selbst die zahlenmäßig klar dominierenden Ausführungen mit nur einer Einlaßöffnung häufig eine durch die Motorenkonstruktion vorgegebene räumliche Krümmung auf. Alle betrachteten Werkstücke haben in ihrem Gratverlauf trotz der teilweise sehr kleinen Krümmungsradien keine Unstetigkeiten. Dies liegt sowohl in der Gießtechnologie als auch in der Funktion der Teile begründet.

	1-dim. 	2-dim. 	3-dim. 
 Tauch- formen	0 %	57 %	43 %
 Portliner	0 %	52 %	48 %

Tafel 5: Häufigkeit ein-, zwei- und dreidimensionaler Gratverläufe

3.4 Qualitätsmerkmale und Grateigenschaften

Bild 22 verdeutlicht, daß der Komplex Gießen/Verputzen einen erheblichen Einfluß auf die Qualität von Schlickergußzeugnissen hat. Hinsichtlich der Qualitätsanforderungen in der Weichbearbeitung zeigen sich die Tauchformen - wie auch schon hinsichtlich der geometrischen Merkmale - wesentlich anspruchsvoller als die Portliner (Bild 23). Ihr wichtigstes Qualitätsmerkmal ist eine fehlerfreie Oberfläche, da sich diese unmittelbar auf die Oberfläche der damit getauchten Gummitteile überträgt. Des weiteren ist die Rißfreiheit wichtig, insbesondere im Sockelbereich. Sie bestimmt die Lebensdauer der beim Abziehen mechanisch stark beanspruchten Tauchformen. Die Geometrie hat insofern eine entscheidende Bedeutung, als von der Einhaltung bestimmter Formmerkmale (z. B. der Abrundung von Fingerwurzeln und -kuppen) direkt die Qualität des Endprodukts abhängt. Demgegenüber sind die Abmessungen der Tauchformen relativ grob toleriert.

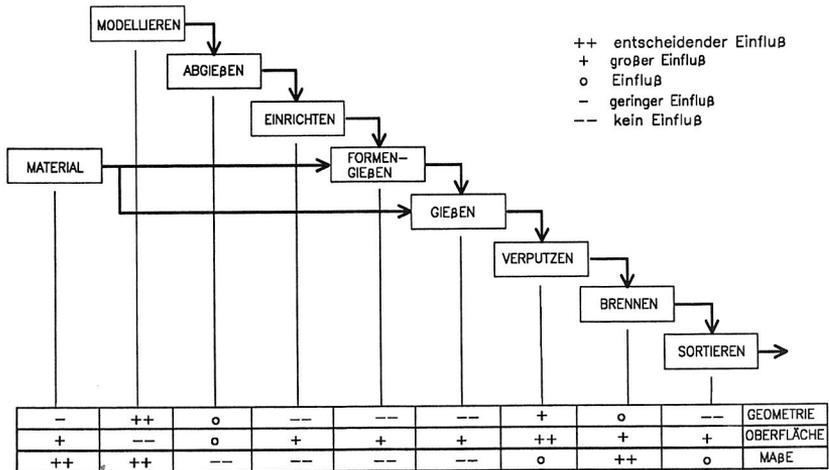


Bild 22: Einfluß der verschiedenen Fertigungsschritte auf die Produktqualität

Abweichend hiervon ist bei den Portlinern, die ja später in Kokillen mit Aluminium umgossen werden sollen, das wichtigste Qualitätsmerkmal die Maßhaltigkeit [94].

Qualitätsmerkmal	Bedeutung bei	
	Tauchformen	Portlinern
• Grاتفreiheit	●	●
• Oberflächengüte	●	○
• Rißfreiheit	●	◐
• Formtreue	●	◐
• Maßhaltigkeit	○	◐

= sehr wichtig ● = wichtig ○ = weniger wichtig

Bild 23: Anforderungen an die Qualität von Schlickerguß-Formlingen

Die geforderte Genauigkeit ist trotz der günstigeren gießtechnischen Voraussetzungen (kleinere Abmessungen, bessere Entformbarkeit) nur durch eine umfangreiche Hartbearbeitung erreichbar, weshalb für die Formgebung die verfahrensüblichen Grünmaßtoleranzen akzeptiert werden können. Da die spätere Funktionsfläche der Portliner ihre Innenseite ist, die beim Hohlgußverfahren wegen des Wegfalls von Kernen sehr glatt wird, braucht die Außenseite keine hohen

Anforderungen an die Oberflächenqualität zu erfüllen. Im Gegenteil trägt eine gewisse Rauigkeit später sogar zur besseren Verbindung des Portliners mit dem umgebenden Metall bei. Wichtig ist aber, daß der Grat vollständig entfernt wird, um das Werkstück bei der Hartbearbeitung korrekt spannen und später einwandfrei in die Kokille einlegen zu können. Kleinere Risse sind weniger bedenklich, denn die Portliner stehen im fertigen Zylinderkopf ständig unter Druckvorspannung.

Eine ausführliche Darstellung von Fehlern an gegossenen Keramiktteilen findet sich in [95]. Sie werden dort in Oberflächen- und Körperfehler unterteilt. Zu den Oberflächenfehlern gehört die Bildung von Gießrillen; das sind kleine, senkrecht zur Strömungsrichtung des Schlickers angeordnete Rillen an der Oberfläche des Scherbens. Sie entstehen, wenn infolge zu geringer Eingießgeschwindigkeit der Meniskus an der Schlickeroberfläche auszuhärten beginnt und beim weiteren Auffüllen nachbricht (Bild 24) [71]. Andere Oberflächenfehler sind Gießflecke, also Farbabweichungen an der Auftreffstelle des Schlickerstromes, sowie Poren, sogenannte Gießlöcher, infolge eingeschlossener Luftblasen.

Körperfehler äußern sich durch Risse und Deformationen des Formlings sowie durch Formversatz, lokale Gratverdickungen oder zu große Gratbreite. Risse können bei zu schnellem Trocknen oder zu langer Standzeit in der Form bzw. zu großer Wand-

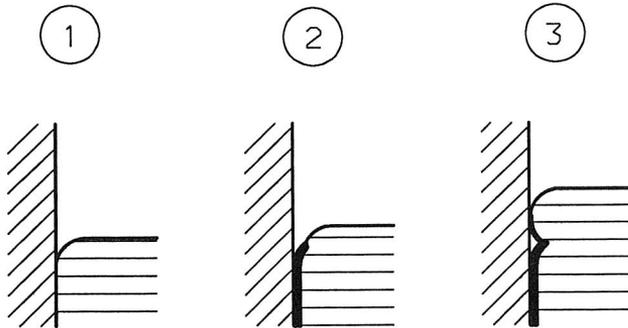


Bild 24: Bildung von Gießrillen durch vorzeitiges Aushärten des Schlicker-Meniskus (nach [71])

stärke auftreten. Fehler am Grat haben ihre Ursache meist in der Verwendung zu stark abgenutzter Formen und damit einer mangelhaften Qualitätskontrolle beim Entformen. Formversatz und teilweise auch zu große Gratbreite entstehen - einwandfreie Formen vorausgesetzt - durch mangelhafte Arbeit beim Zusammenstellen der Formen. Deformationen resultieren aus zu geringer Stand- oder Trockenzeit und damit zu weichem Formling, aus Kleben des Formlings in der Form sowie aus unsachgemäßer Handhabung beim Entformen und beim Transport. Sie werden meist vom Werker nach Gefühl wieder beseitigt, was jedoch keine Basis für eine reproduzierbare Formgenauigkeit des Werkstücks abgeben kann und wegen des "Formgedächtnisses" der Keramik die Ursache für einen beträchtlichen Teil des Trocken- und Brennverzugs bildet.

Während die Oberflächenfehler bei der Verwendung automatischer Gießlinien (und nur solche kommen für eine Kombination mit Verputzautomaten in Frage) durch sorgfältige Einstellung der Prozesse oder durch zusätzliche technische Maßnahmen vermieden werden können, hängen die meisten Körperfehler entscheidend von den manuellen Verrichtungen (Zusammenstellen, Entformen und Prüfen) ab. Hier ist daher mit unvermeidbaren stochastischen Fehlern zu rechnen, auf die das Verputzsystem reagieren muß (Bild 25).

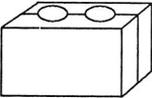
Merkmals	Ausprägung	
Oberflächenfehler	○	 ● = sehr groß ◐ = mäßig ○ = gering
Formversatz	○	
Gratvarianz	○	
Maßabweichung	◐	
Formabweichung	●	

Bild 25: Ausprägungen prozeßbedingter Fehlermerkmale von Schlickerguß-Formlingen

Der Grat selbst ist nicht als Fehler anzusehen. Seine Ausprägung steht jedoch in Korrespondenz zur Einhaltung anderer Qualitätskriterien, wie eine Betrachtung mehrerer willkürlich der Produktion entnommener Stichproben von Tauchformen und Portlinern ergeben hat. Es zeigte sich in allen Fällen ein durchgehender Grat, dessen Breite mit älter werdenden Gießformen zunimmt. Bei Tauchformen wurden Gratfußbreiten von 0,4 bis 0,6 mm gemessen, die über die ganze Länge des Grates annähernd konstant sind. Ausnahme stellen örtlich begrenzte deutliche Verdickungen des Grates infolge Ausbrüchen an der Kante der Gießformen dar, welche 10 bis 15 mm Länge und bis zu 3 mm Breite erreichen können. Derartige Verdickungen kommen besonders häufig an Werkstücken mit großer mittlerer Gratfußbreite und Grathöhe vor, weshalb sie als Zeichen für eine erschöpfte Lebensdauer der Gießform anzusehen sind. Die anfangs ziemlich konstante Grathöhe wird mit älter werdenden Gießformen größer und unregelmäßiger. Sie liegt zwischen 0,3 und 1,5 mm; der letztgenannte Wert allerdings nur an wenigen Stellen.

Da bei Portlinern die Ansprüche an das Oberflächengefüge geringer sind, werden die Formen länger benutzt. Deswegen und wegen der anderen rheologischen Eigenschaften von Aluminiumtitanat fallen die Grate deutlich breiter und ungleichmäßiger aus. Es wurden mittlere Gratfußbreiten von 0,6 bis 1,0 mm festgestellt, gepaart mit Grathöhen von 1 bis 4 mm.

3.5 Form- und Maßhaltigkeit

Die Herstellung von keramischen Formteilen ist ein komplizierter Prozeß mit vielfältigen Einflußgrößen. Daher können Keramikteile mit maschinenbauüblichen Toleranzen nur durch Hartbearbeitung hergestellt werden. Ansonsten ist mit üblichen Methoden nur etwas mehr als der Genauigkeitsgrad "grob" nach DIN 40680 [96, 97] erreichbar, was Toleranzen zwischen 3 und 5 % entspricht [67, 98]. In jüngster Zeit wird angestrebt, diese Werte mit Präzisionsverfahren bei der Formgebung auf unter 1 % zu senken [84]. Dies ist aber nur in Sonderfällen wirtschaftlich.

Die genannten Werte beziehen sich auf das fertige Keramikteil. Die Toleranzen der ungebrannten Formlinge werden weder in der Literatur noch in der Praxis spezifiziert. Daher wurde eine der laufenden Produktion entnommene Stichprobe von Tauchformen desselben Typs auf einer Koordinatenmeßmaschine überprüft. Mangels definierter Sollmaße für den weißtrockenen Zustand diente ein willkürlich ausgewähltes Referenzwerkstück als Bezugsnorm. Die Lage der Meßpunkte ist in Bild 26 wiedergegeben.

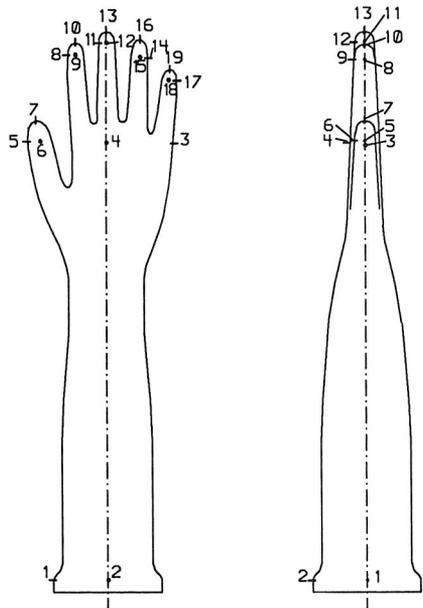


Bild 26: Meßpunkte an Tauchformen

In Bild 27 sind die gemessenen Abweichungen der Aufspannposition (Punkte 1, 2 und Verdrehung um die vertikale Achse) sowie die Schrägstellungen des Schaftes (Punkte 3, 4) aufgetragen. Unterschiedliche Symbole bedeuten verschiedene Werkstücke. Es ist deutlich zu erkennen, daß bereits diese Einflüsse Toleranzen von mehreren Millimetern verursachen.

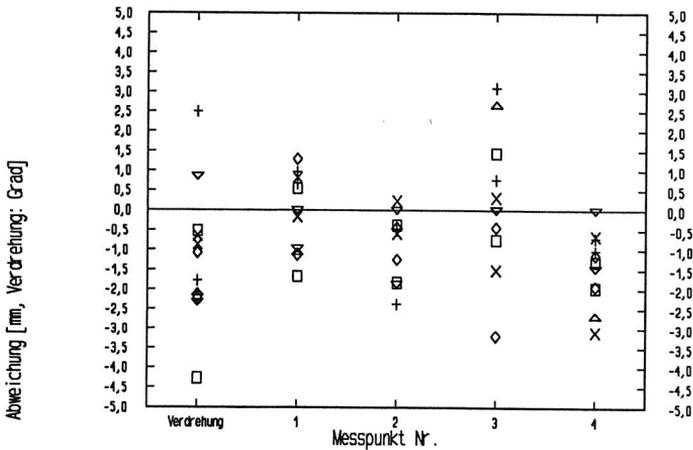


Bild 27: Lageabweichungen von Sockel und Handwurzel einer Stichprobe von Rohtauchformen

Bild 28 und Bild 29 zeigen die gemessenen Lageabweichungen in horizontaler Richtung an den Fingerspitzen der Werkstücke, wobei die zu dem selben Werkstück gehörenden Meßwerte durch Linien verbunden sind. Die Konfigurationsschwankungen betragen hier bis zu sechs Millimeter.

Ein großer Teil davon ist jedoch auf eine Fortpflanzung der Formfehler von Sockel und Schaft zurückzuführen. Hierzu gehören insbesondere Fehlstellungen der Sockelplatte, die separat vorgefertigt und in einer Art Insert-Technik vor dem Eingießen des Schlickers in die Gießformen eingelegt wird. Die daraus resultierenden Abweichungen lassen sich durch geeignete Berechnungen eliminieren. Zur Veranschaulichung des gewählten Ansatzes soll Bild 30 dienen. Hier wird die seitliche Lageabweichung Δ_{Ges} der Fingerspitzen einer Tauchform in drei Komponenten zersetzt:

$$\Delta_{Ges} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 \quad (3.8)$$

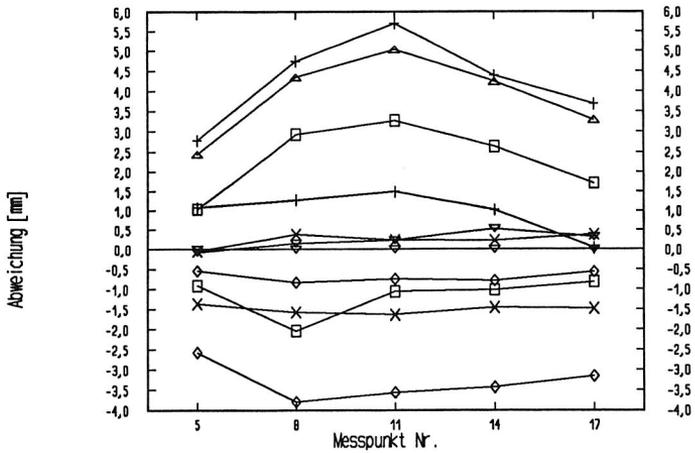


Bild 28: Positionsabweichungen der Fingerspitzen einer Stichprobe von Rohtauchformen in Richtung der Ebene der Handfläche

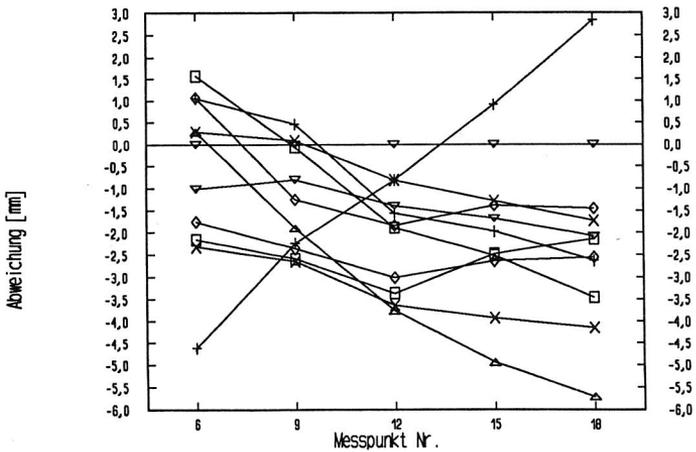


Bild 29: Positionstoleranzen der Fingerspitzen einer Stichprobe von Rohtauchformen senkrecht zur Handfläche

Diese Komponenten sind im Einzelnen:

1. Die aus einem Versatz des Aufspannschlitzes resultierende globale seitliche Verschiebung Δ_1 :

$$\Delta_1 = P1' \quad (3.9)$$

2. Der Anteil Δ_2 aus der Schrägstellung des Schaftes, wobei die in Höhe der Handfläche gemessene Verkantung mit Hilfe des Strahlensatzes auf die Höhe der Fingerspitzen projiziert werden muß:

$$\Delta_2 = (h_3 / h_2) \cdot (P2' - P1') \quad (3.10)$$

3. Die eigentliche Deformation Δ_3 des Fingers.

Der zusätzliche seitliche Versatz infolge einer verdrehten Aufspannung des ganzen Werkstücks ist vernachlässigbar klein.

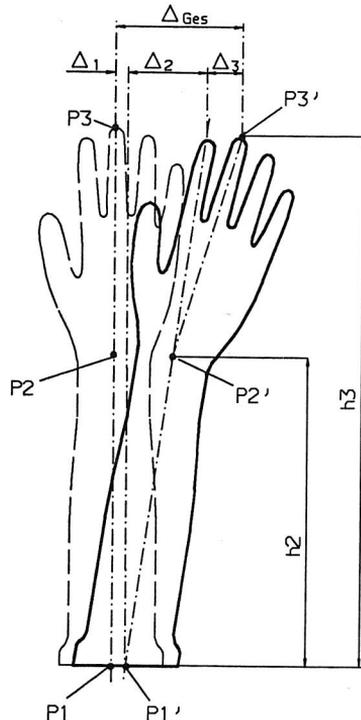


Bild 30: Komponenten der seitlichen Lageabweichung von Tauchformen-Rohlingen

Setzt man nun in die nach Δ_3 aufgelöste Gleichung (3.8) die Gleichungen (3.9) und (3.10) ein, so ergibt sich:

$$\Delta_3 = P3' - P1' - (h_3 / h_2) \cdot (P2' - P1') \quad (3.11)$$

Ein Vergleich der auf diese Weise korrigierten Werte für die seitliche Formabweichung, wie sie in Bild 31 aufgetragen sind, mit den ursprünglichen Werten in Bild 28 (gleicher Maßstab) zeigt, daß nunmehr bei rund 70 % der Werkstücke die Toleranz

unter einem Millimeter liegt, während bei einigen Werkstücken echte Verbiegungen der Finger infolge Entformfehlern um bis zu zwei Millimeter nachweisbar sind.

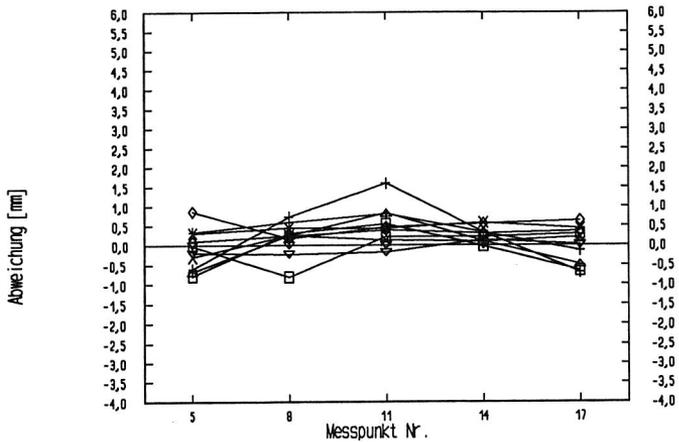


Bild 31: Um Aufspann- und Schaftformfehler korrigierte Positionsabweichungen der Fingerspitzen in Richtung der Ebene der Handfläche

Auf ähnliche Weise gelangt man zu einer Korrektur für die Abweichung in Querrichtung, also senkrecht zur Handfläche. Hier ist jedoch zusätzlich die Verdrehung der Aufspannung von Einfluß (Bild 32):

$$\Delta_4 = \pm s \cdot \sin \alpha \quad (3.12)$$

wobei das negative Vorzeichen für Finger rechts von der Mittelachse gilt. Die vollständige Querkorrektur beträgt somit:

$$\Delta_3 = P3' - P1' - (h_3 / h_2) \cdot (P2' - P1') \pm s \cdot \sin \alpha \quad (3.13)$$

Die anhand dieser Gleichung korrigierten Werte für die Querabweichungen sind in Bild 33 dargestellt. Auch hier konnte eine deutliche Verringerung des Toleranzfeldes erreicht werden. Die gleichmäßige Tendenz der Abweichungen über mehrere Finger hinweg deutet darauf hin, daß beim Entformen ein Aufstützen der Finger in der

Gießform oder eine Torsion der Handwurzel stattgefunden hat.

Bild 34 zeigt die gemessenen Toleranzen der Höhe der einzelnen Fingerspitzen. Sie betragen bis zu zwei Millimetern, sind also im Vergleich zu den unkorrigierten Seitentoleranzen gering. Einige Werkstücke weisen eine stetige Zunahme der Abweichung an den einzelnen Fingern auf, was auch für die Höhenlage auf einen Einfluß des Entformvorgangs hindeutet. In Bild 35 ist ein Versuch dargestellt, unterschiedliche Schaftlängen infolge Aufschwimmens der Sockelplatte beim Eingießen dadurch zu kompensieren, daß alle Höhenabweichungen auf den Mittelfinger bezogen werden. Die Streubreite ist deutlich verringert, aber nicht ganz aufgehoben.

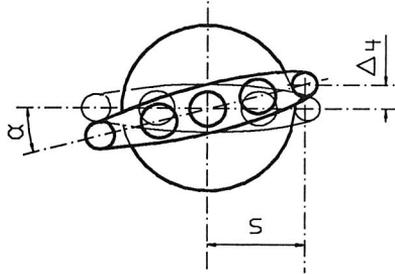


Bild 32: Einfluß des Verdrehwinkels

In Bild 35 ist ein Versuch dargestellt, unterschiedliche Schaftlängen infolge Aufschwimmens der Sockelplatte beim Eingießen dadurch zu kompensieren, daß alle Höhenabweichungen auf den Mittelfinger bezogen werden. Die Streubreite ist deutlich verringert, aber nicht ganz aufgehoben.

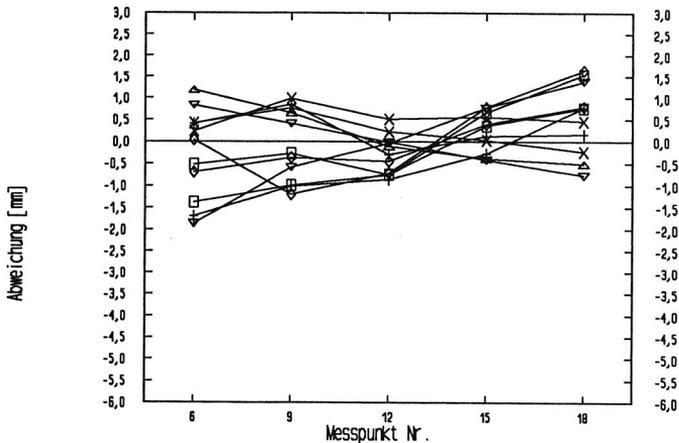


Bild 33: Um Aufspan- und Schaftformfehler korrigierte Positionstoleranzen der Fingerspitzen in Querrichtung

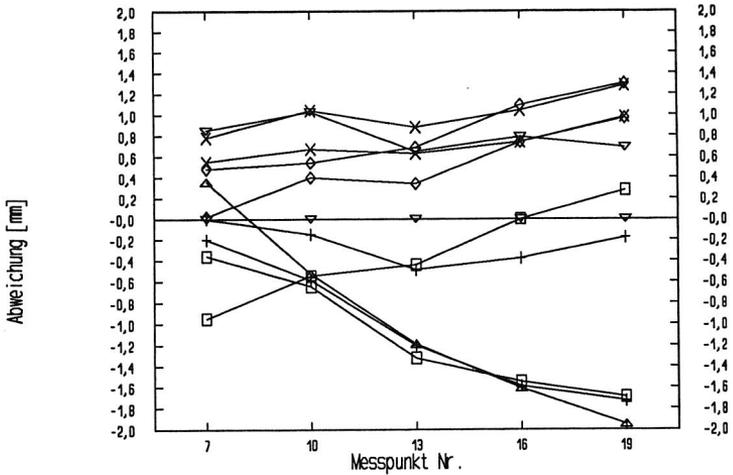


Bild 34: Höhenabweichungen der Fingerspitzen einer Stichprobe von Rohtauchformen

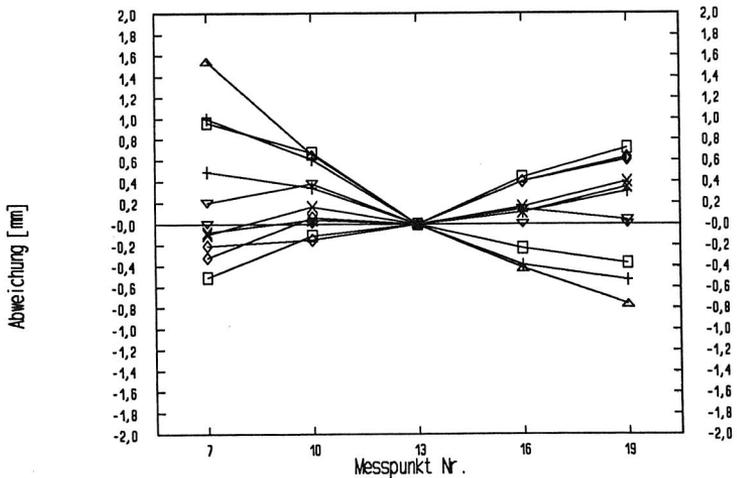


Bild 35: Höhenabweichungen der Fingerspitzen einer Stichprobe von Rohtauchformen, bezogen auf den Mittelfinger

Da Portliner aufgrund ihrer kleineren Abmessungen und steiferen Geometrie weniger anfällig gegen Entformfehler sind, ist hier die Streubreite der Form- und Maßabweichungen deutlich geringer. Ähnliche Messungen wie die oben für Tauchformen beschriebenen ergaben, daß die Formabweichung des Gratverlaufs bei 90 % aller Werkstücke unter 2 mm liegt.

3.6 Anforderungsprofil an das Verputzsystem

Wie sich gezeigt hat, sind die Einflußgrößen und Anforderungen beim automatischen Verputzen von Keramik sehr vielfältig (Bild 12). Hinzu kommt, daß nicht alle Randbedingungen vordefiniert und vorherbestimmbar sind. Dies gilt insbesondere für die Merkmale des Werkstücks selbst (Bild 19). Die Streubreite dieser Merkmalsausprägungen muß bei der Festlegung der Anforderungsliste berücksichtigt werden, bzw. es sind die zulässigen Toleranzen einzuschränken.

Bei Keramikartikeln mit besonders hohen Ansprüchen an die Oberflächenqualität (zum Beispiel Tauchformen) kann von der bisher üblichen Zweiteilung des Verputzens in Trockenbearbeitung und Verschwämmen nicht abgerückt werden, weil sich ohne die durch das Verschwämmen bewirkte Gefügehomoenisierung nach dem Brennen erneut ein Grat bilden würde. Bei anderen Produkten ist es möglich, das Verschwämmen entfallen zu lassen.

Der weißtrockene Zustand bietet für das automatisierte Entgraten einige Vorteile, weshalb er den weiteren Betrachtungen zugrunde gelegt werden soll. Es handelt sich hierbei um einen definierten, reproduzierbaren Werkstoffzustand, der sich gut bearbeiten läßt. Mit plastischen Deformationen des Werkstücks ist dabei nicht zu rechnen.

Um einen verfahrensgerechten Bahnverlauf sicherzustellen, sind wegen der räumlichen Anordnung vieler Grate mindestens vier Freiheitsgrade für das Entgratwerkzeug erforderlich. Dies setzt einen Roboter mit komplexer Kinematik (z.B. Sechs-Achsen-Gelenkroboter) voraus.

Bild 36 faßt das Anforderungsprofil zusammen, dem ein automatisches Verputzsystem genügen muß:

- * Möglichst weitgehend automatische Bearbeitung in einem Durchlauf
- * Entgraten am weißtrockenen Werkstück
- * Naßbearbeitung als optionaler zweiter Prozeßschritt
- * Integration in durchgehende Verfahrensketten bei Programmierung und Produktion sowie in übergeordnetes System zur Fertigungssteuerung, Produktions- und Qualitätsdatenerfassung möglich
- * Flexibilität für unterschiedliche Formen und Größen
- * Kleinster Gratfußradius in Gratrichtung 15 mm bei voller Bahngeschwindigkeit, mit reduzierter Geschwindigkeit 2 mm
- * Kleinste lichte Höhe über Gratfuß 6 mm
- * räumlicher Gratverlauf
- * Für weißtrockene Werkstücke aus Porzellan ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) und aus Aluminiumtitanat (Al_2TiO_5) geeignet, möglichst auch für weitere Werkstoffe
- * Restgrathöhe $< 0,1$ mm
- * Zulässiger Werkstückabtrag 0,2 mm; Abplattungen der Oberfläche nicht zulässig
- * Keine Induzierung von Rissen infolge Stoß-, Vibrations- oder großer Zugbeanspruchung des Werkstücks
- * Anpassung an Form- und Lagetoleranzen des Werkstücks
- * Kleinste Losgröße 100 Stück
- * Gießformen werden rechtzeitig vor Erreichen der Abnutzungsgrenze ersetzt

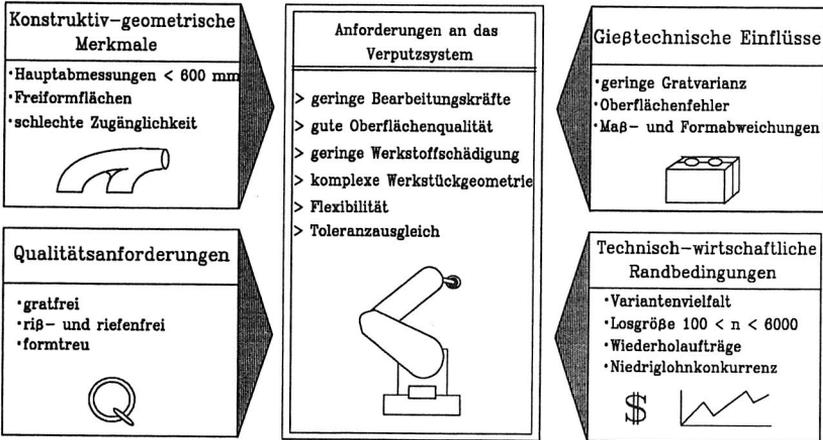


Bild 36: Anforderungsprofil an Systeme zum Verputzen von Schlickerguß

4 Auswahl von Verputzverfahren

4.1 Verfahrensalternativen beim Entgraten

Bei der Entwicklung einer robotergestützten Automatisierungslösung ist zu beachten, daß in vielen Fällen die bei manueller Arbeit bewährten Verfahren nicht optimal automatisierbar sind. Häufig kann durch Übergang auf ein anderes Fertigungsverfahren der Automatisierungsaufwand nennenswert reduziert werden. Dies gilt im vorliegenden Fall besonders hinsichtlich der in der keramischen Industrie gebräuchlichen manuellen Arbeitsweisen, die sich nur verhältnismäßig einfacher Werkzeuge bedienen.

Auch die bereits eingeführten maschinellen Verfahren für das Verputzen von Keramik sind für die gegebene Aufgabenstellung aufgrund der besonderen geometrischen Eigenschaften der zu bearbeitenden Werkstücke nicht ohne Modifikationen anwendbar. Wegen der völlig anderen Randbedingungen können auch die für das Verputzen von Metall- und Kunststoffteilen entwickelten Methoden nicht ohne Überprüfung auf den Bereich der Grünbearbeitung von Keramik übertragen werden.

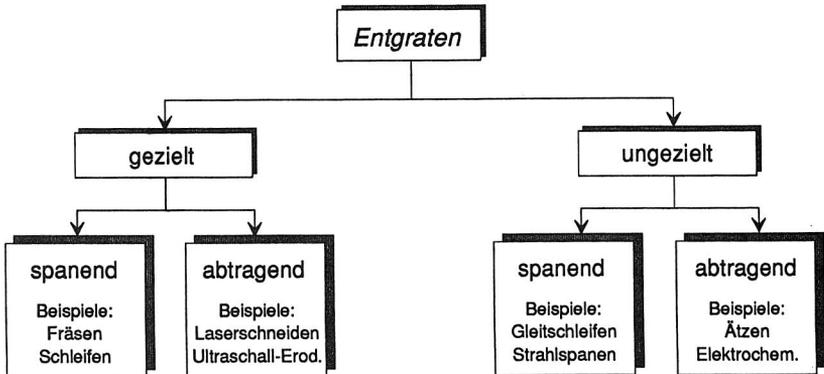


Bild 37: Systematik der Entgratverfahren nach DIN 8580

Die Entgratverfahren werden üblicherweise nach ihrer Wirkungsweise in gezielte und ungezielte Verfahren untergliedert (Bild 37). Innerhalb jeder dieser beiden Gruppen sind wiederum spanende und abtragende Verfahren zu unterscheiden. Der Kriterienkatalog für die Verfahrensauswahl beim Verputzen grüner Keramik (Bild 38) umfaßt sowohl Anforderungen an Wirtschaftlichkeit (W) und Fertigungsqualität (Q) als auch die speziellen technologischen Randbedingungen (T). Aufgrund dieser Kriterien ergibt sich bereits ohne nähere Betrachtung die Unbrauchbarkeit eines großen Teils der Konzepte.

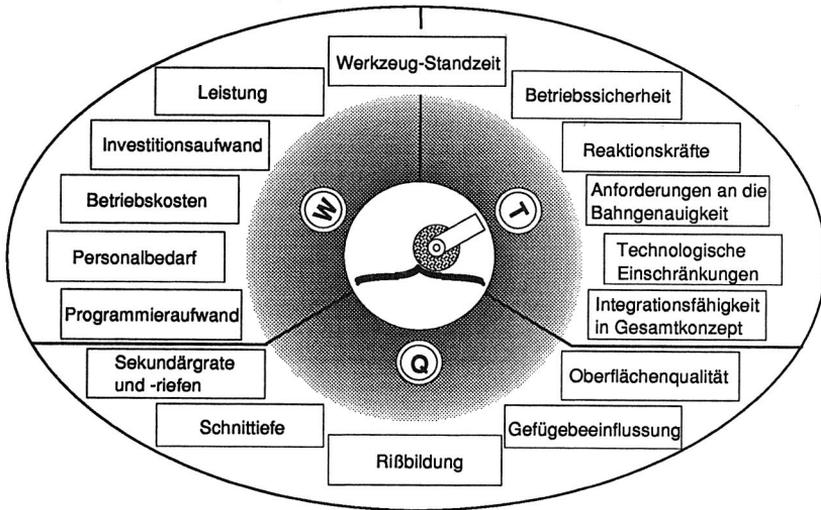


Bild 38: Kriterien bei der Bewertung von Verputzverfahren für die Anwendung mit Industrierobotern

Die ungezielten Verfahren, bei denen die gesamte Werkstückoberfläche der Einwirkung durch den Entgratprozeß ausgesetzt wird, kommen wegen ihrer geringen Abtragsleistung und der zu erwartenden Oberflächenbeeinträchtigung für den vorliegenden Einsatzfall nicht in Betracht [99]. Es ist vielmehr erforderlich, das Gratvolumen durch definierte Einwirkung auf den unmittelbaren Gratbereich zu entfernen. Die gezielt abtragenden Verfahren (Bild 39) können dabei wiederum nicht befriedigen, da sie allesamt durch einen hohen apparativen Aufwand bei gleichzeitig großem

Gefährdungspotential und problematischer Beherrschbarkeit der Prozeßüberwachung gekennzeichnet sind. Beim Elektroerodieren [33] und Laserschneiden [100, 101] wird der Werkstoff zudem durch Energieeinwirkung örtlich aufgeschmolzen, was zu Veränderungen der Eigenschaften des Scherbens führt. Es verbleiben daher als mögliche Entgratverfahren für weißtrockene Keramik lediglich die gezielt-spanenden Verfahren, bei denen der Gratwerkstoff von geeigneten Werkzeugen mechanisch abgetrennt und zerkleinert wird.

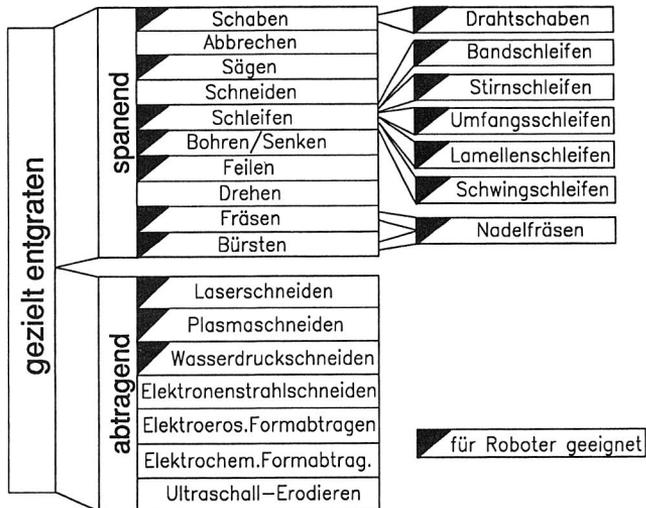


Bild 39: Verfahren zum gezielten Entgraten

4.2 Verfahrensauswahl für das Entgraten

Die spanenden Entgratverfahren wurden in Vorversuchen auf ihre Eignung für die vorliegende Bearbeitungsaufgabe überprüft. Hierbei zeigte sich schon sehr rasch, daß die meisten der gebräuchlichen Wirkprinzipien nicht brauchbar sind. So zeigten **Sägewerkzeuge** zwar eine hohe Abtragsleistung und können in der Ausführung als feine Bandsäge alle vorkommenden Gratverläufe bearbeiten. Der Werkzeugverschleiß ist gering, wegen der Elastizität des Sägebandes in Querrichtung auch die

Ansprüche an die Bahnengenauigkeit. Eine riefenfreie Bearbeitung war jedoch nicht zu erreichen.

Das **Fellen** erwies sich für weißtrockene Keramik wegen mangelhafter Selbstreinigung des Werkzeugs, schwieriger Anpassung an die Werkstückkontur und Riefenbildung als ungeeignet.

Fräsen mit Hartmetall-Schaftfräsern zeigte eine hohe Abtragsleistung und lange Werkzeug-Standzeiten, verbunden mit einer akzeptablen Oberflächenqualität. Bei geeigneter Wahl der Fräserform können alle vorkommenden Gratverläufe bearbeitet werden, wobei sich jedoch ein Werkzeugwechsel während der Bearbeitung nicht immer vermeiden läßt. Als sehr nachteilig ist jedoch anzusehen, daß sich wegen des extrem geringen Zerspanwiderstands weißtrockener Keramik schon kleine Differenzen zwischen Werkzeugstellung und Gratfußlage in Gestalt von Restgraten bzw. Kerben auf dem Werkstück abbildeten. Ein passiver Toleranzausgleich durch eine elastische Werkzeugaufhängung, wie er in Kapitel 6.1.1 näher beschrieben wird, ist aus dem selben Grund nicht möglich.

Die Resultate beim Entgraten mit **Bürsten** hingen stark von der Art der verwendeten Borsten ab. Mittelharte bis harte Typen hinterlassen unzulässig tiefe Riefen in der Werkstückoberfläche, während weiche, nachgiebige Borsten keinen nennenswerten Werkstoffabtrag bewirken. Probleme sind auch in der geringen Zerspanleistung, der wenig selektiven Wirkungsweise und der schlechten Zugänglichkeit an Engstellen zu sehen.

Bei den Werkzeugen zum **Schleifen** wurden verschiedene Bauarten erprobt. Allgemein ergab das Schleifen eine sehr glatte Oberfläche. Dies gilt besonders für feinen Schleifschmirgel, der sich aber relativ rasch zusetzt, so daß die Werkzeugstandzeit nicht befriedigt. Ebenfalls recht gut verhielten sich Scheiben aus Scheuerfilz, jedoch bleibt die Abtragsleistung erheblich hinter der von anderen Schleifwerkzeugen zurück. Die Werkzeug-Reaktionskräfte sind beim Schleifen mit Werkzeugen relativ großen Durchmessers deutlich höher als beim Fräsen, daher sind die Anforderungen an die Bahnengenauigkeit geringer und die Möglichkeiten für einen passiven Toleranzausgleich besser. Lamellen- und insbesondere Bandschleifer besitzen sogar

eine gewisse inhärente Nachgiebigkeit, die für einen Ausgleich von Bahnfehlern genutzt werden kann. Die sogenannten Elastik-Schleifkörper, die eigentlich für härtere Werkstoffe gedacht sind, versagten hier. Die Anforderungen an die Zugänglichkeit zum Grat und an den kleinsten Gratfußradius können jedoch nur von kleinen, starren Profilschleifkörpern erfüllt werden.

Gemeinsames Problem aller rotierenden und intermittierend bewegten Werkzeuge ist die Bruchgefährdung der Werkstücke infolge unwuchtbedingter Vibrationen bei der Bearbeitung. Hinzu kommt bei Werkzeugen mit starrem Wirkkörper noch die Notwendigkeit, diese zur Vermeidung von Restgraten genau in Richtung der Tangente des Gratfußprofils anzusetzen, da wegen der nicht konstanten Werkstück-Querschnitte keine Profilierungen des Werkzeugs möglich sind.

Die letztgenannte Schwierigkeit gilt auch für das **Schaben** mit federnd angedrückten Klingen. Dieses Verfahren gestattet aber hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten und ergibt gute Oberflächen bei geringem Werkzeugverschleiß. Die Staubentwicklung war deutlich geringer als bei den anderen Verfahren. Zur Einhaltung der richtigen Span- und Tangentenwinkel sind bei komplizierten Gratverläufen schnelle und komplexe Orientierungsänderungen des Werkzeugs erforderlich. Grate mit kleinen Fußradien in Längsrichtung können in vielen Fällen wegen der Breite der Klinge nicht erreicht werden.

Eine Variante mit einem federnd vorgespannten Stahldraht als Schabwerkzeug zeigte sich diesbezüglich in den meisten Fällen deutlich überlegen. Der geringe Durchmesser des Drahtes gestattet die Bearbeitung kleinster Radien und auch von grob geriffelten Oberflächen. Besonders hervorzuheben sind die geringen Anforderungen an die Orientierung des Werkzeugs und die prinzipimmanente Fähigkeit zu einem Toleranzausgleich von mehreren Millimetern [92, 99]. Da Gießgrate wegen der notwendigen Aushebbarkeit des Formlings nur an Stellen mit mindestens einem konvexen Querschnittsprofil vorkommen können, ist die Zugänglichkeit für einen Schabdraht gewährleistet. Außenradien mit $r_w < 10$ mm müssen jedoch sehr genau abgefahren werden, um ein Verhaken des Drahtes zu vermeiden.

In Bild 40 sind die Versuchsergebnisse hinsichtlich der Eignung der verschiedenen Werkzeugtypen zusammengefaßt. Bei der Verfahrensauswahl wurden zunächst alle Verfahren ausgeschieden, die bei einem der ersten vier, die Einsatztauglichkeit entscheidend bestimmenden Kriterien eine sehr schlechte Bewertung erhalten hatten. Eine Nutzwertanalyse der verbliebenen Verfahren Schleifen und Schaben mit ihren Varianten zeigte für das Drahtschaben die eindeutig beste Bewertung. Daher wurde dieses Verfahren für die Trockenbearbeitung ausgewählt. Für Stellen, die nur einseitig zugänglich sind, oder an kleinen Außenradien kann ergänzend auf das Schaben mit einer Klinge zurückgegriffen werden.

Kriterium Verfahren	Abtrag- leistung	Oberflächen- qualität	Werkzeug- standzeit	erl. Bahn- genauigkeit	Werkzeuggewicht, Werkzeugkosten	für alle Geom. geeignet	Komplexität der Handhabung	Gesamt- bewertung
Fräsen	++	+	++	--	-	++	+	--
Sägen	++	--	++	-	--	--	+	--
Bürsten	--	--	+	+	-	-	+	--
Stirnschleifen	+	++	o	o	-	-	-	-
Bandschleifen	+	++	o	++	-	o	+	o
Lamellen- schleifen	+	++	o	+	-	--	o	--
Umfang- schleifen	+	+	-	-	-	++	+	-
Schaben	+	+	++	+	++	o	-	o
Drahtschaben	++	+	++	++	++	+	++	++

++ sehr gut + gut o mäßig - schlecht -- sehr schlecht (K.O.-Kriterium)

Bild 40: Beurteilung spanender Entgratverfahren für Keramik

4.3 Verfahrensalternativen beim Verschwämmen

Wesentliches Merkmal der Naßbearbeitung ist eine Behandlung des Formling durch flächige Reibbewegungen unter gleichzeitiger Benetzung mit Wasser. Dieses Prinzip wird durch das Ziel des Fertigungsvorgangs - eine Gefügehomoogenisierung an der Oberfläche - vorgegeben. Die Entwicklungsaufgabe beschränkt sich daher auf Ausführung und Anordnung des Wirkmediums und der Hilfsfunktionen. Im einzelnen sind in einem automatischen Verschwämmwerkzeug folgende Funktionen zu implementieren:

- * Wirkmedium benässen
- * Wirkmedium halten und führen
- * Wirkbewegung erzeugen
- * Wirkmedium reinigen
- * Anpassung an Werkstück-Kontur

Gegenüber der beim manuellen Verschwämmen angewendeten intermittierenden Arbeitsweise mit einem Handschwamm ist wegen der einfacheren Handhabung und der geringeren Nebenzeiten ein kontinuierlich arbeitendes Verfahren als die für eine Automatisierung grundsätzlich bessere Lösung anzusehen.

Die meisten der im Einsatz befindlichen Verputzmaschinen für Geschirroware erfüllen die genannten Funktionen dadurch, daß das Werkstück auf einem Drehteller an rotierenden Walzen aus schwammartigem Schaumstoffmaterial entlang geführt wird. Die Bewässerung des Schwamms erfolgt auf der dem Werkstück abgewandten Seite mittels einer Brause. Eine darunter angeordnete, gegen den Schwamm laufende Rolle preßt diesen wieder aus und macht ihn gleichzeitig für das Wasser aufnahmefähiger. Für das Verschwämmen von Hohlware existieren ferner Maschinen mit umlaufenden Bändern, auf die senkrecht Schwammstreifen geklebt sind, die zunächst über den Rand des zu bearbeitenden Gefäßes streichen und dann in dessen Innenseite klappen (Bild 10). Für das vorliegende Werkstückspektrum sind beide Konzepte wegen der schlechten Zugänglichkeit insbesondere der Bereiche zwischen den Fingerspitzen von Tauchformen nicht geeignet.

Das wasseraufnehmende Wirkmedium (der Einfachheit halber im folgenden unabhängig von der tatsächlichen Ausführung als Schwamm bezeichnet) muß für eine brauchbare Lösung so gestaltet werden, daß es einerseits klein genug ist, um in Engstellen eindringen zu können, andererseits aber fest genug, um eine genügende Anpreßkraft aufzubringen. Gleichzeitig muß der Wirkkörper so elastisch sein, daß Bahnfehler und Gestaltabweichungen ausgeglichen werden können, und die Wirkfläche muß für eine wirtschaftliche Bearbeitung groß genug sein.

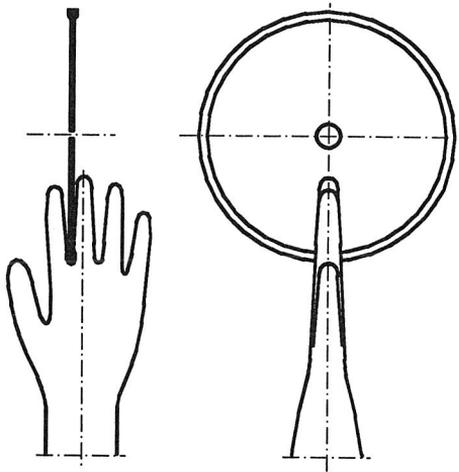


Bild 41: Prinzip des Verschwämmens mit Schwammscheibe

Diese Forderungen können von zwei verschiedenen Lösungen erfüllt werden. Das eine Konzept sieht vor, eine Schwammwalze so schmal zu gestalten, daß sie zwischen nahe beieinanderliegende Flächen paßt, und sie gleichzeitig im Durchmesser so zu vergrößern, daß sie von der Seite her in solche Spalte eingeschoben werden kann (zum Beispiel zwischen die Finger von Tauchformen, Bild 41). Um die relativ dünne Schwammscheibe am Ausknicken zu hindern, wird sie zwischen zwei etwas kleineren Stützscheiben aus Stahl eingespannt. Starkes Zusammenpressen der Stützscheiben bewirkt, daß der Schwamm über deren Außenumfang quillt, wodurch die Metallteile vollständig umschlossen werden und auch eine Bearbeitung von Flächen parallel zur Scheibenebene, zum Beispiel der Finger-Längsseiten,

möglich ist (Bild 42). Die Wirkbewegung wird durch Rotation der Scheibe um ihren Mittelpunkt erzeugt. Zum Benässen und Ausdrücken des Schwamms dient eine Anordnung aus Rolle und Brause ähnlich wie bei den Sondermaschinen. Die Konturanpassung erfolgt durch Ausnutzung der Elastizität des über die Stützscheiben hinausstehenden Schwammteiles sowie ergänzend durch eine gedämpft-elastische Verbindung des ganzen Werkzeugs mit dem Handhabungsgerät.

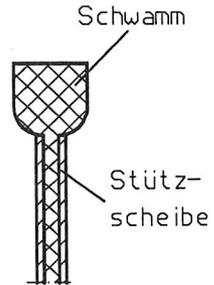


Bild 42: Schwamm mit Stützscheiben

Das andere Prinzip geht von einem endlosen Schwammband aus, das nach Art eines Bandschleifers mit Umlenkrollen um das Werkstück geführt und nachgiebig vorgespannt wird [92]. Normalerweise wird das Band tangential am Werkstück entlang geführt (Bild 67, Seite 91). Bei eingeschränkter Zugänglichkeit der Werkstück-Oberfläche kann das Band transversal eingeschoben werden, wobei sehr eng beeinander stehende Flächen durch die beiden Seiten des Bandes gleichzeitig bearbeitet werden können (Bild 49).

4.4 Verfahrensauswahl für das Verschwämmen

Zur Auswahl der besten Lösung wurden beide Bauweisen von Schwammwerkzeugen experimentell untersucht. Bild 43 und Bild 44 zeigen das Werkzeug nach dem Scheibenprinzip. Um Taumelbewegungen der Stützscheiben (2) des Schwamms (1) zu verhindern, werden diese von Kurvenrollen (3) zwangsgeführt. Der Spanndorn übernimmt lediglich die radiale Führung der Scheiben sowie die Übertragung des Drehmoments vom Antriebsmotor (6). Der Gedanke, die Schwammscheibe durch Umschäumen einer einzelnen, zentralen Stützscheibe zu realisieren, konnte wegen der hohen Werkzeugkosten für die erforderliche Schäumform nicht weiterverfolgt werden. An der Auspreßwalze (8) wird der Schwamm über eine einstellbare Düse (7) wieder mit Frischwasser benetzt. Ein Gehäuse (9) mit abnehmbarem Deckel (10) dient als Spritzschutz. Das aus dem Werkzeug austretende Wasser wird in einer Auffangwanne gesammelt.

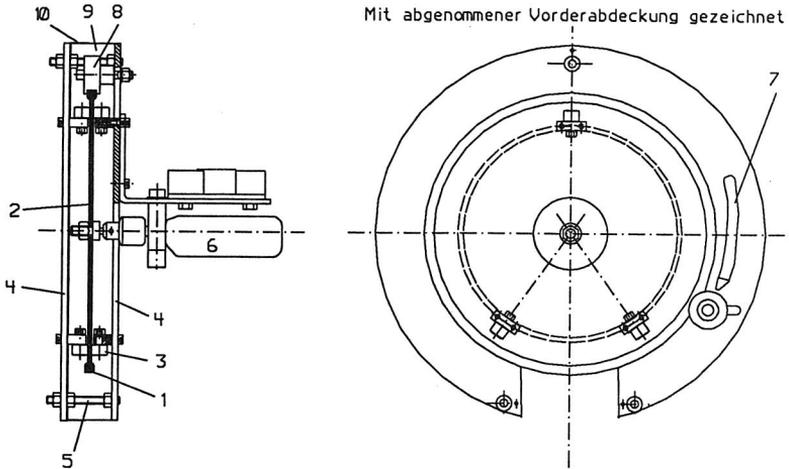


Bild 43: Werkzeug zum Verschwämmen weißtrockener Keramik (Scheibenprinzip)

Prinzipbedingt kann beim Scheibenwerkzeug ein nicht unbeträchtlicher Teil des Werkstücks nur lateral, das heißt mit parallel zur Oberfläche stehender Scheibe, angefahren werden. Die nicht voll befriedigende Bearbeitungsqualität hat ihre Ursache allerdings hauptsächlich darin, daß gewisse Verwerfungen des Schwammes beim Einspannen zwischen den Stützscheiben nie ganz vermieden werden können. Die daraus resultierende Unrundheit der Schwammzscheibe führt bei ihrer Rotation zu zyklischen Relativbewegungen auf der Werkstückoberfläche und damit zur Entstehung von Riefen und "Moränen" auf dem Werkstück. Hinzu kommt die Bildung von Schlieren durch Wasser, welches aus dem Werkzeug austritt und über das Werkstück abströmt.

Aufgrund der erforderlichen großen Stützscheiben ist die Wirkfläche des Scheibenwerkzeugs nur relativ klein. Daher müssen zur vollständigen Bearbeitung der Oberfläche eines Werkstücks sehr lange Wege zurückgelegt werden. Bedingt durch die starre Führung mittels Kurvenrollen ist die Nachgiebigkeit des Werkzeugs in axialer Richtung nur gering. Ungenauigkeiten der Bahn und Seitenschlag des Werkzeugs führen deshalb leicht zum Abbrechen des Formlings. Auch in radialer Richtung steht

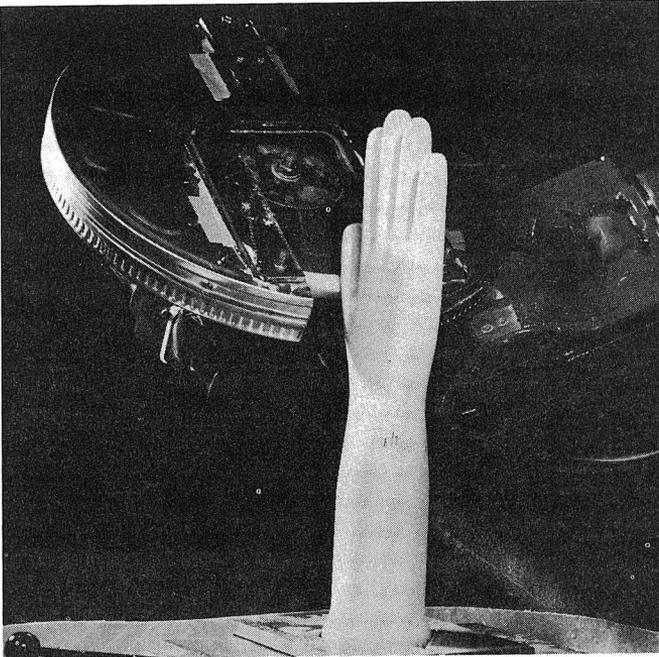


Bild 44: Verschwämmwerkzeug in Scheiben-Bauart im Eingriff

nur ein kleiner Ausgleichsweg zur Verfügung, bevor die Stützscheiben an das Werkstück anlaufen.

Demgegenüber erwies sich das Bandwerkzeug als gut geeignet. Es wurde daher für die weiteren Versuche ausgewählt. Sein genauer Aufbau und die damit erzielten Ergebnisse werden im nachfolgenden Kapitel näher beschrieben.

5 Experimentelle Untersuchung der gewählten Verfahren

5.1 Versuchsaufbau und Werkzeuge

Die ausgewählten Wirkprinzipien für das Entgraten und Verschwämmen wurden eingehenderen Untersuchungen unterzogen. Hierzu erfuhren die Werkzeuge aufgrund der praktischen Erfahrungen diverse Modifikationen. Der Grundriß des Versuchsaufbaus ist in Bild 45 zu sehen. Zum Aufspannen der Probewerkstücke dienen Vorrichtungen mit manuell betätigten Niederzugspannern, welche in das Eingußloch in der Bodenplatte der Werkstücke eingreifen. Zwar wäre eine Aufspannung mit Vakuumelementen den Werkstoffeigenschaften angepaßter gewesen (reine Druckbeanspruchung), doch zeigte sich, daß Zentriergenauigkeit und Haltekraft bei den verhältnismäßig kleinen und unebenen Aufstellflächen der Teile nicht ausreichen. Die Handhabung der Werkzeuge erfolgte mit einem sechsachsigen Industrieroboter in Knickarm-Bauweise, der mit einem Werkzeug-Wechselsystem versehen war.

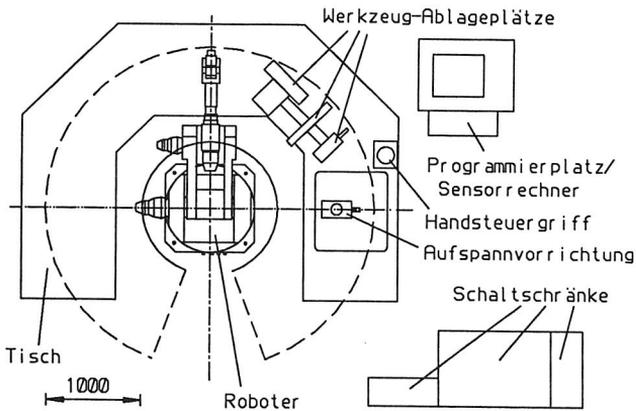


Bild 45: Grundriß des Versuchssystems

Das Werkzeug zum Drahtschaben ist in Bild 46 und Bild 47 dargestellt. Als tragendes Element dient ein Stahlbügel (1), der um das größte in Frage kommende Werkstück herumreicht. Somit kann der Formling in einem Zug umfahren werden, ohne die Orientierung des Werkzeugs zu ändern. Der Schabdraht (2) läuft vom Festpunkt über zwei kugelgelagerte Umlenkrollen (3) zu einem Pneumatikzylinder (4), der die Spannkraft aufbringt. Diese ist damit unabhängig von der Auslenkung des Drahtes. Der Druck im Spannzylinder und damit die Drahtvorspannung kann über ein Proportional-Druckregelventil gesteuert werden. Zur Abführung des bei der Bearbeitung abgetragenen Materials bietet sich eine Absaugeinrichtung an, deren Düse am Werkzeug in der Nähe des Eingriffspunkts plaziert wird.

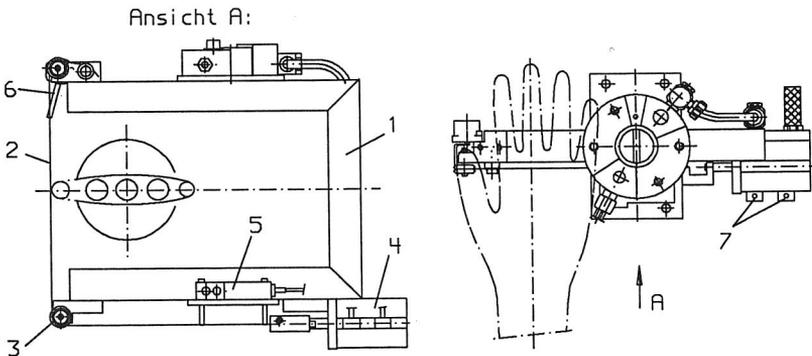


Bild 46: Werkzeug zum Entgraten weißtrockener Keramik durch Drahtschaben

Zum Verschwämmen diente das Werkzeug, das in Bild 48 und Bild 49 zu sehen ist. Bei ihm wird ein endloses Band (1) aus Schwamm-Material von Umlenkrollen (2) um das Werkstück geführt. Eine der Umlenkrollen ist an einem Spannhebel (4) befestigt. Der Antrieb des Bandes erfolgt von einem Elektromotor (5) über eine Reibrolle (3), die gleichzeitig auch als Gegenrolle für die Auspreßwalze (7) wirkt. Unmittelbar dahinter wird der Schwamm über eine einstellbare Düse (6) mit Wasser benetzt. Der Antriebsmotor ist stufenlos drehzahlregelbar und kann in seiner Drehrichtung umgeschaltet werden. Das nicht vom Schwamm aufgenommene Wasser wird von einem Gehäuse (8) aufgefangen und über einen separaten Ablauf abgeleitet.

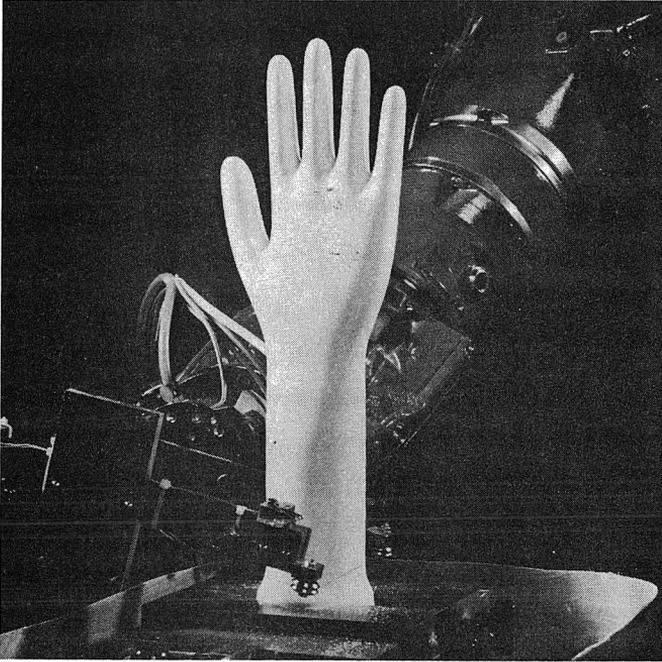


Bild 47: Drahtwerkzeug beim Entgraten einer Tauchform

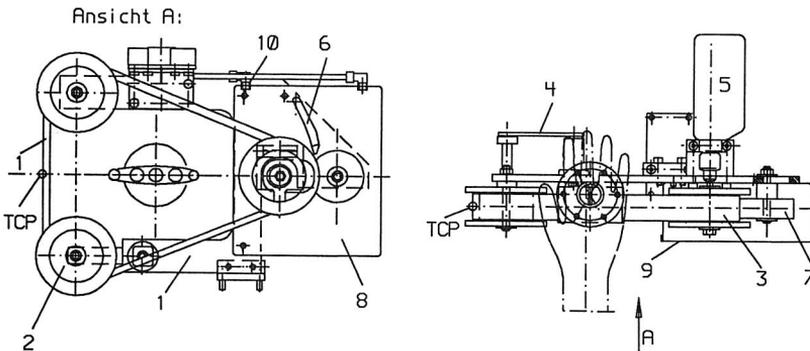


Bild 48: Werkzeug zum Verschwämmen von Keramik nach dem Bandprinzip

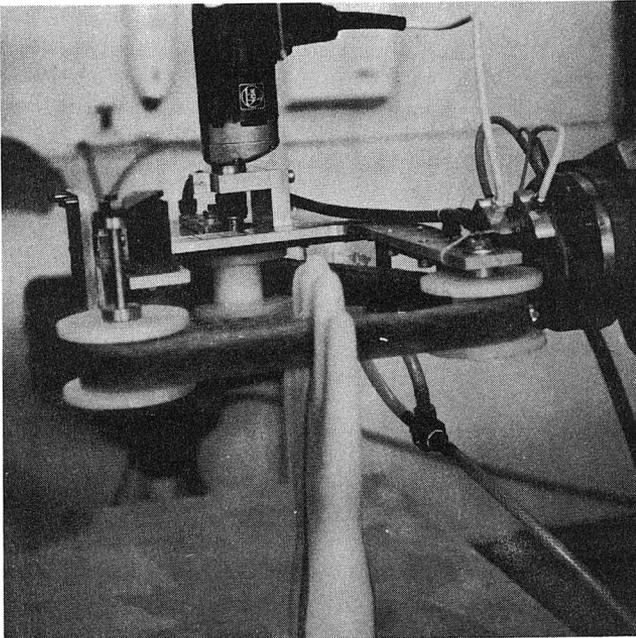


Bild 49: Band-Werkzeug beim Verschwämmen einer Tauchform

5.2 Grundlegende mechanische Betrachtungen am Entgratwerkzeug

5.2.1 Einfluß der Umlenkrollen

Da der Draht nicht über eine scharfe Kante, sondern von Umlenkrollen geführt wird, wälzt sich dieser bei Auslenkbewegungen darauf ab, so daß sich der effektive Stützpunktabstand a um den Betrag Δa verringert (Bild 50):

$$\frac{\Delta a}{2} = \frac{d_R}{2 \cdot \sin \alpha} \quad (5.1)$$

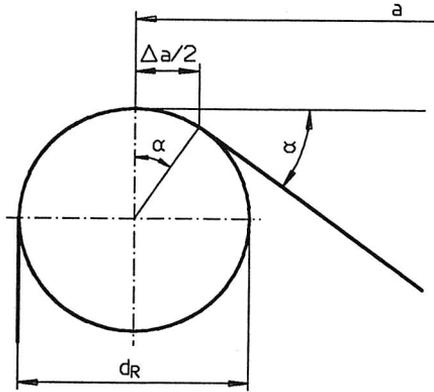


Bild 50: Abwälzen des Schabdrahtes über Umlenkrolle

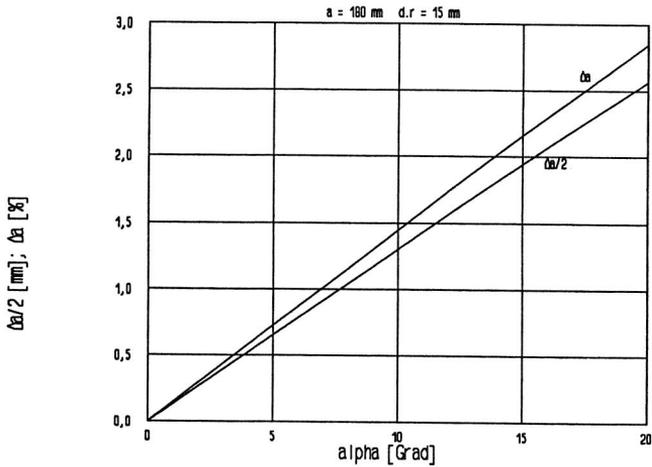


Bild 51: Zusammenhang zwischen Drahtauslenkung α und Änderung des Stützpunktabstandes a für ein ausgeführtes Werkzeug

Wählt man den Durchmesser d , der Umlenkrollen nicht zu groß, dann bleibt Δa für realistische Auslenkwinkel ($\alpha < 15^\circ$) vernachlässigbar klein (Bild 51) und es kann mit $a = \text{konst.}$ gerechnet werden. Dies sei hier in allen Rechnungen vorausgesetzt.

5.2.2 Auslenkung und Längenänderung des Drahtes infolge Zustellbewegung

Für den Zusammenhang zwischen der Zustelltiefe f des Werkzeugs und dem Auslenkwinkel α des Schabdrahtes ist aus Bild 52 ersichtlich, daß

$$f = |\overline{AX}| - |\overline{BX}|$$

$$f = \frac{a}{2} \cdot \tan \alpha + r_w \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos \alpha}\right) \quad (5.2)$$

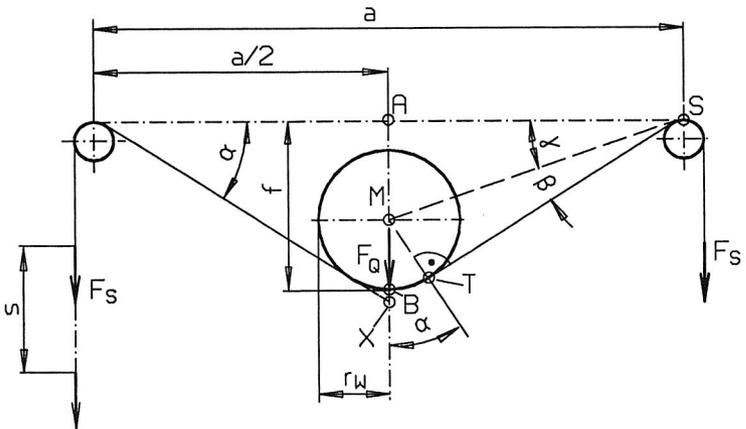


Bild 52: Geometrie des Schabdrahtes

Beim vorliegenden Werkstückspektrum ($r_w < 80$ mm) ist bei funktionsfähigen Werkzeugen $a > 150$ mm, $f < 20$ mm. Damit wird der zweite Summand relativ klein; die Differenz zwischen Gleichung (5.2) und der Annäherung

$$f = \frac{a}{2} \cdot \tan \alpha \quad (5.3)$$

liegt unter 10 %.

Die Verschiebung s des Drahtendes beim Anfahren an ein Werkstück ist die Differenz aus dem Weg STBTS in Bild 52 und dem Stützpunktabstand a :

$$\begin{aligned} s &= 2 \cdot (|\overline{BT}| + |\overline{TS}|) - a \\ &= l + 2 \cdot (\sqrt{M^2 - r_w^2}) - a \end{aligned}$$

wobei

$$l = |\overline{TBT}| = 2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \alpha}{360^\circ} \quad (5.4)$$

$$M = |\overline{MS}| = \sqrt{\frac{a^2}{4} + (f - r_w)^2} \quad (5.5)$$

also

$$s = \frac{\pi \cdot r_w \cdot \alpha}{90^\circ} + \sqrt{a^2 + 4 \cdot f^2 - 8 \cdot f \cdot r_w} - a \quad (5.6)$$

Der Auslenkwinkel α kann hierfür durch Zerlegung in die Winkel β und γ , die in den rechtwinkligen Dreiecken TMS bzw. AMS in Bild 52 enthalten sind, gewonnen werden:

$$\alpha = \beta + \gamma$$

$$\alpha = \arcsin \frac{r_w}{M} + \arcsin \frac{f - r_w}{M} \quad (5.7)$$

oder angenähert aus Gleichung (5.3).

5.2.3 Äußere Kräfte am Schabdraht

Die Vorspannkraft F_s eines infolge einer Querkraft F_Q durchgebogenen Trägers läßt sich in ihre Komponenten in Richtung der Koordinatenachsen zerlegen (Bild 53):

$$F_{sx} = F_s \cdot \cos \alpha \quad (5.8)$$

$$F_{sy} = F_s \cdot \sin \alpha \quad (5.9)$$

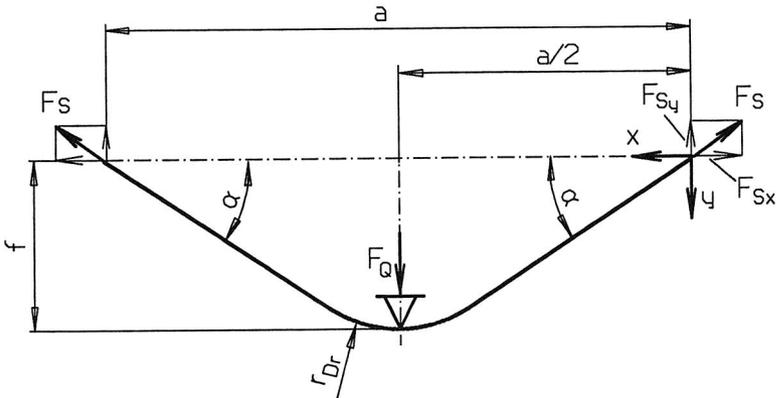


Bild 53: Vorgespannter Träger unter Querkraftbelastung

Damit können die Kräftegleichgewichte sowie das Momenten-Gleichgewicht bezüglich des Angriffspunktes B der Querkraft aufgestellt werden, wobei zentrische Lage von B sowie symmetrischer Kraftangriff vorausgesetzt seien:

$$\begin{aligned}\Sigma F_x: F_{sx} - F_{sx} &= 0 \\ 0 &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma F_y: F_Q - F_{sy} - F_{sy} &= 0 \\ F_Q = 2 \cdot F_{sy} = 2 \cdot F_s \cdot \sin \alpha &\end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned}\Sigma M_b: F_{sx} \cdot f - F_{sy} \cdot a/2 - F_{sx} \cdot f + F_{sy} \cdot a/2 &= 0 \\ 0 &= 0\end{aligned}$$

Nutzt man bei der Zerlegung von F_s einen anderen Zusammenhang, nämlich den Satz des PYTHAGORAS, so erhält man:

$$F_s^2 = F_{sx}^2 + F_{sy}^2 \quad (5.11)$$

Mit den Gleichungen (5.8) und (5.10) wird daraus:

$$\begin{aligned}F_s^2 &= F_s^2 \cdot \cos^2 \alpha + F_Q^2/4 \\ \cos \alpha &= \sqrt{1 - \frac{F_Q^2}{4 \cdot F_s^2}}\end{aligned} \quad (5.12)$$

bzw.

$$F_Q = 2 \cdot F_s \cdot \sqrt{(1 - \cos^2 \alpha)} \quad (5.13)$$

Nach Ersetzen der Sinusfunktion in (5.10) durch den Zusammenhang zwischen Auslenkwinkel und Zustelltiefe gemäß Gleichung (5.3) ergibt sich schließlich noch der Zusammenhang zwischen Zustelltiefe f , Vorspannkraft F_s und Normalkraft F_Q des Drahtes auf die Werkstückoberfläche:

$$F_Q = \frac{2 \cdot F_s}{\sqrt{1 + \frac{a^2}{4 \cdot f^2}}} \quad (5.14)$$

Da in Vorschubrichtung gleiche geometrische Verhältnisse vorliegen, gilt diese Gleichung analog auch für die Beziehung zwischen Nachschlepplänge (Durchbiegung des Drahtes in Vorschubrichtung) und Vorschubkraft.

5.2.4 Biegelinie des Schabdrahtes

Zur Klärung der Frage, unter welchen Bedingungen der im Entgratwerkzeug verwendete vorgespannte Stahldraht als biegeschlaff angesehen werden kann bzw. welcher Biegeradius für die nachfolgenden Rechnungen zugrunde zu legen ist, muß zunächst dessen Biegelinie bestimmt werden. Die im Maschinenbau üblichen Formeln berücksichtigen jedoch die Auswirkungen von Vorspannkraften in Längsrichtung auf Biegung beanspruchter Träger nicht, während die Regelwerke im Bauwesen vereinfachend von einer konstanten Richtung der Vorspannkraft parallel zur Achse des unbelasteten Balkens ausgehen.

Das Gleichgewicht der Biegemomente an einem beliebigen Punkt des Balkens gemäß Bild 53 lautet (vgl. [102])¹:

$$M_b(x) = F_{sy} \cdot x - F_{sx} \cdot y = -E \cdot J \cdot y'' \quad (5.15)$$

Hierbei wurde - wie sich noch zeigen wird, zu Recht - vereinfachend angenommen, daß der Draht nur kleinen Verformungen unterliegt, also keine Verwölbungen der Querschnitte auftreten. Im anderen Fall hätte der Term auf der rechten Seite noch durch den Ausdruck $[1 + (y')^2]^{3/2}$ dividiert werden müssen, was zu wesentlich komplizierteren Lösungen führen würde. Ebenso wurde das aus der Biegung des Drahtes an den Umlenkrollen herrührende konstante Zusatzmoment vernachlässigt, welches - wie bereits die Abschauung zeigt - bereits nach wenigen Millimetern freier Drahtlänge wieder abgebaut ist.

¹ Für die Unterstützung bei der Aufstellung und Lösung der Differentialgleichung für die Biegelinie danke ich Herrn Dr. sc. tech. habil. J. Nickel vom Lehrstuhl für Technische Mechanik der Universität Erlangen-Nürnberg.

Es seien nun die folgenden Abkürzungen definiert:

$$P = \sqrt{\frac{F_{Sx}}{E \cdot I}} \quad (5.16a)$$

$$Q = \frac{F_{Sy}}{F_{Sx}} \quad (5.17a)$$

oder zusammen mit den Gleichungen (5.8) und (5.9):

$$P = \sqrt{\frac{F_s \cdot \cos \alpha}{E \cdot I}} \quad (5.16b)$$

$$Q = \frac{2 \cdot F_s \cdot \sin \alpha}{2 \cdot F_s \cdot \cos \alpha} = \tan \alpha \quad (5.17b)$$

bzw. mit den Gleichungen (5.10) und (5.12):

$$P = \sqrt{\frac{\sqrt{F_s^2 - F_0^2/4}}{E \cdot I}} \quad (5.16c)$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{(2 F_s / F_0)^2 - 1}} \quad (5.17c)$$

Je nachdem, in welcher Form die Abkürzungen verwendet werden, können die nachfolgenden Gleichungen mit bekannter Zustellkraft F_0 oder bekanntem Auslenkwinkel α gelöst werden.

Werden mit diesen Abkürzungen die entsprechenden Terme in Gleichung (5.15) ersetzt, nimmt die Differentialgleichung der Biegelinie folgende Form an:

$$y'' - P^2 \cdot y = - P^2 \cdot Q \cdot x \quad (5.18)$$

mit den Randbedingungen

$$y(0) = y(a) = 0 \quad (I)$$

$$y'(a/2) = 0 \quad (II)$$

Die Lösung der Differentialgleichung (5.18) sowie deren erste und zweite Ableitung lauten dann:

$$y(x) = Q \cdot \left[x - \frac{\sinh(x \cdot P)}{P \cdot \cosh(a/2 \cdot P)} \right] \quad (5.19)$$

$$y'(x) = Q \cdot \left[1 - \frac{\cosh(x \cdot P)}{\cosh(a/2 \cdot P)} \right] \quad (5.20)$$

$$y''(x) = -Q \cdot P \cdot \frac{\sinh(x \cdot P)}{\cosh(a/2 \cdot P)} \quad (5.21)$$

Für $x = 0$ folgen daraus die Bedingungen an den Einspannstellen des Drahtes:

$$y(0) = 0 \quad (5.22)$$

$$y'(0) = Q \cdot \left[1 - \frac{1}{\cosh(a/2 \cdot P)} \right] = \tan \alpha \quad (5.23)$$

$$y''(0) = 0 \quad (5.24)$$

Setzt man $x = a/2$ ein, so erhält man die Verhältnisse an der Kontaktstelle in der Mitte des Drahtes:

$$y(a/2) = Q \cdot \left[\frac{a}{2} - \frac{\tanh(a/2 \cdot P)}{P} \right] = f \quad (5.25)$$

$$y'(x) = 0 \quad (5.26)$$

$$y''(x) = -Q \cdot P \cdot \tanh(a/2 \cdot P) = -1/r_{Dr} \quad (5.27)$$

Gleichung (5.27) liefert unmittelbar die Krümmung des Drahtes an der Berührungstelle mit dem Werkstück.

Bei längskraftfreier Lagerung und ohne Vorspannung ($F_s = 0$) wird auch $F_{sx} = 0$ und damit $P = 0$ sowie $Q = \infty$. Eine Grenzwertbetrachtung für diesen Fall führt auf die bekannten Gleichungen für die Biegung eines frei aufliegenden Trägers unter Querkraftbelastung.

5.2.5 Druckspannung an der Berührstelle Draht - Werkstück

Der Kontakt zwischen Draht und Werkstück stellt eine Sonderform der Berührung zweier Rotationskörper mit sich rechtwinklig kreuzenden Achsen dar (Bild 62). Die üblicherweise für die Bestimmung der Flächenpressung an solchen Stellen verwendeten, meist auf die Arbeiten von HERTZ zurückgehenden Formeln reichen für eine befriedigende Betrachtung im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht aus. Statt dessen soll nachfolgend ein von LURJE [103] aufgezeigter Lösungsweg wiedergegeben werden. Hierbei sind vollkommen elastische Körper vorausgesetzt, für die das HOOKEsche Gesetz Gültigkeit hat und die homogen sowie isotrop sind. Bis auf die letztgenannte Bedingung, die nur näherungsweise erfüllt wird, ist dies hier der Fall.

Die mittleren Berührradien in den beiden Ebenen, die vom Kraftvektor und den Mittelachsen der Körper aufgespannt werden (Bild 54), betragen

$$1/R_1 = 1/R_1' + 1/R_2'' \quad (5.28)$$

$$1/R_2 = 1/R_2' + 1/R_1'' \quad (5.29)$$

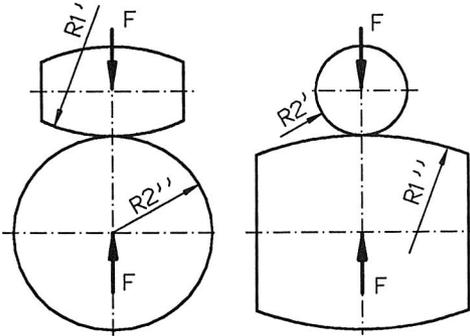


Bild 54: Berührung zweier Rotationskörper

wobei definiert sei, daß $R_1 > R_2$. Aus dem Verhältnis R_2/R_1 läßt sich dann die Exzentrizität e der die Berührungsfläche begrenzenden Ellipse bestimmen:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{(1 - e^2) \cdot [K(e) - E(e)]}{E(e) - (1 - e^2) \cdot K(e)} \quad (5.30)$$

Bei den Abkürzungen

$$K(e) = K(\pi/2, e) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\Psi}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2\Psi}} \quad (5.31)$$

und

$$E(e) = E(\pi/2, e) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2\Psi} \, d\Psi \quad (5.32)$$

handelt es sich um die bekannten elliptischen Integrale erster bzw. zweiter Gattung in der LEGENDRESCHEN Normalform. Diese lassen sich nicht durch elementare Funktionen ausdrücken und können nur numerisch-iterativ oder durch Potenzreihenentwicklung gelöst werden. Daher entzieht sich auch Gleichung (5.32) einer Auflösung nach dem eigentlich interessierenden Exzentrizitätsfaktor e . Statt dessen sind in Tafel 6 und Bild 55 die auf einer elektronischen Rechenanlage bestimmten Grö-

Ben e , $K(e)$ und $E(e)$ in Abhängigkeit von R_1/R_2 dargestellt, so daß daraus bei bekanntem Radienverhältnis die gesuchten Werte abgelesen werden können. Zu beachten ist bei der Anwendung von Bild 55, daß $K(e)$ für $e \rightarrow 1$ bzw. $R_1/R_2 \rightarrow 0$ gegen unendlich geht. Die in vielen Tabellenwerken nur auf wenige Dezimalstellen genau angegebenen LEGENDRESchen Zahlen führen im vorliegenden Fall zu unsinnigen Ergebnissen, weil die Rundungsfehler zu groß werden. In Tafel 6 sind die Werte von $K(e)$ und $E(e)$ daher meist mit vier Dezimalstellen wiedergegeben. Dies reicht für die praktische Rechnung aus. Lediglich bei sehr kleinen e ($e < 0,25$) müssen $K(e)$ und $E(e)$ auf sechs Stellen genau eingesetzt werden.

Mit den so erhaltenen Faktoren und den vom Schubmodul G bzw. dem Elastizitätsmodul E sowie der POISSONSchen Zahl μ der Werkstoffe abhängigen Konstanten

$$\vartheta_1 = \frac{1 - \mu_1}{G_1} = 2 \cdot \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} \quad (5.33)$$

kann dann die Länge der großen Halbachse der Druckellipse berechnet werden:

$$a_0 = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} \cdot F \cdot R_1 \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2) \cdot [K(e) - E(e)] / e^2} \quad (5.34)$$

Die maximale Flächenpressung an der Berührstelle beträgt schließlich:

R2/R1	e	K(e)	E(e)
1,0	0,0000	1,570796	1,570796
0,995	0,0812	1,573422	1,568177
0,990	0,1151	1,576064	1,565556
0,985	0,1411	1,578720	1,562932
0,980	0,1628	1,581394	1,560307
0,975	0,1820	1,584079	1,557682
0,950	0,2571	1,5978	1,5445
0,925	0,3154	1,6123	1,5309
0,90	0,3606	1,6260	1,5184
0,875	0,4031	1,6412	1,5049
0,850	0,4410	1,6569	1,4914
0,825	0,4755	1,6731	1,4778
0,80	0,5070	1,6897	1,4644
0,775	0,5364	1,7068	1,4508
0,750	0,5641	1,7247	1,4372
0,725	0,5902	1,7433	1,4235
0,70	0,6153	1,7630	1,4094
0,675	0,6386	1,7830	1,3957
0,650	0,6607	1,8039	1,3819
0,625	0,6821	1,8257	1,3679
0,60	0,7026	1,8488	1,3538
0,575	0,7220	1,8725	1,3398
0,550	0,7408	1,8979	1,3256
0,525	0,7588	1,9244	1,3114
0,50	0,7761	1,9522	1,2972
0,475	0,7927	1,9816	1,2829
0,450	0,8088	2,0129	1,2683
0,425	0,8241	2,0460	1,2539
0,40	0,8390	2,0812	1,2394
0,375	0,8532	2,1191	1,2247
0,350	0,8669	2,1595	1,2101
0,325	0,8802	2,2035	1,1952
0,30	0,8928	2,2508	1,1805
0,275	0,9049	2,3027	1,1655
0,250	0,9166	2,3599	1,1505
0,225	0,9277	2,4229	1,1355
0,20	0,9382	2,4941	1,1205
0,175	0,9490	2,5812	1,0992
0,150	0,9577	2,6684	1,0903
0,125	0,9667	2,7791	1,0751
0,10	0,9750	2,9148	1,0599
0,075	0,9826	3,0903	1,0447
0,050	0,9895	3,3365	1,0295
0,045	0,9908	3,4001	1,0265
0,040	0,9920	3,4711	1,0235
0,035	0,9932	3,5528	1,0205
0,030	0,9944	3,6422	1,0175
0,025	0,9955	3,7561	1,0146
0,020	0,9966	3,8893	1,0116
0,015	0,9976	4,0521	1,0086
0,010	0,9985	4,2987	1,0058
0,005	0,9993	4,7051	1,0029
0,0	1,0000	∞	1,0000

Tafel 6: Faktoren e , $K(e)$ und $E(e)$ zur Berechnung der Pressung zwischen gekrümmten Flächen

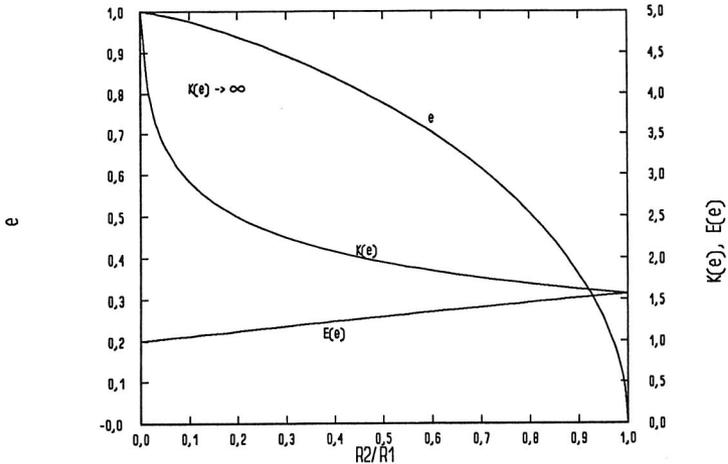


Bild 55: Exzentrizität e der Druckellipse sowie Lösungen der elliptischen Integrale $K(e)$ und $E(e)$ in Abhängigkeit vom Radienverhältnis der Körper

$$p_{\max} = \frac{3 \cdot F}{2 \cdot \pi \cdot a_0^2 \cdot \sqrt{1 - e^2}} \quad (5.35)$$

Für den Fall der Berührung eines hinreichend langen, steifen Zylinders mit einer Ebene ($R_1' = R_2'' = \infty$) wird aus der Druckellipse ein Oval; Gleichung (5.34) versagt hier. Statt dessen setzt man die Länge der Druckfläche gleich der Länge l des Zylinders und berechnet deren Breite nach HERTZ [102]. Die Formel hierfür lautet in einer an die anderen hier dargestellten Gleichungen angepassten Form:

$$a_0' = 2 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot R_2 \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_2)}{\pi \cdot l}} \quad (5.36)$$

Die maximale Flächenpressung berechnet sich dementsprechend wie folgt:

$$p_{\max} = -\sigma_y = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot a_0' \cdot l} \quad (5.37)$$

5.3 Erprobung des Drahtschabens

5.3.1 Grundsätzliche Eignung, Bearbeitungsqualität

Das Drahtschaben erwies sich sowohl für das Entgraten weißtrockener kaolinitischer Massen als auch von Aluminiumtitanat und Aluminiumoxid gut geeignet. Der Grat kann damit in seiner gesamten Länge ohne erkennbaren Restgrat entfernt werden. Der Draht paßt sich sehr gut der Form der Werkstückoberfläche an, so daß auch ein Winkelversatz des Grates gegenüber der Werkzeug-Mittelachse bis ungefähr 80 % des Drahtauslenkwinkels keine Rolle spielt.

Problematisch sind lediglich örtliche Verdickungen des Grates, wie sie bei Ausbrüchen an der Kante der Gußform entstehen. Das Werkzeug behandelt solche Stellen als echte Konturelemente des Werkstücks und umfährt sie. Dies erfordert eine mehrmalige Bearbeitung des fraglichen Gratabschnitts oder eine Vergrößerung der Abtragwirkung durch vorübergehende Erhöhung der Vorspannkraft.

Gratverdickungen müssen also mit einem Sensor erkannt werden, der eine entsprechende Reaktion auslöst. Es sei allerdings darauf hingewiesen, daß das Auftreten von Gratverdickungen unter Qualitätsgesichtspunkten unerwünscht ist, weil hier Abtragstiefen notwendig sind, die zur Freilegung tieferer Gefügeschichten des Werkstoffs führen. Sie sind zudem ein deutliches Zeichen für eine erschöpfte Lebensdauer der Gießform. Daher dürften Werkstücke mit solchen Gratausprägungen eigentlich gar nicht erst zum Verputzen gelangen. Gleiches gilt für Werkstücke mit Formversatz. Versätze von mehr als 0,3 mm können nicht voll ausgeglichen werden und bleiben auch nach dem Entgraten sichtbar.

Bei Einhaltung der korrekten Verfahrensparameter kann eine unerlaubte Abplattung der Werkstückoberfläche im entgrateten Bereich vermieden werden, was insbesondere bei Tauchformen gefordert ist. Dies rührt nicht zuletzt von der Tatsache her, daß der Draht nicht ideal biegeschlaff ist, sondern auch an Stellen mit Punktberührung oder unzeitigem Werkstückquerschnitt einen endlichen Krümmungsradius besitzt, der - wie noch zu zeigen ist - mehrere Millimeter beträgt.

5.3.2 Verfahrensparameter

Als optimaler Durchmesser des Schabdrahtes erwies sich für alle untersuchten Keramiksorten ein Wert von 0,3 mm. Dünnere Drähte neigen dazu, zu springen und in das Werkstück einzuschneiden, während dickere Drähte auf dem Grat aufklettern und ihn nicht mehr sauber abtragen. Die Standzeit ist beträchtlich. Es können Gratlängen von mehreren tausend Metern ohne meßbaren Verschleiß im Kontaktbereich bearbeitet werden.

Besonders bezüglich der Vorspannkraft des Drahtes zeigte das Drahtschaben einen großen zulässigen Wertebereich der Technologieparameter. Für eine merkliche Beeinflussung des Werkzeugverhaltens sind beträchtliche Veränderungen der Vorspannkraft erforderlich. Grundsätzlich kann gesagt werden, daß größere Vorspannungen die Abtragwirkung etwas vergrößern und das Werkzeug steifer machen (hilfreich bei dicken Graten sowie an Stellen mit engen Außenradien zur Reduzierung des Nachschleppens und damit der Verhakgefahr), während niedrigere Werte die Anpassungsfähigkeit an die Werkstückkontur erhöhen.

Die für die zur Verfügung stehenden Werkstücke (Tauchformen aus Spezialporzellan PR, Portliner aus Aluminiumtitanat, Dichtscheiben und Rundlinge aus gepreßtem Aluminiumoxid) ermittelten oberen und unteren Grenzen der Vorspannkraft sowie die jeweils hinsichtlich der Oberflächenqualität optimalen Werte sind in Bild 56 über der Trockenbiegefestigkeit aufgetragen. Höhere Vorspannkräfte als angegeben bringen keine Verbesserung der Bearbeitung und können leicht zur Zerstörung des Werkstücks durch mechanische Überbeanspruchung führen. Geringere Werte bergen die Gefahr einer Restgratbildung und können zu einem Rattern bzw. Springen des Drahtes führen.

Trotz der nur wenigen Meßpunkte und der Unsicherheit hinsichtlich des genauen Betrages der Biegefestigkeit ist sehr deutlich eine Tendenz zu erkennen. Auf den ersten Blick mag überraschen, daß die optimale Vorspannkraft mit festeren Werk-

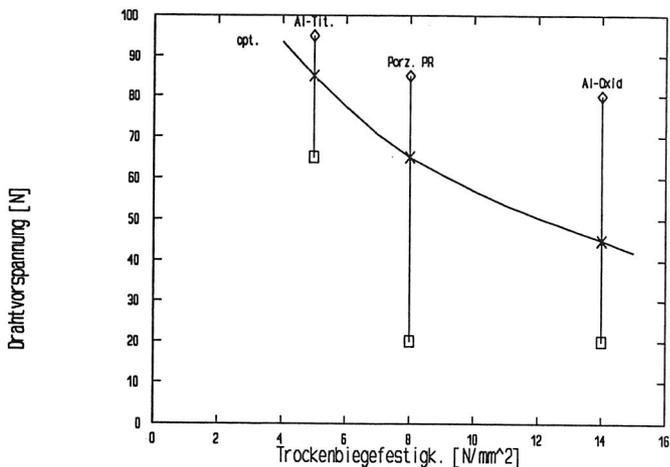


Bild 56: Grenzen und Optimum der Drahtvorspannkraft in Abhängigkeit von der Trockenbiegefestigkeit der untersuchten Werkstoffe

stoffen abnimmt. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die auf das Werkstück wirkende Kraft nicht nur von der Drahtvorspannung, sondern auch von der Zustelltiefe oder genauer gesagt vom Auslenkwinkel des Drahtes abhängt (siehe Formeln (5.10) und (5.14)). Größere Auslenkwinkel bedeuten eine größere Adaptionreserve des Werkzeugs, aber auch eine größere Zustellkraft. Die ermittelten optimalen Auslenkwinkel für verschiedene Keramiken sind in Bild 57 dargestellt, und zwar ebenfalls in Abhängigkeit von der Biegefestigkeit. Die hieraus und aus der Vorspannkraft gemäß Gleichung (5.10) berechnete Normalkraft auf das Werkstück stimmt recht gut mit den durch Montage der Werkstücke auf eine Waage gemessenen mittleren Zustellkräften überein, die alle um 15 N liegen.

Dividiert man nun zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Gratquerschnitte der untersuchten Formlinge jeweils die Zustellkraft durch die Gratbreite, so erhält man die Darstellung in Bild 58. Bei aller Vorsicht wegen der geringen Zahl der Stützpunkte und der Unsicherheit hinsichtlich der Werkstoffkennwerte dürfte dem Verlauf dieser Kurve eine gewisse Signifikanz nicht abzuspüren sein.

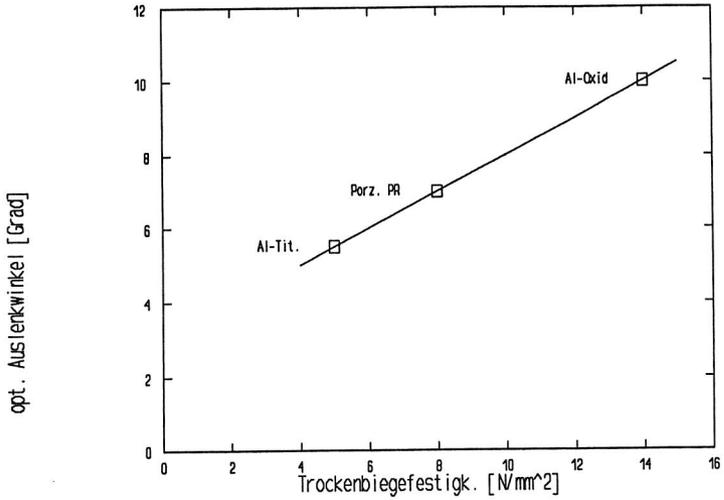


Bild 57: Optimaler Drahtauslenkwinkel für verschiedene Werkstoffe

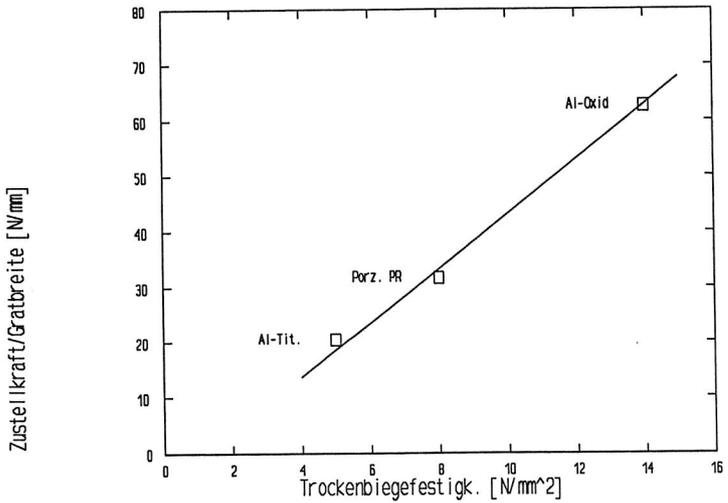


Bild 58: Normierte optimale Zustellkraft als Funktion der Trockenbiegefestigkeit

Im Vergleich zu den erforderlichen Zustellkräften sind die (ebenfalls mit einer Waage gemessenen) Vorschubkräfte deutlich geringer. Sie liegen zwischen 3 N (für Aluminiumoxid) und 4,5 N (Aluminiumtitanat). Diese Werte sind mit einer verhältnismäßig großen Unsicherheit behaftet, da bei ihrer Messung die Reibung des Drahtes an der Werkstückoberfläche nicht eliminiert werden konnte. Nach Normierung mit dem Gratquerschnitt ergibt sich der Verlauf in Bild 59, der für sich selbst sprechen dürfte.

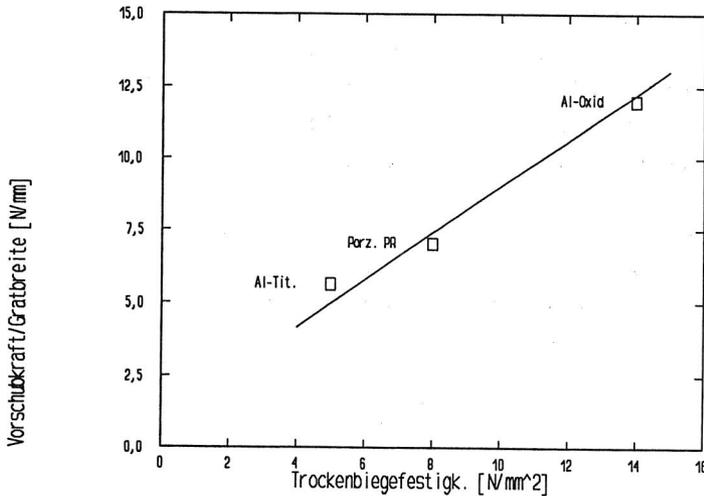


Bild 59: Normierte Vorschubkraft in Abhängigkeit von der Trockenbiegefestigkeit

Bei einer zu großen Anschmieglänge b des Drahtes (Strecke TBT in Bild 52) wurde beim Sonderporzellan PR unabhängig von den anderen Bearbeitungsparametern ein kleiner Restgrat beobachtet, wenn $b > 15$ mm. Aus Gleichung (5.4) folgt damit eine weitere Grenze für die maximale Drahtauslenkung. Am Schaft einer Tauchform mit $r_w = 40$ mm beträgt dieser Wert: $\alpha < 11^\circ$. Für Aluminiumoxid und Aluminiumtitanat war aufgrund der kleinen Querschnittsradien r_w der zur Verfügung stehenden Werkstücke vor Beobachtung dieses Effekts die maximale Zustellkraft erreicht.

Daß die Restgratbildung nicht von einem Abheben des Drahtes infolge zu großer Steifheit (also eines zu großen Biegeradius) herrühren kann, läßt sich leicht zeigen, wenn man die Kennwerte eines realen Werkzeugs in die Gleichungen (5.16b), (5.17b) und (5.27) einsetzt. Für $F_s = 65 \text{ N}$, $d = 0,3 \text{ mm}$, $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$ und $\alpha = 7^\circ$ erhält man den Biegeradius des Drahtes bei Punktberührung: $r_{Dr} = 9,2 \text{ mm}$. Dies liegt deutlich unter dem Krümmungsradius der Werkstückoberfläche. Der Draht müßte sich demzufolge im Kontaktbereich vollständig an das Werkstück anlegen.

Eine Erklärung hierfür kann sein, daß die Berührung zwischen Draht und Werkstück reibungsbehaftet ist. Durch diese Reibung erfährt der Draht einen Verlust an Vorspannkraft, so daß die Vorspann- und damit auch die den Abtrag bestimmende Normalkraft zur Mitte des Kontaktbereichs hin kleiner wird. Dies ist ein ähnlicher Effekt, wie er auch bei Seilscheiben vorliegt.

Eine Quantifizierung ist durch eine infinitesimale Betrachtung der Berührung möglich, indem man die an jedem Teilelement $d\alpha$ wirksame, vorspannkraftabhängige Reibung dF_R (Bild 60) über den Umschlingungswinkel bis zur Mitte des Berührbereichs (Bild 52) integriert [102]:

$$\int_0^\alpha \frac{dF_s}{F_s} = \int_0^\alpha \mu \cdot d\alpha$$

$$\ln F_s - \ln F_{s,\min} = \mu \cdot \alpha \cdot \pi / 180^\circ$$

oder nach der Restvorspannkraft aufgelöst:

$$F_{s,\min} = F_s \cdot e^{-\mu \cdot \alpha \cdot \pi / 180^\circ} \quad (5.38)$$

Dieser Zusammenhang ist als "Gesetz der Seilreibung" bekannt. Interessanterweise hängt der Vorspannkraftverlust nicht vom Biegeradius ab, hingegen sehr stark vom Reibungsbeiwert. Dieser wurde für die Paarung blanker Stahl gegen unglasiertes, weißtrockenes Porzellan mit $\mu = 0,22$ bestimmt. Damit ergibt sich für $\alpha = 7^\circ$ ein Verhältnis $F_{s,\min} / F_s = 0,97$, für $\alpha = 20^\circ$ hingegen $F_{s,\min} / F_s = 0,92$. Da gemäß Gleichung (5.14) die Normalkraft proportional zur Vorspannkraft ist, bedeutet dies mit

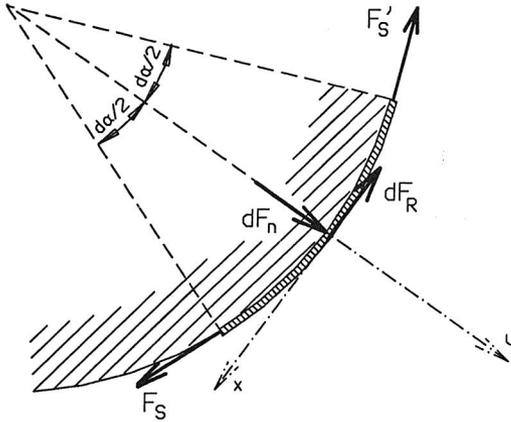


Bild 60: Reibung an einem Drahtinkrement mit Werkstückberührung (nach [102])

anderen Worten, daß dann zum Abtragen des Grates nur noch rund 90 % der ursprünglichen Kraft zur Verfügung stehen.

5.3.3 Geschwindigkeiten und Bearbeitungszeiten

Die Qualität der Bearbeitung erwies sich als in weiten Grenzen unabhängig von der Bahngeschwindigkeit des Werkzeugs (die wegen der feststehenden Wirkfläche mit Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit identisch ist). Erst oberhalb der in Bild 61 angegebenen Höchstwerte zeigten sich Beeinträchtigungen infolge von Rattermarken sowie bei Aluminiumtitanat auch durch Ausbrüche im Bereich des Gratfußes. Bei Aluminiumtitanat- und Aluminiumoxid-Teilen war außerdem eine untere Geschwindigkeitsgrenze zu beobachten, unterhalb derer infolge Springen des Drahtes kein durchgehender, vollständiger Abtrag des Grates mehr erfolgte.

Die in der Praxis erzielbaren Bearbeitungszeiten werden allerdings häufig nicht durch die Schnittgeschwindigkeit begrenzt, sondern durch die beschränkte Dynamik des Robotersystems. An Stellen mit stark gekrümmtem Bahnverlauf muß die Bahngeschwindigkeit reduziert werden, um die dynamischen Bahnabweichungen in

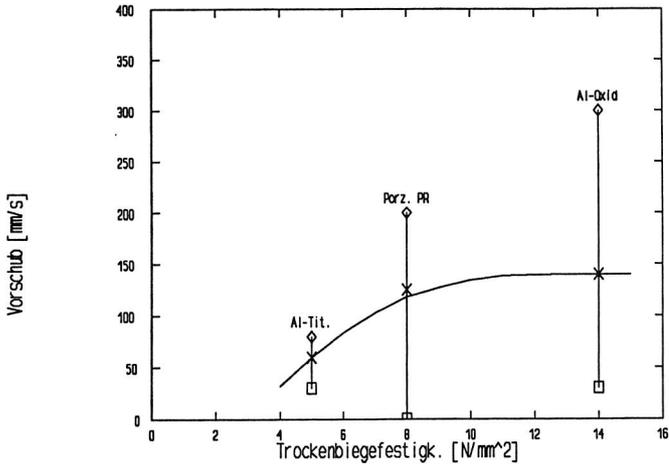


Bild 61: Grenzwerte und Optimum für die Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Trockenbiegefestigkeit

akzeptablen Grenzen zu halten. Somit ergaben sich für das Entgraten Stückzeiten von mindestens 40 Sekunden bei Tauchformen und 6 Sekunden für Portliner.

5.3.4 Abtraggvorgang

Die Spanbildung bei Keramiken ist noch nicht hinreichend erforscht. Untersuchungen an gebrannten Teilen haben gezeigt, daß neben dem Sprödbbruch auch eine plastische Verformung im Mikrobereich auftritt [30]. [104, 105 und 106] gehen noch weiter und geben an, daß bei Vorliegen bestimmter Bedingungen (sehr hohe Steifheit von Werkstück und Spindel, geringe Schnitttiefe, feinkörnige Schleifwerkzeuge hoher Härte, exakt geregelte Zustellung und Vorschub) auch sprödkristalline Werkstoffe in einem duktilen Prozeß spanend bearbeitet werden können. Dies wird auf die Aktivierung kristalliner Gleitsysteme bei mehrachsigen Spannungszuständen zurückgeführt. Der Plastizitätsdruck ist sehr hoch. Beim Brillenrohglas B260 beträgt er beispielsweise 3520 N/mm² [107], aus Angaben in [104] läßt sich für reaktionsgesintertes Siliziumkarbid auf einen Wert von deutlich über 10.000 N/mm² schließen.

Für andere Werkstoffe liegen noch keine gesicherten quantitativen Aussagen vor. Allgemein wird aber von ähnlichen Größenordnungen ausgegangen, da die Trennmechanismen bei allen sprödharten Werkstoffen ähnlich sind [108].

Auch wenn noch keinerlei Erkenntnisse über das Zerspanungsverhalten grüner Keramik vorliegen, so läßt sich doch aufgrund ihres ebenfalls spröden Verhaltens ein vergleichbarer Zusammenhang annehmen, allerdings auf einem wesentlich niedrigeren Niveau. Unter der Voraussetzung, daß der Plastizitätsdruck durch das Sintern in einer ähnlichen Größenordnung gesteigert wird wie die Biegefestigkeit, dürfte dieser im Grünzustand um 400 N/mm^2 liegen.

Im folgenden sollen die beim Drahtschaben auf den Werkstoff wirkenden Druckbeanspruchungen abgeschätzt werden. Berührt der Draht den Grat an dessen Spitze, liegt also Punktberührung vor, so können die Gleichungen (5.28) und (5.29) mit den Bezeichnungen in Bild 62 wie folgt angesetzt werden:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{-r_{Dr}} + \frac{1}{r} \quad (5.39)$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{d/2} + \frac{1}{\infty} = \frac{2}{d} \quad (5.40)$$

Nimmt man vereinfachend eine gleichmäßige Krümmung des Gratquerschnitts im Scheitelbereich an, dann gilt dort:

$$r = b/2 \quad (5.41)$$

Die mittlere Gratfußbreite an Tauchformen aus Porzellan beträgt $0,5 \text{ mm}$; also ist in diesem Fall $r_w = 0,25 \text{ mm}$. Der freie Biegeradius des Drahtes wurde für $F_s = 65 \text{ N}$, $d = 0,3 \text{ mm}$, $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$ und $\alpha = 7^\circ$ bereits im Abschnitt 5.3.2 mit $r_{Dr} = 9,2 \text{ mm}$ bestimmt. Da $r_{Dr} > r$ ist, liegt in der Tat Punktberührung vor. Die mittleren Krümmungsradien an der Berührstelle berechnen sich nach den Gleichungen (5.39) und (5.40) also zu $R_1 = 0,257 \text{ mm}$ und $R_2 = 0,150 \text{ mm}$. Damit wird $R_1/R_2 = 0,584$ und aus Tafel 6 ergibt sich $e = 0,7150$, $K(e) = 1,8640$ sowie $E(e) = 1,3448$. Die Deformations-

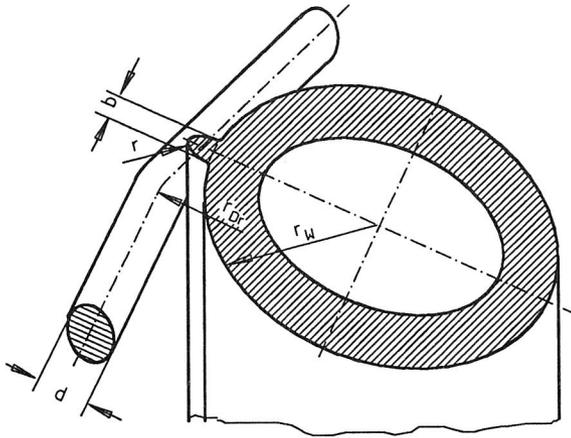


Bild 62: Geometrie im Kontaktbereich Draht-Werkstück

konstanten ϑ betragen nach Gleichung (5.33) für Stahl ($\mu = 0,3$; $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$) $\vartheta_1 = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$, für Porzellan ($\mu = 0,18$; $E = 75.000 \text{ N/mm}^2$) $\vartheta_2 = 2,19 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{N}$. Die Zustellkraft gemäß Gleichung (5.13) ist unter den genannten Bedingungen mit $F_0 = 15,8 \text{ N}$ anzusetzen.

Mit diesen Werten liefert Gleichung (5.34) als Länge der Druckellipse $a_e = 0,038 \text{ mm}$. Damit läßt sich aus Gleichung (5.35) die maximale Flächenpressung an der Gratspitze berechnen; sie beträgt $p = 7350 \text{ N/mm}^2$. Setzt man statt der Zustell- die gemessene Vorschubkraft von $F_v = 4 \text{ N}$ ein, so ergibt sich $a_e = 0,052 \text{ mm}$ und $p = 4650 \text{ N/mm}^2$. Aus diesen Zahlen ist ersichtlich, warum das Drahtschaben einen so großen zulässigen Wertebereich für die Vorspann- und Zustellkräfte aufweist: Da die Kraft insgesamt nur mit ihrer dritten Wurzel in die Berechnung der Flächenpressung eingeht, wirken sich selbst große Änderungen nur verhältnismäßig gering aus. Auch die Annahme eines größeren Oberflächenradius an der Gratspitze führt nicht zu grundlegend anderen Ergebnissen (zum Beispiel erhält man für $r = 0,5 \text{ mm}$ $p = 3750 \text{ N/mm}^2$). Die Flächenpressung liegt in jedem Fall deutlich über der geschätzten Plastifizierungsgrenze, eine gewisse plastische Verformung bei der Zerspanung wäre daher nicht auszuschließen.

Das Zerspanverhalten während der Entgratversuche, bei denen eine ausgeprägt spröde Charakteristik beobachtet wurde, die durch sehr feinkörnige Reißspäne gekennzeichnet ist, legt jedoch bereits nahe, daß der plastische Anteil an der Verformung nicht groß sein kann. In der Tat fehlen dem Bearbeitungssystem konzeptbedingt die in der Literatur genannten wesentlichen Voraussetzungen für eine duktile Zerspanung von Keramik, insbesondere eine große Steifheit. Man kann vielmehr davon ausgehen, daß sich bereits nach geringer plastischer Verformung die Druckfläche so weit vergrößert hat, daß der Plastizitätsdruck unterschritten wird. Außerdem erfolgt der Abtragsvorgang nicht nur durch Trennen unmittelbar an der Schneide, sondern hauptsächlich durch Abbröckeln von Gratteilen, die noch nicht direkt vom Werkzeug berührt werden.

Ein wesentlicher Unterschied der Grünbearbeitung zu den Vorgängen bei der Hartbearbeitung besteht ferner darin, daß bei letzterer infolge der deutlich höheren Festigkeit des Werkstoffs erheblich größere Energiemengen aufgebracht werden müssen. Diese Energie wird an der Werkzeugschneide zu einem großen Teil in Wärme umgesetzt, die infolge der geringen Wärmeleitfähigkeit von Keramik nicht rasch genug abfließen kann, was zu einer Hitzekonzentration in der unmittelbaren Kontaktzone führt [109]. Diese lokale Hitzeeinwirkung wird als weitere Voraussetzung für duktilen Verhalten genannt [105]; nach [110] liegt die Untergrenze für HPSN bei 1200 °C. Derartige Temperaturen können bei der Grünbearbeitung aus verschiedenen Gründen (geringere Bearbeitungskräfte und damit wenig Energiezufuhr, größere Kontaktflächen, nachweisbar keine Vorbrenneffekte) ausgeschlossen werden.

Für die Erklärung des Abtragverhaltens ist daher von einem weitgehend HOOKESchen Werkstoffverhalten mit Sprödbbruchneigung auszugehen. Beim Eindringen eines räumlich eng begrenzten Körpers in ein Keramikteil entstehen um die elastisch verformte Zone Risse (Bild 63) [21, 104, 111]. Man unterscheidet als Rißtypen den longitudinalen Riß senkrecht zur Werkstückoberfläche und in Richtung der Werkzeugbewegung, den radialen Riß senkrecht zu Oberfläche und Bearbeitungsrichtung sowie den lateralen Riß parallel zur Oberfläche.

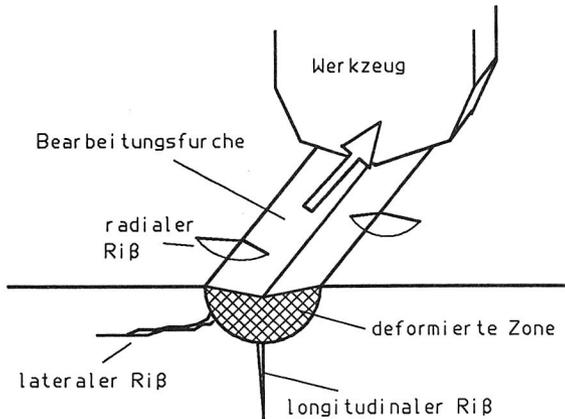


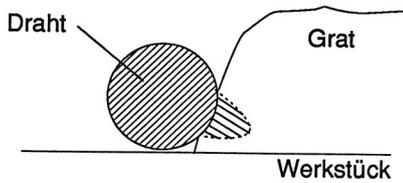
Bild 63: Schematische Darstellung der Rißbildung in Keramik

Die wesentlichen Mechanismen des Trennvorgangs bei Keramik lassen sich nach [30] wie folgt beschreiben:

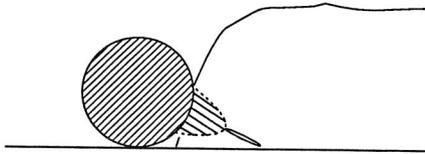
- * Deformation des Werkstoffs beim Eindringen des Werkzeugs
- * Entstehung von lateralen Rissen
- * Werkstoffverdrängung, Bildung von stark verdichteten Schichten
- * Abplatzungen nach Entlastung

Dieser Ablauf deckt sich weitgehend mit den Beobachtungen während der Versuche, so daß er sinngemäß auch auf den Abtragevorgang beim Drahtschaben angewendet werden kann. Dies ist in Bild 64 dargestellt. Wesentliches Merkmal ist die Bildung lateraler Risse infolge von Druckspannungen. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den Vorgängen bei der Zerspanung spröder Eisenwerkstoffe (zum Beispiel Grauguß mit Lamellargraphit), die in der Hauptsache auf dem Abscheren und erneuten Zusammenschweißen kleiner Werkstoffteilchen direkt im Schneidenbereich beruhen [112, 113]. Da diese Risse parallel zum Gratfuß liegen, wird auch erklärbar, warum die Gratfußbreite einen wesentlichen Verfahrensparameter darstellt, während die Grathöhe so gut wie keinen Einfluß auf das Zerspanverhalten hat.

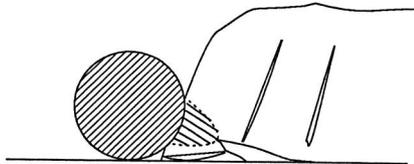
- ① Plastisch-elastische Deformation am Werkzeugeingriffspunkt



- ② Interner Anriß an höchstbeanspruchter Stelle



- ③ Rißausbreitung entlang des Gratfußes, laterale Sekundärrisse infolge Biegespannung



- ④ Abbrechen des Gratanfangs

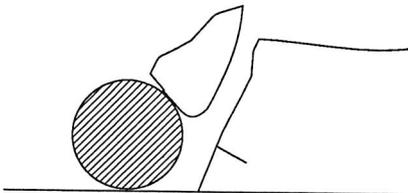


Bild 64: Abtragevorgang beim Drahtschaben

Berechnet man die Flächenpressung des Drahtes gegen eine entgratete Werkstückoberfläche, so erhält man mit den obengenannten Werten und einem Querschnittsradius $r_w = 40$ mm zunächst aus Gleichung (5.4) eine Anschmieglänge von $l = 9,8$ mm. Die Gleichungen (5.36) und (5.37) liefern dann $a_s' = 0,003$ mm und $p = 350$ N/mm². Das ist weniger als ein Zwanzigstel der Flächenpressung am Grat. Dieser erhebliche Unterschied dürfte die Ursache für die ausgeprägt gratselktive Wirkung des Drahtschabens sein.

5.4 Erprobung des Verschwämmwerkzeugs

5.4.1 Schwammauswahl

Mit dem Bandwerkzeug konnten die gestellten Anforderungen voll erfüllt werden. Es ist in der Lage, die ganze Oberfläche von Tauchformen riefenfrei und mit ausreichender Qualität zu verschwämmen. Bei der Erprobung von Schwämmen aus unterschiedlichen Schaumstoffen zeigte sich die besondere Wichtigkeit eines großen Saugvermögens des Materials, gekennzeichnet durch großes Gesamtvolumen, hohen Anteil offener Poren und Vorhandensein innerer Kapillaren. Die Porengröße selbst spielt insoweit eine Rolle, als große Poren eine bessere Verschwämmleistung erzielen. Handelsübliche Schaumstoffe lassen in dieser Beziehung nach kurzer Zeit rasch nach, weil ihre relativ kleinen Poren durch eingedrungenen Schlicker verstopfen. Mit zunehmender Härte oder richtiger gesagt steigendem Elastizitätsmodul des Schwamm-Materials wachsen Abtragwirkung und Lebensdauer des Bandes, aber auch die Rauigkeit der erzeugten Oberfläche. Außerdem nimmt die Anpassungsfähigkeit an die Werkstückgeometrie ab.

Alternativ zu Schaumstoffschwämmen wurden auch Bänder mit einer Beschichtung aus Schwammgummi erprobt. Sie erwiesen sich als robuster und standfester, erreichen jedoch nicht dieselbe gute Oberflächenqualität. Insbesondere die härteren und grobporigen Typen ergeben schlechte Oberflächen bis hin zur Riefenbildung.

Als weitere Alternative werden Polierbänder aus einem korkartigen Werkstoff, der zum Naßpolieren von Glas Verwendung findet, angeboten. Die damit erzielte Oberfläche war jedoch unzureichend, da dieses Material eine verhältnismäßig harte Struktur aufweist und tiefe Riefen auf den Werkstücken hinterließ.

Bänder aus unbeschichtetem Nylogewebe besitzen nur unzureichendes Wasseraufnahmevermögen und somit unbefriedigende Verschwämmwirkung.

Die besten Eigenschaften zeigten erwartungsgemäß Spezialschäume, wie sie bereits seit längerem für die Ausrüstung konventioneller Verputzmaschinen hergestellt werden. Wegen der hohen Beanspruchung, denen die Bänder ausgesetzt sind, beträgt ihre Standzeit nur wenige hundert Werkstücke, so daß ein regelmäßiger Bandwechsel erforderlich ist.

Um eine Längung des Bandes bei Wasseraufnahme oder unter Zugbeanspruchung und damit ein Abspringen von den Führungsrollen zu vermeiden, erwies es sich als notwendig, den Schwamm mit einer zugfesten Textil-Mittellage zu versehen, obwohl dadurch der innere Wasseraustausch behindert wird. Der nach mehreren Zwischenstadien gefundene optimale Querschnitt ist in Bild 65 wiedergegeben. Damit bei einer Bearbeitung der Fingerspitzen und der Sattelflächen an den Fingerwurzeln von Tauchformen keine Riefen auftreten,

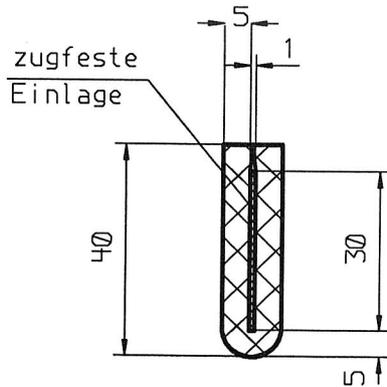


Bild 65: Querschnitt des Schwammbandes

wurde das Schwammmaterial um die untere Kante des Zugbandes geklappt. Die angegebene Dicke der Beschichtung stellt einen Kompromiß dar, bei dem das Band unter Berücksichtigung der vorgegebenen Dicke der Inneneinlage gerade noch zwischen die Finger der Tauchformen geführt werden kann (Bild 49).

5.4.2 Verfahrensparameter

Da das Verschwämmen nur bei Tauchformen erforderlich ist, wurden die Versuche auf diese Werkstückgattung und den Werkstoff PR, ein Sonderporzellan für Tauchformen mit einer sehr gleichmäßigen Wärmedehnung, beschränkt. Technologische Vergleiche sind daher nicht möglich. Es zeigte sich, daß die besten Bearbeitungsergebnisse bei geringer Bandgeschwindigkeit (unter 100 mm/s) und einem relativ großen Vorschub von ca. 150 mm/s erreicht werden. Hierbei ist eine auf die Bandgeschwindigkeit und den Schwammquerschnitt bezogene spezifische Wasserezuführung von

$$w = \frac{\dot{V}}{v_B \cdot A_B} \quad (5.42)$$

$$w = 0,25$$

optimal. Größere Wassermengen bergen die Gefahr einer Aufweichung des Werkstücks und der Bildung von Schaumblasen, während bei kleineren Mengen Riefenbildung und mangelnde Selbstreinigung des Schwammes auftritt.

Voraussetzung für ein gutes Bearbeitungsergebnis ist eine konstante Bahngeschwindigkeit im Arbeitspunkt des Werkzeuges, denn schon ein kurzzeitiger Stillstand (zum Beispiel während Orientierungsbewegungen) bewirkt ein tiefes Einschneiden in das Werkstück. Ferner müssen Anpreßkraft und Bewegungsgeschwindigkeit des Schwammes möglichst konstant gehalten werden.

Eine stramme Vorspannung wäre nach [114] der Lebensdauer des Bandes förderlich. Dies kann jedoch nur in Grenzen realisiert werden, weil sonst die vordere Führungsrolle das Wasser vor der Wirkstelle wieder aus dem Schwamm drücken und außerdem die Anpreßkraft an die Formlinge zu groß würde. Als praktikabler Wert für die Vorspannung bei Ruhestellung des Werkzeuges erwiesen sich 10 N. Die hierbei mögliche sehr geringe Anpreßkraft von etwa 2 bis 3 N ist für die Oberflächenqualität als optimal anzusehen. Höhere Beträge führen ebenfalls zur Bildung von Riefen am Werkstück.

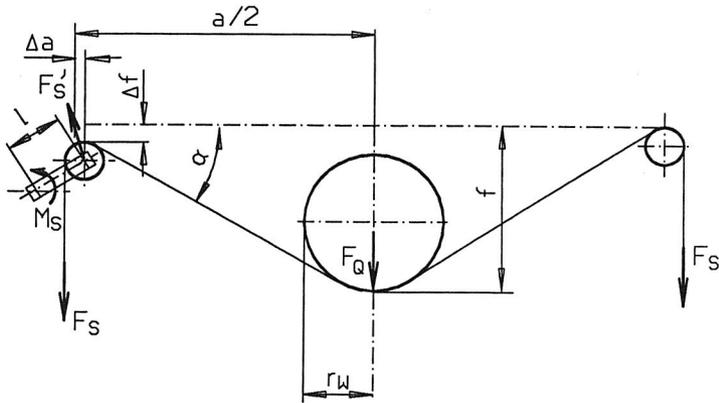


Bild 66: Beeinflussung der Bandgeometrie durch Hebelspanner

Im Prinzip gilt auch beim Schwamm-Werkzeug Gleichung (5.10) für den Zusammenhang zwischen Auslenkwinkel, Vorspann- und Normalkraft. Da die Spanneinrichtung jedoch in Form eines Hebelspanners realisiert wurde, ist die Vorspannung des Bandes nicht konstant, sondern sie hängt außer vom Drehmoment der Spanneinheit auch vom aktuellen Winkel zwischen Spannhebel und Band ab (Bild 66). Die Spanneinrichtung ist so ausgelegt, daß der wirksame Hebelarm und damit die Bandvorspannung bei wachsendem Auslenkwinkel abnimmt. Dadurch nimmt die Anpreßkraft an das Werkstück bei Vergrößerung der Zustelltiefe nicht so rasch zu wie beim Entgratwerkzeug. Dies ist deswegen wichtig, weil nur mit Zustelltiefen in der Größenordnung des Werkstück-Durchmessers eine ausreichende Umschlingung zur raschen Bearbeitung großer Flächen erzielt werden kann (Bild 67). Dennoch ist bei sehr großen Auslenkungen eine Reduzierung des Spannmoments erforderlich, um die Abtragwirkung des Werkzeugs zu begrenzen. Bei einem Umschlingungswinkel des Bandes von 100° brachte eine Reduzierung des Spannmoments auf 60-70% des Wertes in Ruhelage günstige Ergebnisse.

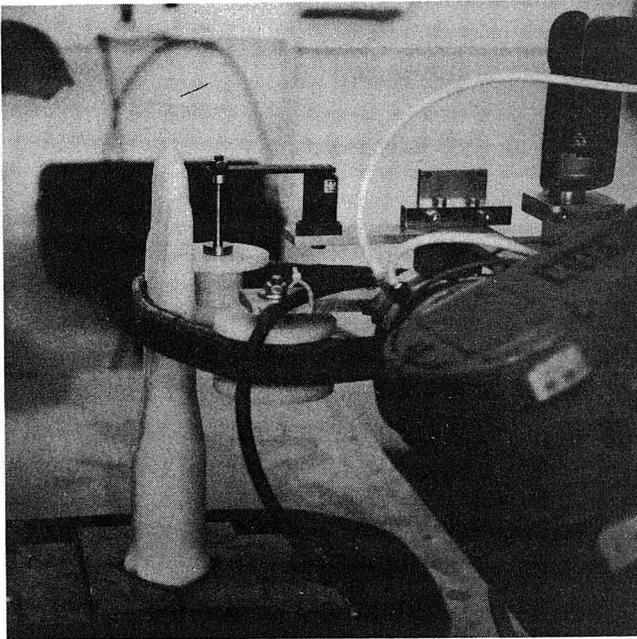


Bild 67: Band-Werkzeug beim Verschwämmen der Handfläche einer Tauchform

Weil nicht nur der Gratbereich, sondern die gesamte Oberfläche des Werkstücks verschwämmt werden muß, ist die hierbei abzufahrende Bahn für das Bandwerkzeug ungefähr dreimal so lang wie beim Entgraten, und es sind mehr Nebenbewegungen für das mehrfache Umsetzen des Werkzeugs auf die verschiedenen zu bearbeitenden Flächen erforderlich. Andererseits liegt die Bahngeschwindigkeit deutlich höher. Insgesamt hat die Taktzeit mit 35 Sekunden pro Werkstück die selbe Größenordnung wie beim Entgraten.

Ein Reversierbetrieb, das heißt ein doppeltes Abfahren der Bahn mit verschiedener Laufrichtung des Bandes, brachte eine Verbesserung der Oberfläche, allerdings selbstverständlich auf Kosten einer Verlängerung der Bearbeitungszeit. Zu beachten ist, daß bei Reversierbetrieb die Vorschubgeschwindigkeit um etwa 40 % auf 200 mm/s erhöht und die Bandgeschwindigkeit auf 70 mm/s verringert werden muß, um den selben Abtragungsgrad zu erzielen. Dies bedeutet, daß sich die Stückzeit nicht

verdoppelt, sondern unter Einbeziehung der Nebenzeiten lediglich um etwa 50 % verlängert.

5.5 Anforderungen an die Programmierung des Handhabungsgeräts

Die große Anpassungsfähigkeit des Drahtwerkzeuges vereinfacht die Programmierung, weil mit weniger Bahnstützpunkten ausgekommen werden kann und diese Punkte in der Regel weniger präzise festgelegt werden müssen. Da die Arbeitslage des Werkzeugs im Raum beliebig ist, kann dessen Orientierung an jedem Bahnpunkt direkt aus der Oberflächennormale des Werkstücks gewonnen werden, wobei zusätzlich die rotatorische Ausrichtung in der Achse parallel zum Draht beliebig ist.

Als problematischster Bereich hat sich das Umfahren der Fingerspitzen von Tauchformen erwiesen, weil bei kleinen Außenradien mit einem Umfangswinkel von mehr als 80° die Drahtauslenkung verringert werden muß, um die Gefahr eines Verhakens an der Fingerspitze infolge zu großer Nachschleplänge zu vermeiden (eine Erhöhung der Drahtvorspannung allein löst das Problem nicht, weil einem solchen Vorgehen infolge der langen Hebelarme zwischen Fingerspitzen und Fingerwurzel bzw. Sockel Grenzen durch die Bruchfestigkeit des Werkstoffs gesetzt sind).

Bild 68 zeigt verschiedene Strategien für die Programmierung dieser Stellen. Eine sehr gute Nachbildung der realen Kontur verspricht eine Interpolation mit Splines oder Parabeln dritter Ordnung. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die interpolierte Bahn bei zu dichter Stützpunktfolge unerwünschte Ausschläge aufweisen kann, da die Steuerung eine möglichst stetige Kurve anstrebt (Fall a in Bild 68). Außerdem kann dann die zwischen zwei Bahnpunkten verfügbare Interpolationszeit zu kurz werden. Zu wenige Stützpunkte wiederum können zu einer ungenügenden Anpassung führen (Fall b). Die Erprobung einer linearen Interpolation mit einem großen Überschleifradius (Bild 68, Fall c) erbrachte fast gleichwertige Resultate wie im ersten Fall, weil die Fehler aus einer Linearisierung der gekrümmten Werkstückkontur deutlich unter dem Adaptionsvermögen des Werkzeugs liegen. In jedem Fall

muß aber die Höhenlage des Scheitelpunktes genau eingehalten werden. Eine Korrektur der programmierten Bahn im Bereich der Fingerspitzen durch wiederholte Probeläufe ist auch bei sorgfältiger Programmierung unumgänglich, da neben den interpolationsbedingten Abweichungen auch die dynamischen Bahnfehler erheblich sind. Die auftretenden Abweichungen vom gewünschten Kurvenzug müssen durch Korrektur der Stützpunktlage kompensiert werden.

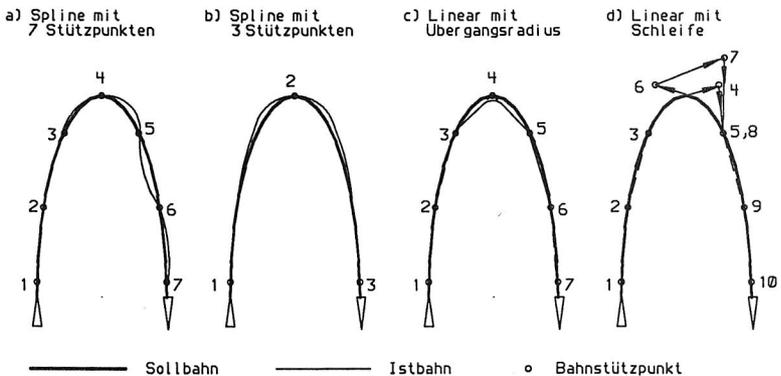


Bild 68: Verschiedene Strategien zum Umfahren der Fingerspitzen von Tauchformen

Eine andere Bahnstrategie, bei der die Höhenlage der Fingerspitzen nur von geringer Bedeutung ist, zeigt Fall d in Bild 68. Da hier jeder Teilbogen nur in Richtung auf den Scheitelpunkt der Kontur hin befahren wird, kann der oberste Bahnpunkt als freier Auslauf programmiert werden. Die mehrfachen Umsetzbewegungen des Werkzeugs bedeuten jedoch zusätzliche Nebenzeiten. Es erscheint daher als der sinnvollste Weg zur Minimierung des Programmieraufwands und zur Funktionssicherung, die Fingerspitzen von Tauchformen mit einer Schabklinge zu entgraten, die gegen Schleppeffekte unempfindlich ist.

Im Gegensatz zum Entgraten muß beim Verschwämmen die gesamte Oberfläche des Werkstücks bearbeitet werden. Dies bedeutet, daß auch Bewegungen mit dem Band parallel zur Ebene des Gratverlaufs, wie zum Beispiel in Bild 67, erforderlich

sind. Wegen des großen Adaptionsbereichs des Bandwerkzeugs genügt aber eine Stützpunktfolge geringer Dichte mit Punkten mäßiger Genauigkeit. Der Hauptaufwand bei der Programmierung des Verschwämmens liegt daher in einer Optimierung des Bahnverlaufs hinsichtlich Bearbeitungsfolge, konstanter Wirkgeschwindigkeit, Neigungswinkel des Werkzeugs, Umsetzbewegungen und Kollisionsfreiheit. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß das Werkzeug nur um einen bestimmten Winkel aus seiner horizontalen Lage gekippt werden darf, damit das Wasser nicht aus dem Gehäuse auf das Werkstück schwappt.

5.6 Anforderungsprofil an Verfahren zum Toleranzausgleich

Die inhärente Nachgiebigkeit der Werkzeuge zum Drahtschaben und Bandschwämmen hält die Anforderungen an zusätzliche Korrekturmaßnahmen gering. Die größte beim Entgraten ohne Nachregelung ausgleichbare Bahnabweichung entspricht ungefähr $\pm 35\%$ der maximalen Zustelltiefe, wie sie sich gemäß den Gleichungen (5.2) bzw. (5.3) aus dem maximalen Drahtauslenkwinkel und dem für einen freien Durchgang des Werkstücks erforderlichen Abstand der Stützrollen ergibt. Für Tauchformen ($\alpha_{\max} = 11^\circ$, $a = 170$ mm) ist $f_{\max} = 16,5$ mm, also beträgt die ohne ergänzende Maßnahmen beherrschbare größte Abweichung zwischen Werkstück-Istkontur und Werkzeugbahn $f_k = 0,35 \cdot f_{\max} = \pm 6$ mm. Dieser Wert reicht - genaue Programmierung vorausgesetzt - auch bei besonders stark verformten Werkstücken aus. Weil hierbei jedoch bereits bis an die Grenzen des Möglichen gegangen werden muß und weil zur Einhaltung der maximalen Abweichung viele Stützpunkte erforderlich sind, erscheint bei Tauchformen eine Unterstützung durch Sensoren als sinnvoll. Im Gegensatz hierzu beträgt bei Portlinern ($\alpha_{\max} = 8^\circ$) $f_{\max} = 12$ mm, so daß der Adaptionsbereich von $f_k = \pm 4$ mm wegen der geringeren Toleranzen des Formlings und der größeren Gratfuß-Längsradien voll ausreicht. Ein Sensoreinsatz ist entbehrlich.

Das Schwammband-Werkzeug erwies sich als sehr unempfindlich gegenüber Abweichungen der Werkstück-Kontur von der programmierten Bahn. Dies hat seine Ur-

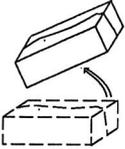
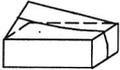
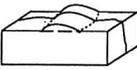
sache zum einen in dem gegenüber dem Entgratwerkzeug erheblich größeren Umschlingungswinkel, zum anderen in der Tendenz des Bandes, sich bei gekrümmten Stellen durch Umlappen an die Oberfläche anzulegen. Der letztgenannte Punkt führt insbesondere dazu, daß die Fingerspitzen der Tauchformen längst nicht so kritische Stellen sind wie beim Entgraten. Die Probleme liegen eher in der Höhenlage der Sattelflächen an den Fingerwurzeln. Hier muß tief genug gefahren werden, um den ganzen Finger zu bearbeiten, aber nicht so tief, daß das Schwammband zu stark gegen die Sattelfläche gedrückt wird und in diese einschneidet. Dies erfordert eine individuelle Berücksichtigung der Höhenlage des Werkstücks.

6 Möglichkeiten zur Toleranzkompensation

HSIEH unterteilt die bei der Bearbeitung von Gußteilen zu erfüllenden Meßfunktionen in drei Unterfunktionen [115]:

- * Gratfußlage festlegen
- * Gratfußlage verfolgen
- * Bearbeitung technologiegerecht durchführen

Die von ihm angegebene Gliederung der zu erfassenden Störgrößen ist jedoch nicht vollständig, denn es können zusätzlich zu insgesamt drei Grundtypen von Abweichungen zwischen Werkzeugbahn und Gratfußlage (Bild 69) noch Fälle unterschieden werden, in denen sich bei unverändertem Gratfußverlauf technologisch relevante Merkmale des Werkstücks verändern:

Abweichungen Einflußgrößen	Globale Abweichung: Verlagerung des gesamten Werkstücks 	Partielle Abweichung: Verschiebung begrenzter Bereiche 	Lokale Abweichung: Örtliche Form- änderung 
Werkstück- toleranzen	○	●	●
Aufspann- toleranzen	●		
Werkzeug- toleranzen	●		
Positionier- toleranzen			●

○ Einfluß

● starker Einfluß

Bild 69: Klassifikation der geometrischen Abweichungen zwischen Gratverlauf und Werkzeugbahn bei keramischen Formlingen

- G: Globale geometrische Abweichungen
- P: Partielle geometrische Abweichungen
- L: Lokale geometrische Abweichungen
- T: Globale Abweichungen technologischer Art
- X: Lokale technologische Abweichungen

Durch Kombination dieser fünf Typen läßt sich die Störcharakteristik jedes Werkstückes eindeutig beschreiben.

Beim Verputzen weißtrockener Keramik sind die wesentlichen Störgrößen globale Lageabweichungen des Werkstücks durch Aufspanntoleranzen, partielle Veränderungen des Gratverlaufs aufgrund von Deformationen und Verzügen des Formlings, sowie die variable Gratdicke. Da letztere keine Auswirkungen auf die Werkzeugbahn hat, ist sie als technologische Abweichung einzustufen. Hierbei hat die - hauptsächlich aus Formverschleiß herrührende - globale Variation des Gratquerschnitts innerhalb einer Werkstückfamilie nur vernachlässigbaren Einfluß auf die Technologie-Parameter. Im Gegensatz hierzu erfordern lokale Gratverdickungen Reaktionen des Werkzeugs. Die vorliegende Bearbeitungsaufgabe ist also sensortechnisch der Klasse GPX zuzuordnen, und man kann die Sensoraufgaben direkt einzelnen Fehlermerkmalen zuordnen.

Mit dem Sensoreinsatz werden im vorliegenden Anwendungsfall vier Ziele verfolgt:

- * Funktion sichern
- * Werkstück- und Systemtoleranzen ausgleichen
- * Programmierung vereinfachen
- * Qualität sichern

Konkret folgen daraus unter Berücksichtigung der Ausführungen in Kapitel 5.6 folgende Anforderungen an das Sensorsystem (Bild 70):

- * Erkennen unzulässiger Betriebszustände des Fertigungssystems (Werkzeugbruch, Verhaken)
- * Kompensation globaler Form- und Lageabweichungen des Werkstücks
- * Anpassen der Werkzeugbahn an den lokalen Gratverlauf
- * Erkennen lokaler Gratverdickungen

Störgrößen	⇒	Auswirkungen	⇒	Sensoraufgaben
Aufspanntoleranzen Lageabweichungen der Spannflächen	⇒	globale Gratverlagerung	⇒	Werkstücklage festlegen
Geometriefehler des Formlings	⇒	partielle Änderung des Gratverlaufs	⇒	Gratfußlage verfolgen
Verschleiß der Gießform	⇒	Varianz des Gratquerschnitt	⇒	Gratquerschnitt bestimmen

Bild 70: Sensoraufgaben beim Verputzen von Schlickerguß

6.1 Kompensationsstrategien

6.1.1 Passiver Toleranzausgleich

Von den bisher entwickelten Strategien zur Kompensation von Abweichungen zwischen Werkzeugbahn und Gratverlauf (Bild 71) ist diese Methode die am weitesten verbreitete. Sie nutzt die auftretenden Werkzeug-Reaktionskräfte durch Anordnung einer gedämpften Elastizität im Kraftfluß zwischen Aufspannung und Wirkorgan zur Anregung von Ausweichbewegungen. Auf diese Weise lassen sich alle Arten geometrischer Abweichungen ausgleichen. Hierbei muß die Rückstellkraft so eingestellt werden, daß sie deutlich über der zum Abtragen des Grates erforderlichen Kraft liegt, jedoch nicht so groß ist, daß das Werkzeug in das Werkstück eindringt (Bild 72).

Der passive Toleranzausgleich setzt also bei zunehmendem Spanvolumen einen deutlichen Anstieg der Passivkraft voraus [50]. Beim Entgraten ungebrannter Keramik ist dies nur für das Schaben der Fall. Technologische Abweichungen, wie im

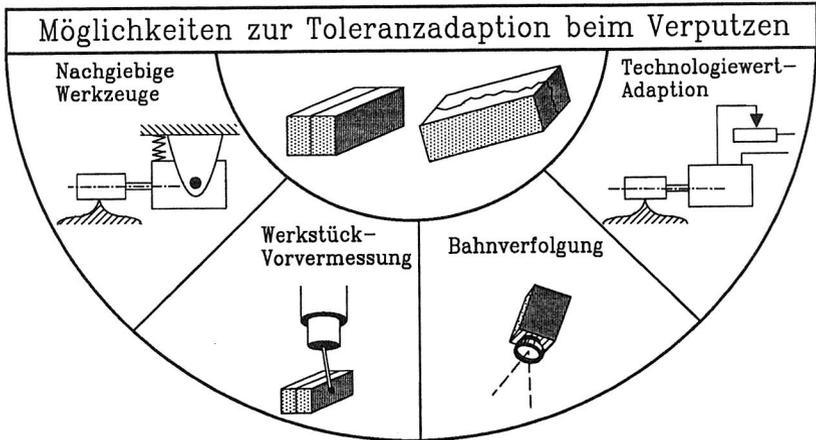


Bild 71: Strategien zur Toleranzadaption beim Verputzen von Werkstücken

vorliegenden Fall lokale Gratverdickungen, werden in der Regel nicht erkannt. Auch unter dem Gesichtspunkt einer vereinfachten Programmierung sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich.

Eine Variante dieser Methode gewinnt die Ausgleichsbewegung nicht aus technologischen Zusammenhängen, sondern rein geometrisch über ein parallel mitlaufendes Führungsorgan (zum Beispiel eine Rolle). Hierfür müssen zwei Voraussetzungen gegeben sein: Eine durchgehende, definierte Bezugsfläche am Werkstück, die genau parallel zum Grat verläuft und keine zu kleinen Radien aufweist, und eine konstante Orientierung des Werkzeugs bezüglich der Bahntangente. Keine dieser beiden Bedingungen kann für die gegebenen Werkstückgeometrien als erfüllt gelten.

6.1.2 Werkstück-Vorvermessung

Durch Anfahren vordefinierter, geometriestimmender Referenzpunkte am Werkstück mit einem Meßtaster können Maß- und Lageabweichungen des Teiles erkannt werden. Aus der Differenz zwischen der programmierten und der gemessenen Posi-

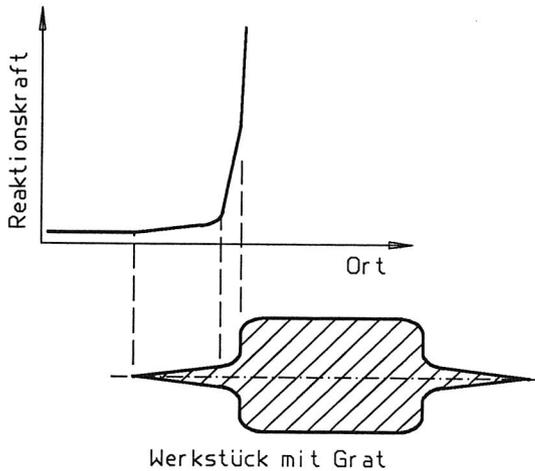


Bild 72: Idealer Verlauf der Reaktionskraft beim Entgraten (nach [50])

tion des Meßpunktes ergibt sich der Betrag, um den die programmierte Bahn verschoben bzw. verdreht werden muß, um mit der Istkontur übereinzustimmen.

Das Verfahren ist einfach und kostengünstig. Es leistet jedoch keinen Beitrag zu einer Vereinfachung beim Programmieren, weil die Bahn selbst weiterhin sehr genau festgelegt werden muß. Im Gegenteil kommt sogar noch der Aufwand für die Programmierung des Meßvorgangs hinzu. Die erforderliche Zeit für den Meßvorgang sowie eventuell für das Einwechseln des Meßtasters wirkt sich in einer Verlängerung der Stückzeit aus. Es können daher nur wenige Meßpunkte mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand erfaßt werden. Dies beschränkt die Anwendungsmöglichkeiten auf globale Abweichungen sowie partielle Verlagerungen ausgewählter Werkstückbereiche.

Verwendet man statt Meßtastern ein ortsfest installiertes Bildverarbeitungssystem, so entfällt die Handhabung von Sensoren. Weil zudem eine große Zahl von Punkten simultan abgetastet wird, verkürzt sich die Zeit für die Meßwertaufnahme deutlich, und der größere Informationsgehalt der Messung gestattet auch ein Erkennen lokaler

Konturfehler, die Generierung eines werkstückspezifischen Bewegungsprogramms sowie die Einbindung des Meßsystems als Instanz der Qualitätssicherung in einen integrierten Qualitäts-Regelkreis (Bild 73). Die Kamera kann außerhalb des Arbeitsraums des Handhabungsgeräts angeordnet werden, so daß eine Parallelisierung von Meßvorgang und Fertigungsprozeß möglich ist. Gegenüber Lösungen mit Meßtastern erhöht sich allerdings der Aufwand hinsichtlich Hardware und Datenauswertung erheblich.

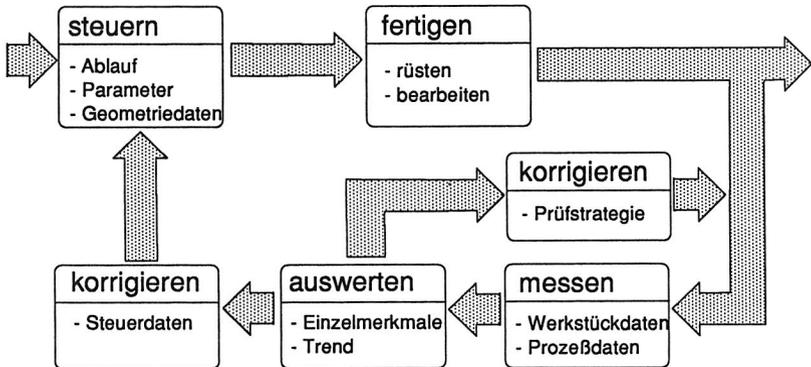


Bild 73: Kleiner Qualitäts-Regelkreis

6.1.3 Online-Bahnregelung durch Konturerfassung

Durch Rückführen von Sensorinformationen über die aktuelle Stellung des Werkzeugs in Bezug auf das Werkstück kann ein geschlossener Regelkreis geschaffen werden, der das Handhabungsgerät in die Lage versetzt, auf jedes Werkstück individuell zu reagieren. Ist der Meßwertaufnehmer direkt am Effektor befestigt, so werden kinematische und dynamische Positionierfehler des Handhabungsgeräts implizit mit berücksichtigt. Die Verwendung der Sensorinformationen zur Korrektur einer vorprogrammierten Bahn vereinfacht Sensorik und Steuerung, schränkt aber die Flexibilität des Systems ein. Weitergehende Konzepte streben an, durch mehrdimensionale Sensorsignale in Verbindung mit verbesserten Regelverfahren auf

eine Stützbahn verzichten zu können. Sie sind beim derzeitigen Stand noch nicht für einen industriellen Gebrauch einsetzbar.

Die Anwendung von In-Process-Sensoren stellt hohe Anforderungen an das gesamte Meß- und Handhabungssystem, denn Genauigkeit und dynamische Eigenschaften beeinflussen unmittelbar die bei einer gegebenen zulässigen Bahnabweichung erreichbare Bahngeschwindigkeit. Durch Rückwirkungen aus dem Bearbeitungsprozeß können Beeinträchtigungen der Messung auftreten. Der mitzuführende Sensor erhöht Gewicht und Volumen des bewegten Systems. Die Zugänglichkeit des Meßortes ist nicht immer gewährleistet. Bei der Bahnplanung muß die Ausrichtung des Sensors mit berücksichtigt werden. Da der Meßort des Sensors nur in den seltensten Fällen mit dem Wirkort des Werkzeugs identisch sein kann, muß der hieraus entstehende Versatz bei der Führungsgrößenerzeugung kompensiert werden.

Die direkte Rückkopplung der Sensorsignale über eine mehrdimensionale Sensorschnittstelle ergibt bei den marktgängigen Robotersteuerungen ein unbefriedigendes Regelverhalten. Dies hat seine Ursache insbesondere in der hohen Totzeit des Regelkreises aufgrund der begrenzten Geschwindigkeit der Datenübertragung zwischen Sensorsystem und Steuerung und der begrenzten dynamischen Stabilität der Lageregelkreise infolge geringer mechanischer Dämpfung des Handhabungsgerätes. Untersuchungen haben ergeben, daß die Totzeiten der Online-Funktionen marktgängiger Robotersteuerungen mit zwei- bis dreimal der Interpolations-Taktzeit oder 60-120 ms veranschlagt werden müssen [116, 117, 118, 119].

Ein definierter Sensorvorlauf (Bild 74) bietet Möglichkeiten zur Verbesserung der Systemdynamik. Für die Generierung und Übertragung der Führungsgrößen steht dann eine deutlich längere Zeit zur Verfügung, die dem Quotienten aus Vorlauflänge und Bahngeschwindigkeit entspricht. Dieser Ansatz erfordert jedoch einen schwenkbar gelagerten Sensor und spezielle Steuerungen zur lokalen Bahnplanung und Sensorausrichtung [120, 121]. Die Anwendung linearer Extrapolationsverfahren [122] kann nur bei kleinen Abweichungen eine Lösung darstellen.

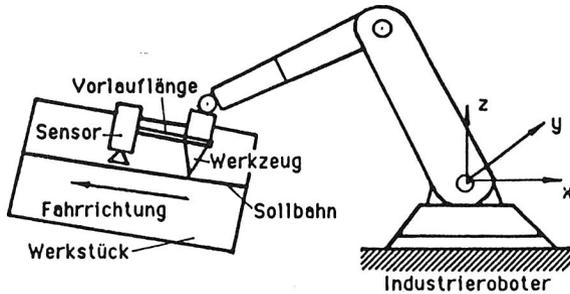


Bild 74: Bahnverfolgung mit vorlaufendem Sensor (aus [122])

HIRZINGER [123, 124] postulierte einen sogenannten prädiktiven Regler. Hier erfolgt eine Aufzeichnung der auszuregelnden Bahnabweichungen in einem speziellen Meßlauf. Im anschließenden Bearbeitungslauf werden dann die gemessenen Korrekturdaten um den Betrag der Reaktionszeit des Robotersystems verfrüht auf den Lageregelkreis geschaltet, um so eine verzögerungsfreie Regelung zu erhalten. Dieses Konzept verlängert die Bearbeitungsdauer erheblich, weil jedes Werkstück zweimal unter den selben Bedingungen abgefahren werden muß, und erfordert einen großen Speicher für Korrekturwerte sowie eine genaue zeitliche Synchronisierung der Stellgrößenaufschaltung mit der Roboterbewegung.

In [49, 125] wird versucht, die Dynamik des Regelkreises zu steigern und die Schnittstellenprobleme mit handelsüblichen Robotersteuerungen zu umgehen, indem nicht auf den Lageregelkreis des Handhabungsgeräts eingewirkt wird, sondern der Sensor eine speziell hierfür vorgesehene zusätzliche Handhabungsachse verstellt. Dies ist für Fälle mit wenigen zu regelnden Freiheitsgraden ein wirkungsvoller Ansatz. Trotz des Wegfalls der Online-Sensorschnittstelle an der Robotersteuerung sind damit allerdings nicht unbeträchtliche Kosten verbunden. Beim derzeitigen Stand der Technik lassen sich mit linearen Zusatzachsen Ausgleichswege von ± 5 mm und Betätigungsfrequenzen von 10 Hz realisieren, was für das Drahtschaben nicht immer ausreicht.

6.1.4 Technologie-Adaption

ABELE [54] schlug als erster vor, die Sensorinformationen nicht zur Beeinflussung der Bahn des Werkzeugs, sondern zur Variation seiner technologischen Parameter, zum Beispiel des Anpreßdrucks oder der Spindel-Drehzahl von Fräsern, zu verwenden. Derartige Lösungen wurden bereits verschiedentlich ausgeführt. Vorteilhaft ist dabei, daß nicht mehr in die Lageregelung des Handhabungsgeräts eingegriffen werden muß. Dadurch vereinfacht sich die technische Ausführung, und die Regeldynamik wird nur durch das Ansprechverhalten auf Veränderungen der Technologie-Parameter bestimmt.

Die Technologieparameter beim Drahtschaben und Verschwämmen sind Draht- bzw. Schwammvorspannung, Bahngeschwindigkeit, Zustelltiefe sowie beim Verschwämmen außerdem noch Bandgeschwindigkeit und Wasserzufuhr. Die einzige dieser Variablen, die mit Bahnabweichungen in Beziehung steht, ist die Zustelltiefe. Wie in Kapitel 5.3.2 gezeigt, ist aber just die Begrenzung dieser Größe bestimmend für die maximale Bahnabweichung. Die erlaubte Zustelltiefe kann auch durch Anpassung anderer Parameter nicht über dieses Maß hinaus variiert werden. Daher kann der Weg der Technologiewertadaption für die Kompensation von Lageabweichungen nicht mit Aussicht auf Erfolg beschritten werden.

6.2 Mögliche Wirkprinzipien für Sensoren in der Keramikproduktion

6.2.1 Eindimensionale Abstandssensoren

Die einfachste Art von Sensoren sind eindimensionale Meßwertaufnehmer, die den Abstand zur Werkstückoberfläche feststellen. Sie sind kompakt, kostengünstig und in vielerlei Ausführungen verfügbar. Da Sensoren mit binärem Ausgangssignal keine quantitative Information liefern, kommen sie für die Verwendung in einem Bahnregelkreis kaum in Frage, denn das Handhabungsgerät kann darauf nur mit einer sprung-

haften Veränderung seiner Bewegung um einen konstanten Wert reagieren, so daß unstetige Bahnen mit treppenhaftem Verlauf entstehen [126].

Im Vergleich zu schaltenden Gebern liefern kontinuierlich arbeitende Sensoren ein stetiges, von der Stellung des Meßwertaufnehmers gegenüber der Werkstückoberfläche abhängiges Ausgangssignal. Hierzu gehören beispielsweise mechanische Meßtaster, pneumatische Abstandsgeber, Ultraschall-Sensoren, tangentielle und laterale Lichttaster oder elektrische Näherungsschalter mit Analogausgang. Zur Gewinnung zusätzlicher Informationen für die Werkzeugorientierung und Bahnplanung wäre die Bildung eines Dreibeins derartiger Sensoren auf drei verschiedene, nahe beieinander und nicht auf einer Linie befindliche Oberflächenpunkte notwendig [127, 128].

In der Literatur werden ferner für Entgrat-Anwendungen verschiedene Sensor-konzepte zur Messung der Zustelltiefe beschrieben, die auf einer hochdynamischen Auswertung der Schneiden-Eingriffsdauer bzw. des zeitlichen Verlaufs der Umfangskraft speziell gestalteter Fräswerkzeuge beruhen [49, 56, 129]. Diese Methoden sind jedoch für das vorliegende Einsatzgebiet nicht geeignet, weil sie entweder einen hohen Zerspanwiderstand des Werkstücks oder einen elektrisch leitenden Werkstoff erfordern. Hinzu kommen die bereits beschriebenen anderweitigen Probleme bei der Fräsbearbeitung weißtrockener Keramik.

6.2.2 Zweidimensionale Sensoren

Wird nicht nur eindimensional der Abstand zu einem einzelnen Punkt auf dem Werkstück gemessen, sondern das Oberflächenprofil entlang einer vorgegebenen Linie, dann können bedeutend mehr Informationen gewonnen werden. Liegt die Meßlinie quer zur Vorschubrichtung, so ist es möglich, die seitliche Verschiebung des Grates gegenüber dem Werkzeug und das Gratquerschnittsprofil zu bestimmen. Wird in Vorschubrichtung gemessen, kann das Längsprofil des Grates ermittelt und zur Bahnplanung oder zur Beeinflussung der Orientierung des Werkzeugs verwendet werden.

Derartige Sensoren wurden bereits durch parallele Anordnung mehrerer eindimensionaler Abstandsaufnehmer [54], mit mehrdimensional wirkenden taktilen Tasteinheiten [123, 126], als optische Triangulationssysteme [130, 131], nach dem Lichtschnittprinzip [130], mit Laserscannern [132] oder als Bildverarbeitungssysteme [120, 133] realisiert. Problematisch sind vor allem das relativ hohe Gewicht und die großen Abmessungen der Meßwertaufnehmer, die zudem mit nicht geringem Aufwand vor schädlichen Einflüssen aus dem Prozeß geschützt werden müssen.

6.2.3 Mehrdimensionale Sensoren

Die Gewinnung räumlicher Informationen über die Werkstückgestalt ist bereits seit einiger Zeit Gegenstand der Forschung, doch haben diese Arbeiten noch keine kurzfristig praktisch nutzbaren Lösungen ergeben. Sowohl die flächige Anordnung eindimensionaler Tastelemente [54] als auch optische Abtastverfahren wie etwa das 3D-Laserscanning (Bild 75), stereoskopische Ansätze [134] sowie die Korrelation zweidimensionaler Kamerabilder mit vordefinierten dreidimensionalen Umgebungsmodellen [135] oder ihre Analyse mit wissensbasierten Methoden [136] erfordern einen hohen Aufwand für Meßwertaufnehmer und Signalverarbeitung. Meist ist die erreichbare Auflösung unbefriedigend, und die langen Aufnahme- und Auswertzeiten machen die Verfahren nicht mehr echtzeitfähig. Außerdem werden hohe Anforderungen an die Zugänglichkeit der zu vermessenden Werkstückpartien gestellt. Mehrdimensionale Kraftsensoren haben Marktreife erlangt, stoßen aber wegen der beschränkten Systemdynamik rasch an Grenzen [118].

6.2.4 Auswertung von Technologiedaten

Verschiedene Prozeßparameter hängen vom Spanvolumen oder von der Werkzeugauslenkung ab und können dafür genutzt werden, durch Beeinflussung des Bewegungsablaufs den Wirkort des Werkzeugs an den Gratverlauf anzupassen [55]. Beim Drahtschaben sind solche Parameter die Vorschubkraft und die Passivkraft.

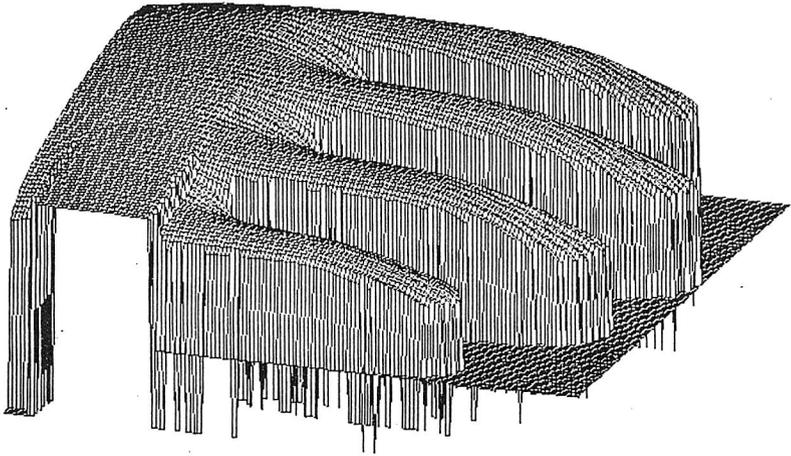


Bild 75: Mit Laserscanner abgetastetes Halbrelied der Handzone einer Tauchform
(Bild: Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für technische Optik)

Diese Werte hängen gemäß Gleichung (5.2) bei konstanter Drahtvorspannung nur von der Drahtauslenkung in Vorschub- bzw. Zustellrichtung ab. Ihre Bestimmung erfordert den Einbau eines Kraftaufnehmers entweder an den Führungsrollen oder am Werkzeugflansch, ist also mit gewissem Aufwand und wegen der im Verhältnis zu den Schnitt- und Passivkräften sehr großen Massenkräfte auch mit Ungenauigkeiten verbunden.

Beim Verschwämmen kommen zu den eben genannten Parametern noch die Leistung bzw. die Drehzahl des Antriebsmotors hinzu. Diese Daten können mit verhältnismäßig einfachen Meßwertaufnehmern bestimmt werden. Die daraus ableitbare Information über die Anpreßkraft des Bandes ist jedoch wegen des nicht konstanten Reibungsbeiwerts zwischen Schwamm und Werkstück sehr ungenau.

6.3 Konzeptauswahl

Für die Auswahl von Sensoren eignet sich sehr gut die Technik des morphologischen Kastens. In Bild 76 sind die wesentlichen technischen Kriterien mit ihren möglichen Ausprägungen zusammengestellt. Scheidet man zunächst die für eine Anwendung beim Verputzen weißtrockener Keramik grundsätzlich ungeeigneten Prinzipien aus, so können durch Kombination der verbleibenden Ansätze die grundsätzlich möglichen Sensorkonzepte ermittelt werden, aus deren Bewertung sich dann die optimale Lösung ergibt. Dieser Ablauf hat für jede Sensoraufgabe getrennt zu erfolgen.

Morphologischer Kasten zur Sensorauswahl							
Kriterium		Ausprägung					
		1	2	3	4	5	6
Art der Meßwertaufnahme	A	taktil	kapazitiv	induktiv	optisch	auditiv	Staudruck
Meßrichtung	B	lateral	transversal				
Art der Sensorgroße	C	binär	skalar	vektoriell			
Schnittstelle	D	binär	analog	digital-parallel	Bit-seriell	Byte-seriell	
Steuerungsart	E	schaltend	steuernd	regelnd	lernend		
Wirkung der Sensorsignale	F	Ablauf	Technologie-daten	Position, Orientierung			

Bild 76: Morphologischer Kasten zur Sensorauswahl

Wegen der kleinen Gratfußradien und der räumlich gewölbten Werkstückoberflächen keramischer Formlinge kommen für eine Konturerfassung nur Sensorkonzepte in Betracht, bei denen der Meßort nahe am Wirkort des Werkzeugs liegt. Transversal messende Systeme sowie mechanische Taster haben diesbezüglich den Nachteil, daß sie nicht auf die eigentlich interessierende ideale Werkstückkontur ansprechen, sondern bereits auf die Gratspitze, so daß sie nur mit Nachlauf an bereits entgrateten Werkstückpartien messen können. Ein weiteres Problem taktiler Konzepte liegt darin,

daß die relativ große Oberflächenrauigkeit keramischer Rohlinge einen nicht unbeträchtlichen Rauschanteil im Meßsignal erzeugt, der die Genauigkeit der Konturbeschreibung begrenzt.

Demgegenüber liefern berührungslos lateral messende Sensoren bei geeigneter Auslegung als Meßsignal nicht das Minimum der Entfernungen im Tastbereich, sondern sie bilden einen Mittelwert über das Meßfenster (Bild 77). Weil Grate an Keramikteilen nur eine geringe Gratfußbreite aufweisen, ist hier der Einfluß der Grathöhe sehr klein.

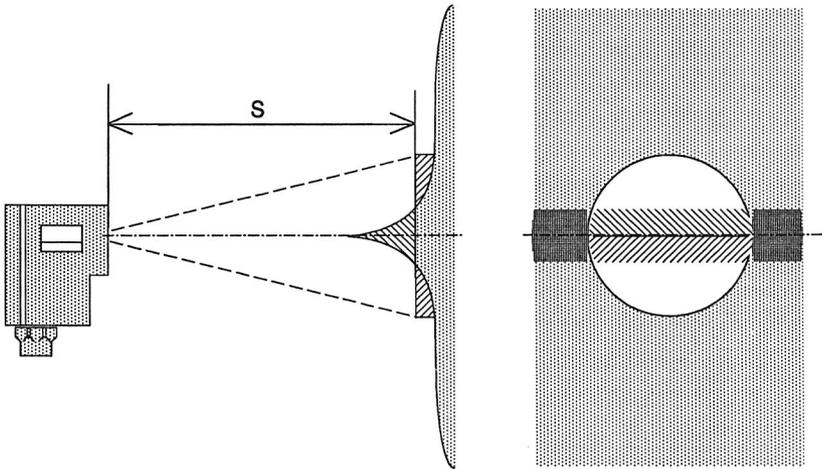


Bild 77: Mittelwertbildung über Lichtfleck bei Entfernungsmessung mit Reflexionstaster

Von den berührungslos-lateral arbeitenden Systemen sind aufgrund des physikalischen Wirkprinzips nur optisch arbeitende Sensoren genau und zuverlässig genug zum Messen keramischer Werkstücke [137]. Aufgrund der schlechten Zugänglichkeit des Grates ist jedoch zur vollständigen Erfassung des Gratverlaufes ein extremer Miniaturisierungsgrad der Aufnehmer erforderlich. Bei der momentan erreichbaren Baugröße lassen sich Abschattungseffekte an schwierig zugänglichen Stellen (z.B. zwischen den Fingern von Tauchformen) nicht vermeiden (Bild 78). Dies gilt insbe-

sondere für Lichtschnitt- und Scan-Verfahren, die als einzige in der Lage wären, auch verlässliche Informationen über den Verlauf des Grates quer zur Vorschubrichtung und seinen Querschnitt zu liefern.

Grundsätzlich zeigen optische Abstandssensoren jedoch wegen der mattweißen bis bräunlichen Oberfläche der Formlinge sehr gute Eigenschaften. Versuche ergaben für Triangulationssensoren eine Meßgenauigkeit von 0,2 mm und eine gute Linearität des Signals, während bei Körpern mit glänzender Oberfläche nicht unbeträchtliche Meßfehler auftreten können.

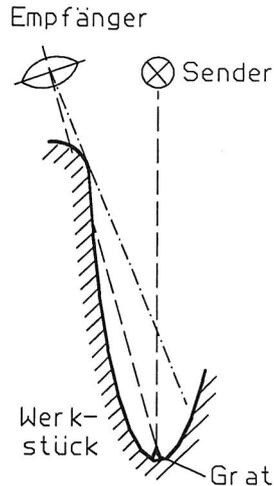


Bild 78: Abschattungseffekt bei lateralen Sensoren

Bildauswertesysteme für großflächige Szenen sind beim derzeitigen Stand nur für Teile mit annähernd ebenem Gratverlauf einsetzbar. Dieses Kriterium ist bei Ambitextrous-Tauchformen erfüllt. Hier brachte die Erprobung eines Grauwert-Bildverarbeitungssystems trotz des transversalen Meßprinzips gute Resultate¹. Die Verfälschung der aufgenommenen Werkstückkontur durch den Grat läßt sich durch geschickte Beleuchtung sowie die Berücksichtigung eines Bahn-Offsets vom Betrag der mittleren Grathöhe einschränken. Obwohl lediglich eine Linearapproximation der Kontur implementiert war, konnte bei einer Kamera-Auflösung von 0,4 mm mit einem dynamisch optimierten Handhabungssystem eine in der Größenordnung von einem Millimeter liegende maximale Bahnabweichung von der Istkontur realisiert werden. Die Meßzeit betrug nur wenige Sekunden, wobei Laufzeituntersuchungen zeigten, daß nicht die eigentliche Konturdetektion, sondern die Bildaufnahme und Binärisierung den größten Anteil an der Verarbeitungszeit ausmachen. Dies sind Vorgänge, die sich bei einer Realisierung in Hardware beschleunigen ließen.

¹ Für die Durchführung dieser Versuche und die Überlassung ihrer Ergebnisse danke ich Herrn Dipl.-Ing. E. Sommer von der Arbeitsgruppe für Steuerungstechnik und Sensoren des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß keines der bekannten Sensorkonzepte allen Sensoraufgaben gerecht wird. Laterale optische Taster können nur zur Messung gut zugänglicher Konturstellen eingesetzt werden. Sie kommen daher vor allem für eine intermittierende Werkstück-Vorvermessung in Frage. Bildauswertesysteme müssen zur Zeit noch als Sonderlösung für Anwendungsfelder mit ausschließlich zweidimensionalem Gratverlauf angesehen werden. Geeignete In-Process-Sensoren, die Meßgrößen zur Festlegung der Tangente des Gratfußverlaufs und damit für eine sensorgestützte Bahnplanung liefern könnten, sind nicht verfügbar.

Demgegenüber läßt sich die Auslenkung des Werkzeugs einfach und mit hoher Genauigkeit messen. Man erhält mit der Zustelltiefe unmittelbar eine geeignete Eingangsgröße für das Regelsystem. Dieser Ansatz verspricht eine große Zuverlässigkeit und unterliegt keinen Restriktionen hinsichtlich der Zugänglichkeit des Grates. Als weiterer wesentlicher Vorteil ist zu sehen, daß Meß- und Wirkort identisch sind. Weil die erhaltene Meßgröße nur eindimensional und beim Drahtwerkzeug zudem in ihrer Richtung variabel ist, kann allerdings der räumliche Gratverlauf auf diese Weise nicht erkannt werden, so daß die Programmierung einer Stützbahn unter Festlegung der Orientierung des Koordinatensystems für die Korrekturbewegung erforderlich ist.

6.4 Ausführung des gewählten Systems

In dem realisierten, dreistufigen Sensorkonzept [92, 99], das in Bild 79 dargestellt ist, wird jedem Ziel der Sensoranwendung ein Meßsystem zugeordnet: Die Gewährleistung der Betriebssicherheit erfolgt durch Endschalter im Werkzeug. Die Kompensation von globalen Abweichungen bei größeren Formlingen wurde durch eine Vorvermessung von Referenzpunkten implementiert. Zur Anpassung an partielle Konturabweichungen wird der Betrag der Werkzeugauslenkung von einem Rechner ausgewertet und über eine Online-Schnittstelle als Stellgröße in den Lageregelkreis des Handhabungsgeräts zurückgeführt. Zusätzlich kann der Rechner die zeitliche

Änderung der Meßgröße als technologische Information für die Anpassung der Werkzeugparameter an erhebliche Veränderungen des Gratquerschnitts verwenden.

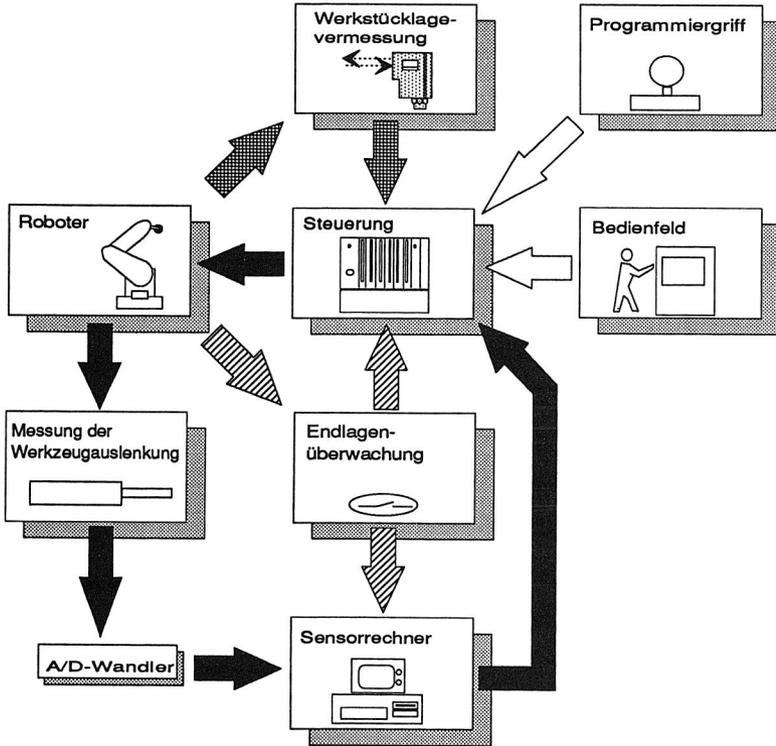


Bild 79: Anordnung des Sensorsystems

6.4.1 Werkzeug-Endlagenüberwachung

Zum Erkennen gefährlicher Betriebszustände des Entgratwerkzeugs wurde die Vorspanneinrichtung des Drahtes mit zwei Endschaltern versehen (Nr. 7 in Bild 46), welche entweder direkt oder über den Sensorrechner in den Arbeitsablauf eingreifen

können. Der vordere Endschalter spricht an, wenn der Zylinder infolge zu großer Bahnabweichungen oder Verhaken des Drahtes so weit ausgefahren ist, daß die höchstzulässige Rückstellkraft erreicht ist. Der hintere Endschalter gibt ein Signal, wenn der Zylinder hinter die Grundstellung zurückgefahren ist, was einen Werkzeugbruch bedeutet. Zur Fehlerbeseitigung erfolgt im ersten Fall ein manuelles oder programmgesteuertes Freifahren des Werkzeugs, im zweiten Fall eine Erneuerung des Drahtes durch den Bediener oder ein automatischer Werkzeugwechsel.

In ähnlicher Weise sind auch an der Spanneinheit des Verschwämm-Werkzeugs Endschalter sowie zusätzlich eine Drehmomenten-Überwachung für den Antrieb des Bandes vorgesehen.

6.4.2 Werkstück-Vorvermessung

Zum Erkennen der Werkstücklage dient ein am Werkzeug angebrachter berührungsloser optischer Meßtaster (Nr. 5 in Bild 46), mit dem der aufgespannte Formling in seinem oberen Teil angetastet wird, um dessen globale Verlagerung zu ermitteln. Je nach der Abweichung Δx_r dieser Position von der Referenzlage x_r wird dann die programmierte Bahn um den Betrag Δx_k verschoben und im Mittelpunkt der Aufspannung um den Winkel $\Delta \Gamma$ gekippt (Bild 80). Wie in Kapitel 3.5 gezeigt, kann bereits durch diese Eliminierung globaler Verlagerungen das Toleranzfeld so weit eingeschränkt werden, daß ein zusätzliches Antasten der einzelnen Finger von Tauchformen zur Ermittlung ihrer partiellen Deformierung entbehrlich ist. Da hingegen das höhenrichtige Umfahren der Finger sowohl beim Entgraten als auch beim Verschwämmen von Bedeutung ist, findet ein zweiter Meßvorgang für deren Höhenlage statt.

Um die Nebenzeiten zu verkürzen, wird die vor dem Entgraten gemessene Lage des Werkstücks auch für die Korrektur der Bahn des Schwamm-Werkzeugs verwendet. Hierfür werden die Meßdaten steuerungsintern in reservierten Variablen abgespeichert.

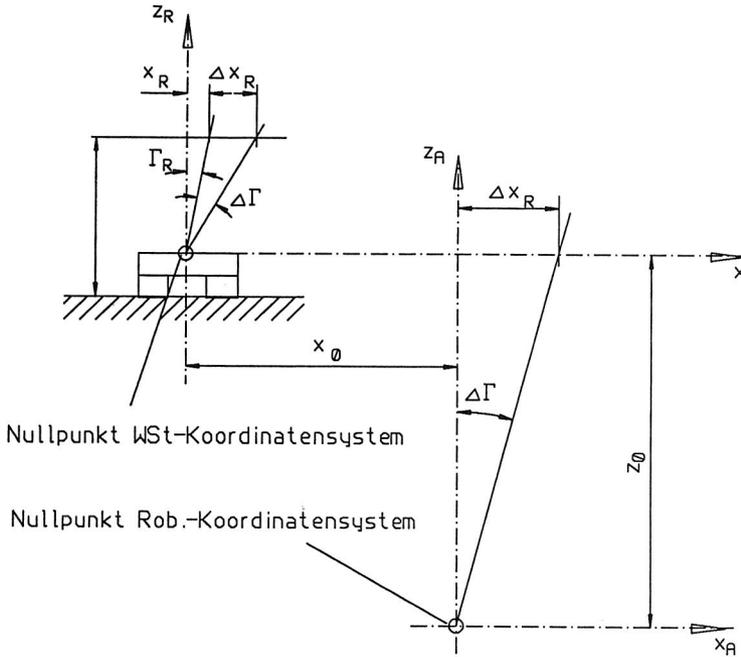


Bild 80: Anpassung der programmierten Bahn an globale Werkstückverlagerungen durch Verschiebung des Roboter-Koordinatensystems

6.4.3 Rückführung der Werkzeugauslenkung und Technologiewert-Adaption

Zur Führung des Handhabungsgeräts in einem geschlossenen sensorgestützten Regelkreis liest ein Rechner über einen Analog-Digital-Wandler die gemessene Auslenkung des Schabdrahtes ein und führt die hieraus bestimmte Regelgröße in Form eines binär codierten, sechsdimensionalen Bahnkorrekturvektors über eine serielle Schnittstelle in den Lageregelkreis des Handhabungsgeräts zurück. Der Einsatz des Rechners gestattet eine verfahrensspezifische Optimierung der Regelalgorithmen sowie die Einbeziehung zusätzlicher Funktionen. Hierzu gehört im vor-

liegenden Fall insbesondere die Technologiewert-Adaption zur Reaktion auf lokale Gratverdickungen.

Die Beziehung zwischen der Längenänderung s des Schabdrahtes und dem die eigentliche Regelgröße darstellenden Auslenkwinkel α , wie sie leicht durch Einsetzen von Gleichung (5.2) in die Gleichung (5.6) gewonnen werden kann, ist in Bild 81 graphisch dargestellt. Man erkennt, daß die Steigung der Kurve in dem besonders wichtigen Winkelbereich unter 5° sehr klein wird. Dies bedeutet, daß eine Bestimmung der Werkzeugauslenkung durch Messung der Zylinderstellung bei geringen Zustelltiefen mit großen Ungenauigkeiten behaftet ist, da die Meßgröße durch Elastizitäten und Reibungseffekte im Werkzeug stark überlagert wird. Hinzu kommt, daß das Ausgangssignal dieser Meßanordnung für die Verwendung in einem Regelkreis erst linearisiert werden muß.

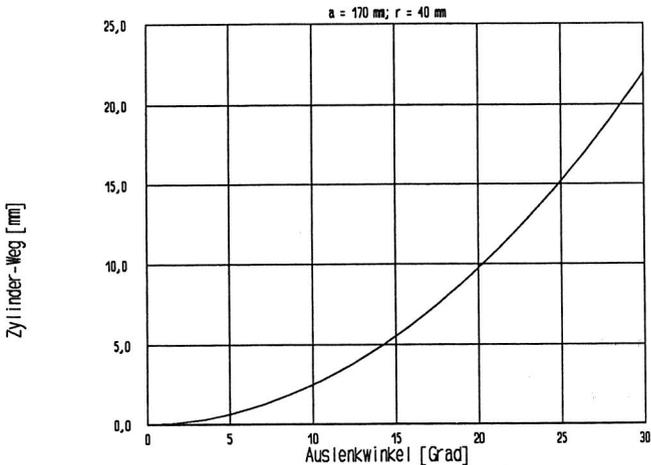


Bild 81: Beziehung zwischen Auslenkwinkel und Längenänderung des Schabdrahtes

Daher wird als Meßwert von einem Winkelaufnehmer (Nr. 6 in Bild 46 auf Seite 60) über einen Hebel der eigentliche Drahtauslenkwinkel bestimmt. Man erhält so unmittelbar eine lineare Meßgröße, die mit Gleichung (5.2) bzw. angenähert mit

Gleichung (5.3) leicht in die Stellgröße "Zustelltiefe" umgerechnet werden kann. Auch diese Umrechnung ist in weiten Bereichen mit guter Genauigkeit linearisierbar (Bild 82). Zur Entkopplung des Meßsystems vom Nachschleppeffekt des Drahtes ist in Vorschubrichtung eine Relativbewegung zwischen Draht und Hebel möglich. Da der Auslenkwinkel auch eine Funktion der Zustellkraft ist, findet keine reine Weg-, sondern gleichzeitig auch eine Kraftregelung statt.

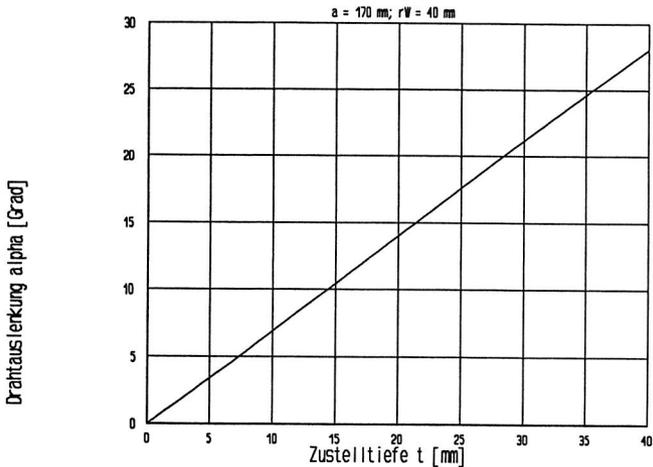


Bild 82: Zusammenhang zwischen Zustelltiefe und Drahtauslenkwinkel

Vorteilhaft bei einer direkten Messung der Drahtauslenkung ist ferner, daß es möglich wird, nicht nur den Betrag, sondern auch die Richtung der Deviation zu messen. Damit können auch Auslenkungen mit negativem Vorzeichen erkannt und ausgeregelt werden. Das Werkzeug ist also ziehend und drückend gleichermaßen einsatzfähig.

Zur Implementierung der Sensorfunktionen wurde unter Einsatz von CASE-Tools das Programm CERAM-TRACK entwickelt. Seine Aufgaben sind:

- * Initialisierung der Sensorschnittstelle an der RC
- * Einlesen der Meßdaten, Filterung und Plausibilitätskontrolle

- * Bestimmen der Stellgröße und Erzeugung eines Korrekturvektors für die Roboterbahn
- * Übertragung der Sensordaten auf die RC
- * Erkennen von Gratverdickungen und Anpassung der Drahtvorspannung durch Ansteuerung des Werkzeug-Ventils
- * Überwachung der Werkzeug-Endlagen
- * Bedienerführung und Visualisierung des Systemzustands

Der Bediener bekommt die gemessenen Werte, die daraus bestimmten Regel- und Stellgrößen sowie Fehlerzustände graphisch am Bildschirm angezeigt (Bild 83). Alle Reglerparameter können über ein Parametrieremenü verändert werden. Die gewählten Werte werden automatisch in einer Datei gesichert.

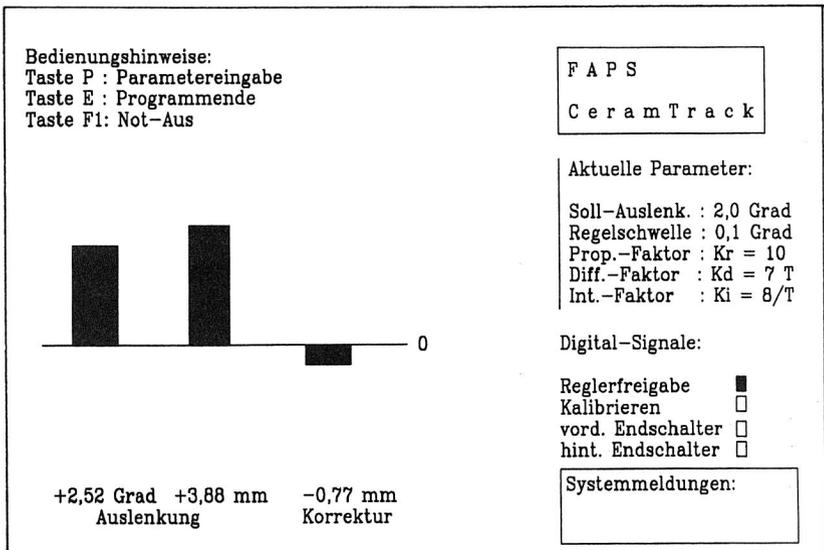


Bild 83: Bildschirmanzeige des Programms CERAM-TRACK

Zur Bestimmung der Richtung der Korrekturbewegung wäre es prinzipiell möglich, die Orientierung des Werkzeugs im Raum und die Richtung der programmierten Bahn in der Robotersteuerung abzufragen und hieraus sowie aus der gemessenen

Drahtauslenkung einen raumfesten sechsdimensionalen Korrekturvektor für die Werkzeugbewegung zu erzeugen. Dieser Weg ist jedoch mit einem hohen hard- und softwaretechnischen Aufwand verbunden. Wegen der langen Reaktionszeiten von DNC-Schnittstellen und der großen Menge zu übertragender und zu verarbeitender Daten verspricht er zudem keine befriedigende Dynamik des Regelsystems. Wesentlich einfacher ist es demgegenüber, im Werkzeug-Koordinatensystem eine eindimensionale Regelung in der Ebene des Tragbügels, also der idealen Zustellrichtung, zu realisieren. Die Informationen über die Richtung der Korrekturbewegung an jedem Bahnpunkt sind dabei implizit in der programmierten Orientierung des Werkzeugs enthalten.

Die Regelungen von Industrierobotern gehen beinahe ausnahmslos vom klassischen Prinzip der kaskadierten Positions-Geschwindigkeitsregelung aus. Gegenüber einer kompakten digitalen Regelung weist diese Struktur einige Vorzüge hinsichtlich der konstruktiven Realisierung und der Inbetriebnahme auf. Auch werden an die Abtastrate der digitalen Positionsregelung keine extremen Forderungen gestellt. Allerdings ist das Führungsverhalten einer solchen Regelung langsamer. Die Art der zur Verfügung stehenden Meßgrößen und die vorgegebene Konzeption der Sensor-Schnittstelle an der RC legten das Konzept nahe, der RC-internen Positionsregelung auf kartesischer Ebene eine weitere Positionsregelung hierarchisch zu überlagern. Bild 84 zeigt die Struktur des Regelkreises. Aus der Differenz zwischen der gemessenen und der gewünschten Werkzeug-Auslenkung wird als Stellgröße die Verschiebung des Werkzeugs in Zustellrichtung ermittelt und an die RC übertragen. Der Roboter und seine Steuerung wurden hierbei vereinfacht durch ein Totzeit- und ein Integralglied modelliert. Dieser Ansatz genügt erfahrungsgemäß für äußere Regelkreise (Zum inneren Aufbau der Regelung eines Roboters siehe z. B. [138, 139]).

Die Schwierigkeit des Reglerentwurfs besteht darin, daß etliche Parameter des Regelkreis-Modells unbekannt sind bzw. stark variieren. Es wurde daher - wie bei der Mehrzahl der anderen bekannten Anwendungen auch - von heuristischen Lösungsansätzen ausgegangen. Durch Wahl eines PID-Reglers nach dem sogenannten Geschwindigkeitsalgorithmus [140] können bleibende Regelabweichungen, insbesondere bei dem für viele Schlickergußteile typischen Konturverlauf mit langen

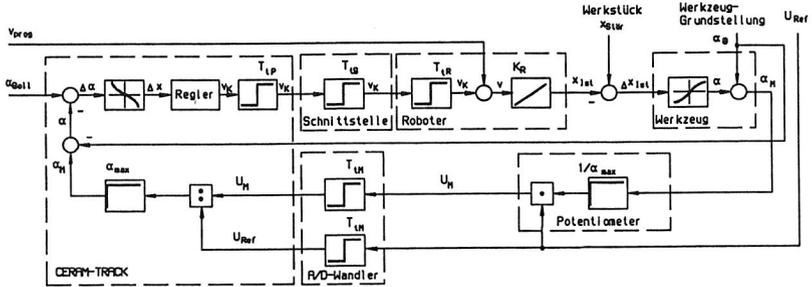


Bild 84: Struktur des Regelkreises zur Konturverfolgung

rampenförmigen Abschnitten, vermieden, gleichzeitig jedoch eine hohe Regeldynamik und ein günstiges Überschwingverhalten bei impulsartigen Signalverläufen der Regelgröße realisiert werden.

6.5 Erprobungsergebnisse

Die mit der beschriebenen Form der Werkstück-Vorvermessung erreichte Meßgenauigkeit reichte bei voller Ausnutzung des Adaptionsbereichs der Werkzeuge aus, um selbst bei komplizierten Werkstücken, wie etwa Tauchformen, ein störungsfreies Umfahren der gesamten Kontur zu gewährleisten. Zur Vermeidung einer Restgratbildung an engen Außenradien muß jedoch die Bahn des Entgratwerkzeugs in diesen Bereichen sehr genau eingegeben werden.

Die Vorteile einer sensorgestützten Online-Bahnkorrektur sind in mehrfacher Hinsicht zu sehen: Anzahl und Genauigkeit der zu programmierenden Bahnstützpunkte können verringert werden, und die Anfälligkeit gegen besonders große Deformationen des Werkstücks nimmt ab. Wie bei jeder PI-Regelung können auch bei der hier realisierten Lösung temporäre Regelschwingungen und damit Schwankungen in der Zustelltiefe nicht ganz vermieden werden [141]. Ihr Betrag hängt von der Dynamik von Meßwertverarbeitung, Robotersteuerung und Antrieben sowie von der ge-

fahrenen Bahngeschwindigkeit ab. Bei richtiger Wahl der Reglerparameter sind diese Schwankungen kleiner als die dynamische Bahnabweichung des Roboters. Die inhärente Nachgiebigkeit des Werkzeugs genügt normalerweise für einen Ausgleich. Gleichzeitig gestattet sie hohe Reglerverstärkungen zur Verbesserung der Dynamik. Weil das Meßsignal aufgrund der rauhen Werkstückoberfläche einen etwas unruhigen Verlauf zeigt, ist zur Vermeidung von Instabilitäten wichtig, daß der D-Anteil des Reglers nicht zu groß gewählt wird.

Für eine einwandfreie Funktion des Regelkreises muß außerdem sichergestellt sein, daß der vom Werkzeug während der Reaktionszeit T_i des Regelkreises zurückgelegte Weg s_r noch innerhalb des Adaptionbereichs f_k liegt, wie er in Kapitel 5.6 definiert wurde (Bild 85). Aus

$$s_r = v \cdot T_i \quad (6.1)$$

und

$$s_{r,max} = f_k / m \quad (6.2)$$

folgt als Bedingung für die Stützpunktanordnung:

$$m_{max} = \tan \delta = \frac{f_k}{v \cdot T_i} \quad (6.3)$$

m ist hierbei die Richtungsdifferenz zwischen realem Grat und programmierter Werkzeugbahn, repräsentiert durch den Winkel δ zwischen beiden Vektoren. Zu beachten ist, daß diese Bedingung lediglich den Grad der Ähnlichkeit von Stütz-
bahn und Gratverlauf betrifft, jedoch keine Restriktion hinsichtlich der absoluten Positionsdifferenz beider Konturen darstellt.

Die Sensorfunktion der verwendeten Robotersteuerung wirkt intern auf der Ebene der Koordinatentransformation durch Verschiebung des Koordinatensystems. Gegenüber anderen Konzepten, die auf höheren Ebenen wie Programminterpretierer, Interpolationsvorbereitung oder Interpolation eingreifen, ist dadurch prinzipiell eine raschere Reaktion auf Sensordaten möglich [119]. Die Dynamik des Regelkreises hält sich dennoch in Grenzen. Dies ist auf mehrere Einflußfaktoren zurückzuführen:

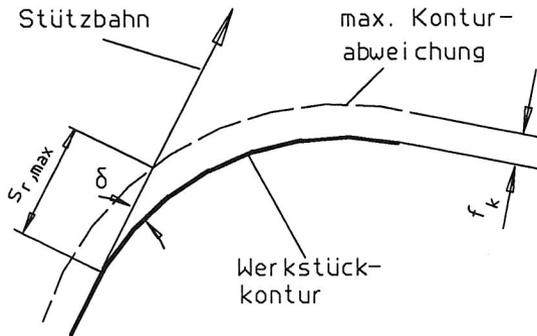


Bild 85: Bestimmung des maximalen Reaktionswegs bei Sensorführung

- * Übertragungszeit über die serielle Sensorschnittstelle (bei 9600 Baud Datenrate beträgt $T_{i,s} = 13$ ms pro 16 Byte-Bahnkorrekturvektor)
- * Signalverarbeitungszeit
- * Ansprechzeit der Robotermechanik

Die Ersatzzeitkonstante für die Nachbildung des Robotersystems einschließlich der Online-Sensorfunktion wurde durch Aufnahme der Sprungantwort mit $T_{i,r} = 115$ ms bestimmt. Die Ansprechzeit des Meßwertaufnehmers ist vernachlässigbar. Die Totzeit im Sensorrechner beträgt bei Verwendung einer leistungsfähigen Hardware (CPU 80386) ungefähr $T_{i,m} + T_{i,p} = 50$ ms. Mit der Signalübertragungszeit zusammen ergeben diese Werte eine gesamte Totzeit von etwa $T_i = 0,18$ s.

Aus der in Kapitel 5.6 für Tauchformen genannten größtmöglichen Abweichung $f_k = 6$ mm und der optimalen Bahngeschwindigkeit $v = 125$ mm/s folgt gemäß Gleichung (6.3) eine maximale Relativsteigung von $m_{\max} = 0,267$ und ein größter Relativwinkel zwischen Stützbahn und Werkstückkontur von $\delta_{\max} = 15^\circ$. Bei Tauchformen gestattet dies eine annähernde Halbierung der Zahl der Bahnstützpunkte.

An Stellen mit besonders großer Krümmung bzw. mit geringerer zulässiger Regelabweichung als normal (zum Beispiel an Fingerspitzen von Tauchformen) muß unter

Umständen die Bahngeschwindigkeit als einzige direkt beeinflussbare Einflußgröße auf die Eigenschaften des Regelsystems reduziert werden. Es wäre auch denkbar, über einen parallelen Port vom Roboter aus bei Bedarf eine softwaremäßige Anpassung der Regelverstärkung zu veranlassen. Damit wird allerdings eine zusätzliche bei der Erstellung des Roboterprogramms zu berücksichtigende technologische Größe eingeführt, die den Programmieraufwand vergrößert und eine mögliche Quelle kritischer Fehler darstellt.

Bei Portlinern betragen die korrespondierenden Werte $v = 60 \text{ mm/s}$, $f_k = 4 \text{ mm}$ und damit $m_{\max} = 0,37$ bzw. $\delta_{\max} = 20^\circ$. Auch hier genügen die dynamischen Eigenschaften des Regelsystems also den Anforderungen.

7 Rechnerunterstützung in der Schlickergußproduktion

7.1 Forderungen an ein CAD/CAM-Konzept

Eines der auffälligsten Merkmale der Schlickergußproduktion ist, daß die in anderen Branchen übliche Produktkonstruktion häufig fehlt. Diese wird in solchen Fällen vom handwerklich organisierten Modellbau übernommen. Der Modelleur stellt anhand von Parameterlisten, Mustern oder skizzenhaften Verkaufszeichnungen ein *Urmodell* des Produkts her, bei dessen Gestaltung er Schwindung, Verzug und andere technologische Randbedingungen mit berücksichtigt. Formtreue, Maßhaltigkeit, Oberflächenqualität, Gieß- und Aushebbarkeit hängen dabei in entscheidender Weise von seiner sorgfältigen Arbeit und seiner meist intuitiv eingebrachten Erfahrung ab. Der gesamte Informationsgehalt, das gesamte durch den Modelleur eingebrachte Wissen ist in Form eines physischen Modells hinterlegt [142].

Aus der allgemeinen Zielsetzung, Qualität und Wirtschaftlichkeit in der Schlickergußproduktion zu steigern und die Durchlaufzeiten zu verkürzen, ergeben sich für die technische Auftragsabwicklung konkret folgende Optimierungsaufgaben:

- * Verkürzung der Entwicklungszeit zur Erstellung von Gießmodellen
- * Sicherung von werkstoff- und fertigungstechnologischem Firmenwissen
- * Wegfall von Arbeitsschritten im Modellbau
- * Schaffung eines durchgängigen, konsistenten Informationssystems für die Arbeitsvorbereitung und zur Sicherung der Produktqualität
- * Rationalisierung von Verrichtungen in der Produktion

Der Einsatz von Rechnern kann hierzu auf mehreren Feldern einen wichtigen Beitrag leisten (Bild 86). Die Verlagerung des Gestaltungsprozesses vom handwerklichen Modellbau zu einem CAD-System ist hierbei der erste Schritt zur Steigerung der Produktivität im Modellbau und zur Sicherung des Modellier-Fachwissens [92, 99, 142]. Das dabei definierte rechnerinterne Modell des fertigen Keramiktells muß anschließend mit den bei Trocknung und Brand auftretenden Schwindungen und Verzügen

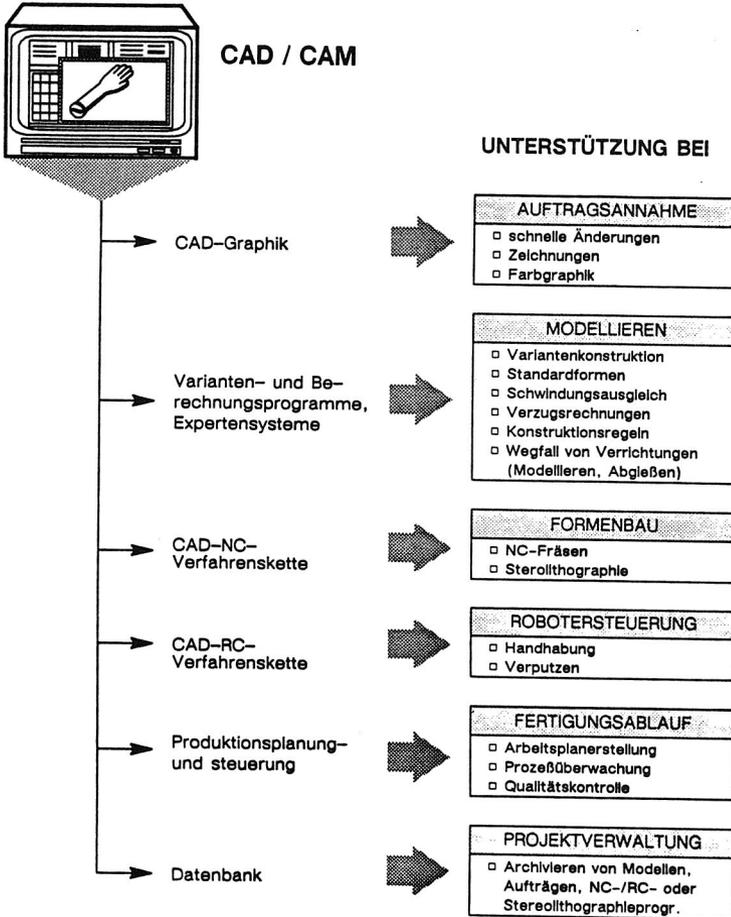


Bild 86: Rechneinsatz in der Schlickerguß-Produktion

beaufschlagt werden, damit im Rechner auch die fertigungstechnologischen Zwischenzustände des Produktes verfügbar sind (Bild 87). Die geometrischen Maße der Gießformen können dann für die Steuerung von Maschinen im Formenbau dienen,

die Abmessungen nach der Trockenschwindung zur Generierung von Programmen für die Roboter in der Putzerei.

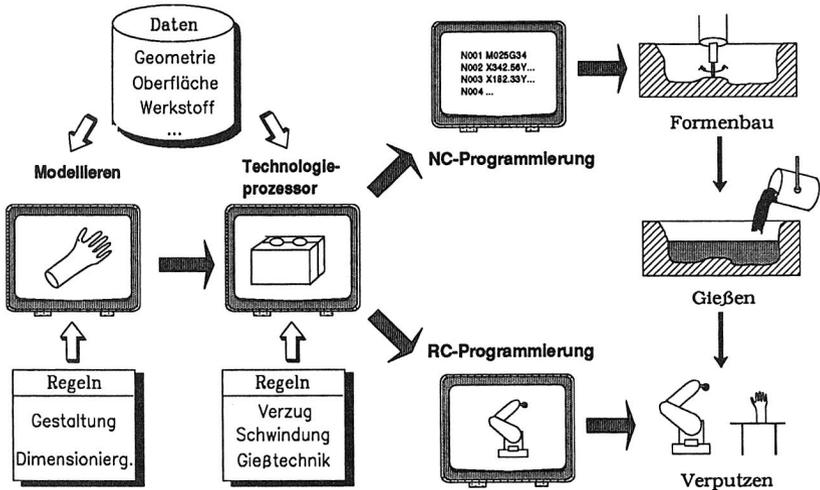


Bild 87: Rechnerintegrierte Verfahrensketten in der Schlickergußproduktion

7.2 Konstruktion von Keramik-Freiformteilen mit einem 3D-CAD-System

7.2.1 Grundkonzept

Entscheidendes Merkmal von Hohlgußwerkstücken ist ihre analytisch nicht ohne weiteres beschreibbare dreidimensionale Gestalt. Daher ist ein CAD-System mit Konsistenz zwischen Freiformflächen für die Produktmodellierung und die NC-Programmierung sowie 3D-Solids (Volumenmodellen) für die volumenabhängigen Schwindungsberechnungen erforderlich. Wegen der komplizierten Konturen erfordert die Gestaltung neuer Teile einen erheblichen Zeitaufwand und große Erfahrung in der Bedienung. Bei modernen CAD-Systemen stehen jedoch Programmier-

schnittstellen zur Verfügung, mit denen einfacher handhabbare Module zur Variantenkonstruktion für Werkstückfamilien bereitgestellt werden können. Mit ihrer Hilfe ist es auch Mitarbeitern mit geringen produktspezifischen Verfahrenkenntnissen möglich, aus parametrisierten Grundtypen neue Typen zu erstellen. Der Kunde kann durch Mitwirkung bei der interaktiven Arbeit am Bildschirm oder durch gegenseitige Übermittlung von Zeichnungen bzw. CAD-Dateien in den Gestaltungsprozeß einbezogen werden [92]. Auf diese Weise sind aufwendige Änderungszyklen bei der Bemusterung zu vermeiden.

Bei der Modellierung müssen neben werkstoff- und fertigungstechnischen Restriktionen auch die Gestaltungsregeln berücksichtigt werden, die sich aus den Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit des Endprodukts ergeben. Hierzu gehört zum Beispiel bei Portlinern das Querschnittsprofil im Bereich der Ventilbohrung, bei Tauchformen insbesondere die Form der Übergangflächen zwischen verschiedenen Elementen. Im Falle der Verwendung von Variantenmodulen können diese Regeln bereits bei der Entwicklung der Programme berücksichtigt werden. Sind zur Produktentwicklung größere Variationsmöglichkeiten erforderlich, dann wird wegen der komplexen Gestaltungsrestriktionen ein Einsatz wissensbasierter Systeme erforderlich [143, 144, 145, 146].

7.2.2 Variantenmodul zur 3D-Modellierung von Tauchformen

Die Realisierbarkeit eines parametergesteuerten Variantenprogramms für Schlicker- gußteile wurde exemplarisch für die Gestaltung von Ambitextrous-Tauchformen untersucht¹. Die Entwicklungsumgebung bestand aus 32-Bit-Arbeitsplatzrechnern, auf denen das Graphikpaket UNIGRAPHICS II von MDIS installiert war. Dieses verfügt über den Modellierer PARASOLID, der 3D-Volumen- und Freiformflächen-Modelle unterstützt. Zur Programmierung von graphisch-interaktiven Anwendungen stellt das System eine Schnittstelle in Form der Sprache GRIP zur Verfügung. Dies ist ein um

¹ Für die Zusammenarbeit bei der Entwicklung dieses Programms danke ich Herrn Dr.-Ing. G. Kleineidam, seinerzeit Oberingenieur der Arbeitsgruppe für rechnergestützte Konstruktion und Planung am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg, herzlich.

Befehle für graphische Manipulationen und zur Dateiverwaltung erweiterter FORTRAN-Dialekt.

Die vom Kunden vorgegebenen oder aus Mustern entnommenen Maße sind in einem standardisierten Datenblatt dokumentiert (Bild 88). Ebenso werden dort der Grundtyp, die Oberflächengestaltung und eventuelle Sonderwünsche vermerkt. Diese Angaben reichen jedoch zur vollständigen geometrischen Bestimmung nicht aus. Die fehlenden Informationen, insbesondere über Fingerneigungen und Querschnittsformen, wurden bisher vom Modelleur als Erfahrungswissen eingebracht. Ihre Berücksichtigung im Variantenprogramm erfolgt teils implizit durch die implementierten Modellierungsalgorithmen, teils durch Zugriff auf Tabellen mit Richtgrößen, mitunter auch explizit durch Eingabe zusätzlicher Daten.

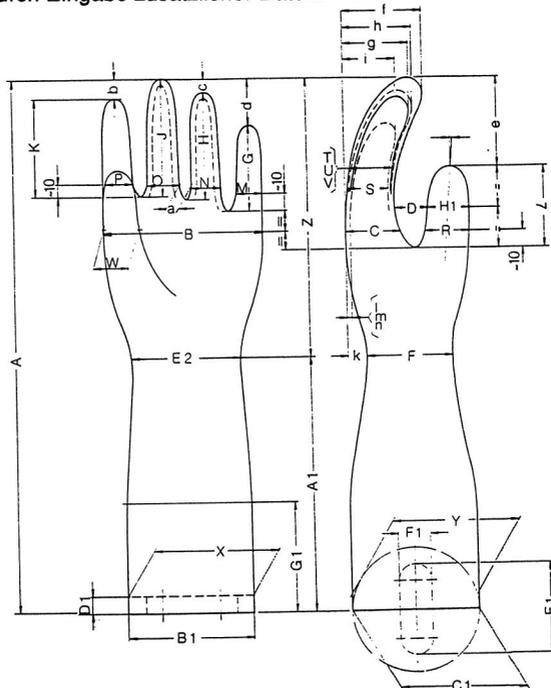


Bild 88: Vom Kunden zu definierende Maße einer Tauchform

Wird lediglich eine neue Größe einer bereits modellierten Form gewünscht, so kann der neue Typ durch Anwendung von in das Programm integrierten Proportionsregeln direkt aus dem vorhandenen Modell abgeleitet werden. Der Entwurf einer neuen Tauchform beginnt mit dem Aufruf der gewünschten Basistype und dem Einlesen der Bestelldaten aus einer Datei. Nach Eingabe der ergänzenden Parameter durch den Produktentwickler nimmt das Programm den Aufbau der Werkstückgestalt vor. An Kontrollhalten ist es dem Konstrukteur möglich, Teilschritte mit veränderten Parametern zu wiederholen, um eine optimale Gestalt zu finden. Er kann hierzu das Bild der Tauchform drehen oder Ausschnittsvergrößerungen anfordern. Mit dieser Arbeitsweise können die Vorteile des Batch-Betriebs und der interaktiven Abfrage kombiniert werden (Bild 89).

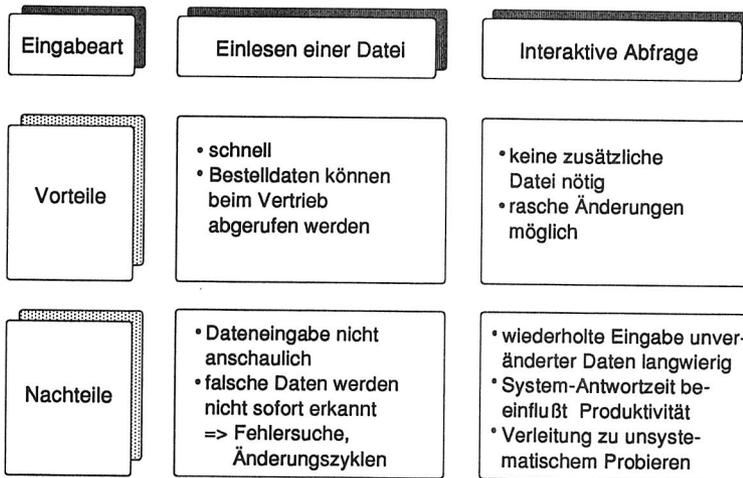


Bild 89: Eingabearten für alphanumerische Daten

Bisher ist nur die rechnergestützte Modellierung von Ambientextrous-Tauchformen möglich. Demgegenüber ist die Gestalt anatomischer Tauchformen wesentlich schwieriger zu definieren. Die derzeit zur Verfügung stehenden Beschreibungsmöglichkeiten für Freiformflächen führen hier zu sehr aufwendigen Lösungen. Der Anteil interaktiver Handlungen, insbesondere solcher, bei denen die Eingabe von technologischem Fachwissen erforderlich ist, müßte durch Einbeziehung wissensbasierter

Komponenten in das System verringert werden. Als weitere Voraussetzungen für eine effektive Gestaltung von Modellen mit räumlicher Fingerstellung ist eine verbesserte Visualisierung des Arbeitsergebnisses durch Ausblendung verdeckter Linien (Eliminierung von Mehrdeutigkeiten bei der Oberflächendarstellung) und die Implementierung von Schattierungsalgorithmen anzusehen.

7.2.3 Modellierung der Werkstück-Geometrie

Freiformflächen entstehen aus einem Netz von Raumkurven in parametrischer Darstellung [37]. Die Richtungs- und Geometrieparameter bilden auf der gewölbten Fläche ein lokales Koordinatensystem, durch das jeder Punkt der Fläche beschrieben ist (Bild 90). Ausführliche Darstellungen der verschiedenen Beschreibungsmethoden werden beispielsweise in [147, 148, 149] gegeben. Nach umfangreichen Erprobungen haben sich für die Modellierung von Tauchformen besonders das Maschenkurven- und das Profilkurvenverfahren als geeignet erwiesen. Mit den anderen Methoden kann die Gestalt der Werkstücke nicht genau genug nachgebildet werden bzw. sie sind bei der Definition zu aufwendig.

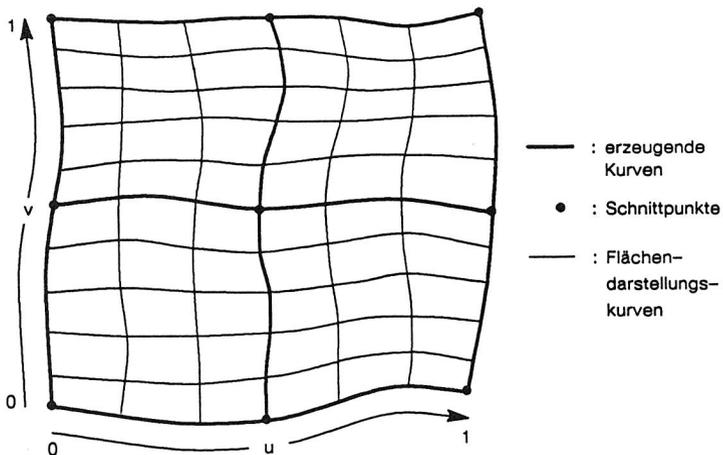


Bild 90: Erzeugung einer Freiformfläche nach dem Maschenkurvenverfahren.

Für die Generierung einer Oberfläche nach dem *Maschenkurvenverfahren* (*Curve Mesh*) sind mindestens vier sich schneidende Kurven erforderlich, die in ihrer Zusammenstellung einem Rechteck ähneln sollten. Die Felder zwischen den Kurven werden durch Approximation ausgefüllt (Bild 90). Jeweils zwei logisch parallele Kurven heißen *Primary Curves* und die dazu logisch rechtwinkligen *Cross Curves*. Zusätzliche Kurven erhöhen den Definitionsgrad. Sie müssen jedoch ebenfalls parallel zu den logischen Koordinatenachsen verlaufen.

Bei der *Profilkurvenmethode* (*B-Surface, Curve Method*) erfolgt die Erzeugung einer Freiformfläche durch Interpolation zwischen definierten Profilkurven. Der Grad der Fläche ist in der Richtung quer zu den erzeugenden Kurven variierbar. Im Unterschied zum Maschenkurvenverfahren ist die Lage der beschreibenden Kurven zueinander beliebig (Bild 91).

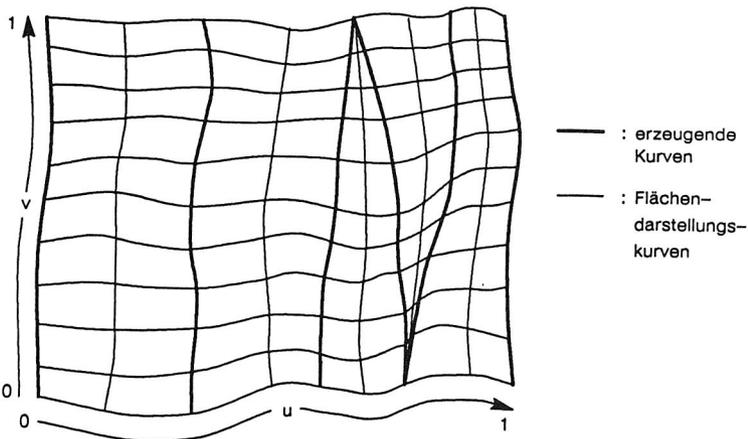


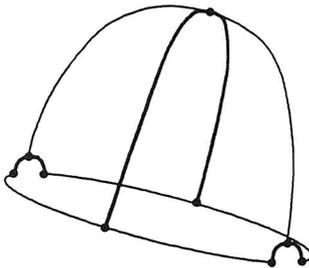
Bild 91: Beschreibung einer Freiformfläche nach der Profilkurvenmethode

Ein sehr häufiges Formelement bei Tauchformen sind kuppenförmige Flächen. Bei ihrer Beschreibung nach dem Maschenkurvenverfahren ist besonders vorteilhaft, daß nur je drei Primary- und Cross-Kurven benötigt werden. Diese Kurven sind leicht erzeugbar, da sie Querschnitte durch den zu beschreibenden Körper darstellen. Damit die Kurven möglichst rechtwinklig aufeinander stoßen, müssen für Kuppen

zwei Hilfsbögen eingeführt werden. Diese sind in Wirklichkeit kleiner als in Bild 92 dargestellt, so daß sie keinen Einfluß auf die Form der Kuppenfläche haben. Die geringe Zahl definierter Kurven hat jedoch zur Folge, daß der Verlauf der Fläche relativ willkürlich ist. Die Form der Kuppe wird weitgehend dem Flächengenerierungsalgorithmus überlassen. Die Flächengenerierung nach der Profilkurvenmethode gestattet demgegenüber eine erheblich genauere Bestimmung der Form der Fläche. Hierfür muß jedoch eine sehr große Anzahl von Profilkurven definiert werden, deren Bestimmung im allgemeinen Fall nicht einfach ist.

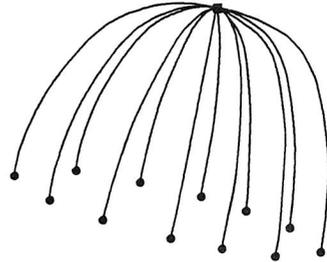
FLÄCHENERZEUGUNG DURCH

CURVE MESH - Verfahren



- : Primary Curves
- : Cross Curves
- : Kurvenschnittpunkte

CURVES - Verfahren



- : Profilkurven
- : Startpunkt der Kurven
- : Endpunkt der Kurven

Bild 92: Alternativen bei der Modellierung von Kuppenflächen

Bei den für Tauchformen ebenfalls typischen Sattelflächen kommt es vor allem auf eine genaue Lage des Sattelpunkts sowie auf einen stetigen Übergang zwischen den erzeugenden Kurven an. Bild 93 zeigt, daß diese Bedingungen mit dem Maschenkurvenverfahren auf einfache Weise erfüllt werden können. Die Profilkurvenmethode führt demgegenüber zu sehr viel aufwendigeren Lösungen.

Zum Ausfüllen der Bereiche zwischen definierten Stützpunkten werden häufig Interpolationsverfahren angewendet. Sie legen die zu erzeugende Kurve bzw. Fläche

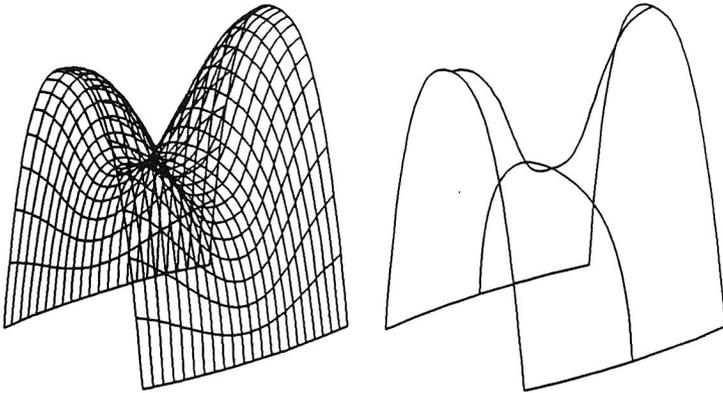


Bild 93: Darstellung einer Sattelfläche und ihre erzeugenden Kurven

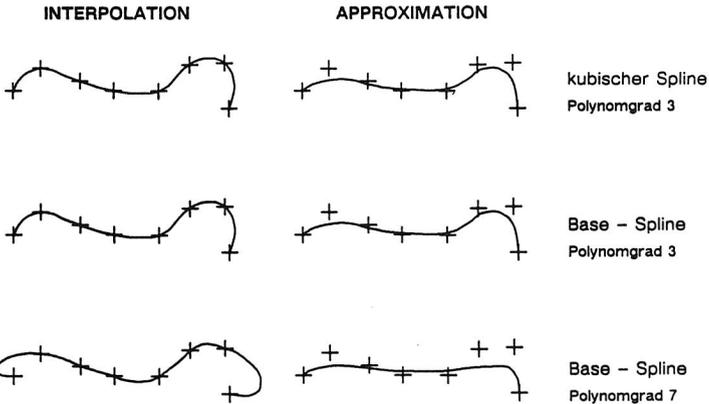


Bild 94: Vergleich von Kurvengenerierungsverfahren

genau durch diese Punkte, jedoch muß mit größerem Überschwingen gerechnet werden als bei approximierenden Algorithmen (Bild 94), welche auf eine Kongruenz zwischen Stützpunkten und Kurve verzichten. Bei letzteren läßt sich die resultierende Kontur wesentlich besser vorhersagen. Sie waren daher bei der Modellierung von

Schlickergußteilen sowohl für die Definition der erzeugenden Kurven als auch für den Flächengenerierungsalgorithmus den Interpolationsverfahren überlegen.

Eine Tauchform ist aus zwei Hauptelementen aufgebaut: Die eine Komponente ist der Schaft, bestehend aus Sockel, Schaftübergang, Schaft und Handgelenkanschuß. Der andere Teil wird von der Hand gebildet, welche sich aus Handgelenk, Handfläche, Fingern und den Sattelflächen zwischen den Fingern zusammensetzt. Diese beiden Teile wurden getrennt modelliert mit dem Handgelenk-Querschnitt als Schnittstelle. Ihre Kombination ergibt dann die vollständige Tauchform (Bild 95).

Der Schaft kann wegen des Querschnittsübergangs vom Unterteil mit Kreis- oder Sternquerschnitt zum flachelliptischen Handgelenkanschuß trotz seiner verhältnismäßig einfachen Form nicht mit Rotationsflächen oder ähnlichen Methoden modelliert werden, sondern es muß nach der Profilkurvenmethode vorgegangen werden. Als erzeugende Kurven dienen Querschnitte durch den Schaft in verschiedenen Höhen. Je nach der gewünschten Grundform des Schaftes werden verschiedene Ausgangsmodelle aufgerufen und parametergesteuert in der Größe variiert.

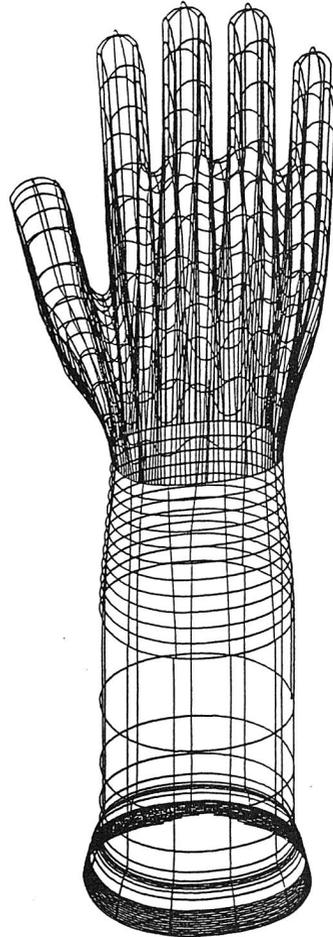


Bild 95: Konstruktion einer Tauchform als Kombination einer Hand mit einem Schaft

Eine Betrachtung der Finger- und Schaftquerschnitte von Tauchformen zeigt, daß diese zwar Ellipsen ähneln, jedoch keine exakten Ellipsen sind. Es wurde daher ein Algorithmus entwickelt, der die gewünschten Querschnittsformen durch Verzerrung idealer Ellipsen realisiert. Für die Festlegung des Profils genügt dabei zusätzlich zu den gewünschten Abmessungen der Hauptachsen des Querschnitts die Angabe eines Verzerrungsexponenten (Bild 96).

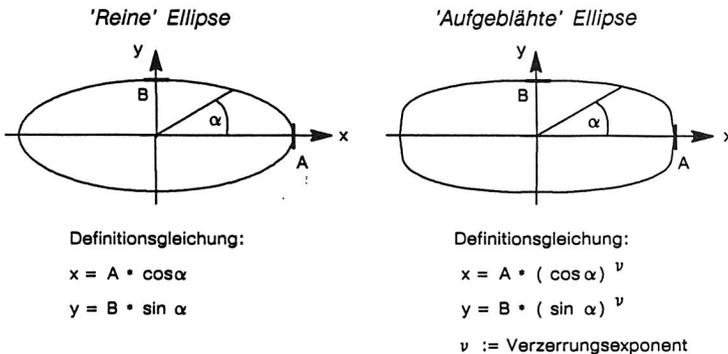


Bild 96: Konstruktion einer aufgeblähten Ellipse

Wegen der Sattelflächen zwischen den Fingerwurzeln wird die Hand mit dem Maschenkurvenverfahren definiert. Die Methode mit den Kreuzquerschnitten hat den Vorteil, daß man mit leicht zu ermittelnden Querschnittskurven (jeweils in Breiten- und Weitenrichtung) eine Handfläche aufbauen kann (Bild 97). Die Angabe der Parameterwerte der Sattelkreuzungspunkte geschieht nicht relativ, sondern explizit, weil deren Position ein wichtiges Funktionsmaß darstellt. Sättel, Hand- und Fingerflächen entstehen rechnergestützt. Dies erschwert allerdings Steuerung und Kontrolle z.B. der Querschnittsform der Finger.

Aus diesem Grunde wird die Modellierung der Finger separat nach der Profilkurvenmethode vorgenommen. Die Profilkurven werden durch Approximation der Stützpunkte in drei Fingerquerschnitten erzeugt. Des weiteren muß der Konstrukteur, nachdem das Programm die Stützpunkte und -kurven gesetzt hat, zur Optimierung des Flächenverlaufs noch ergänzende Stützkurven generieren.

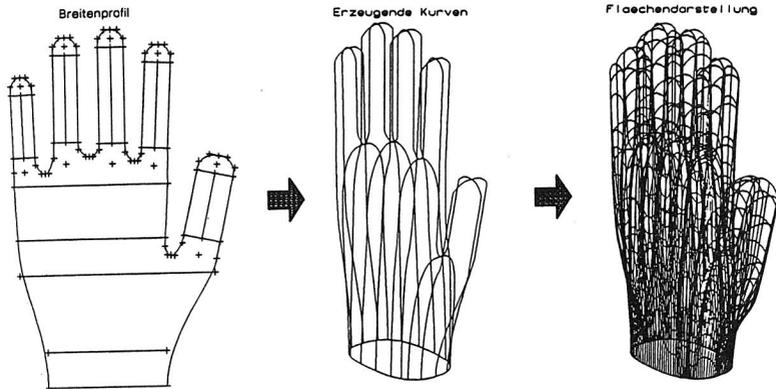


Bild 97: Ableitung der Handgestalt aus dem Breiten- und Querprofil

7.3 Einbindung von Formenbau und Putzerei in eine CAD/CAM-Verfahrenskette

7.3.1 Grundkonzept

Eine wesentliche Steigerung der Effizienz im Auftragsdurchlauf kann durch Weiterverwendung der am CAD-Arbeitsplatz definierten Produktgeometrie erreicht werden [142] (Bild 98). Die Überführung des Produktmodells in die Geometrien der Gießform und des weißtrockenen Formlings geschieht wegen der komplexen Schwindungs- und Verzugsvorgänge sinnvollerweise in einem separaten Programm, das sowohl geometrische als auch technologische Informationen zu verarbeiten hat. Zur Schaffung einer konsistenten CAD/CAM-Umgebung muß daher das geometrische Modell des Werkstücks um Instanzen zur Speicherung der dem Produkt zugeordneten technologischen Daten ergänzt werden. Solche Daten sind beispielsweise der Werkstoff mit seinen (richtungsabhängigen) Schwindungsfaktoren, die Oberflächengestaltung (Riffelung, Glasur), Bahngeschwindigkeiten und Werkzeugeinstellungen beim Verputzen oder das zugehörige Brenntemperatur-Profil. Ein solches integriertes

"Produktmodell" [150, 151] ist als Voraussetzung für eine durchgehende, technologieübergreifende Verfahrenskette anzusehen. Die Möglichkeiten heutiger CAD-Systeme hinsichtlich der konsistenten Integration technologischer Detailinformationen sind zwar noch beschränkt. Es wurden jedoch bereits verschiedene Lösungswege hierzu aufgezeigt [152, 153].

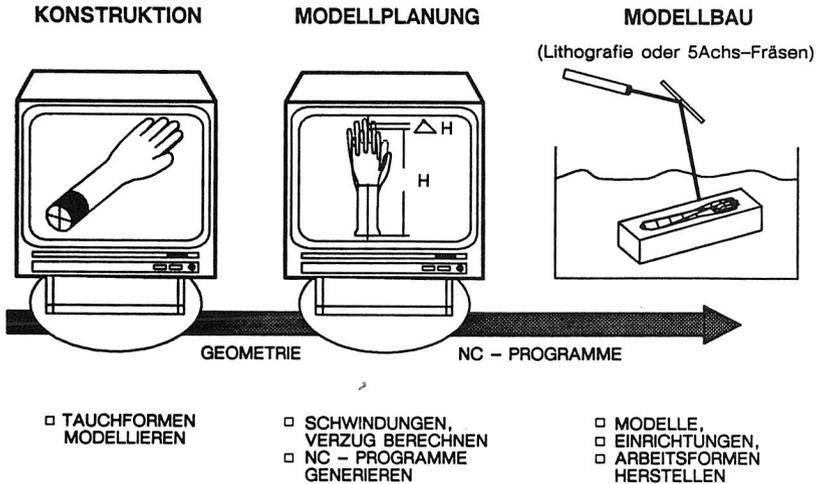


Bild 98: CAD/CAM-Verfahrenskette zum Modellbau

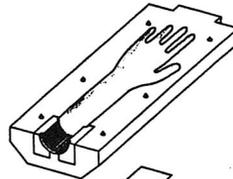
Zur Voraussage der Schwindung von Werkstücken mit einfacher Geometrie (zum Beispiel Portliner) werden bereits mit hinreichender Genauigkeit lineare Schwindungs- und Anisotropiefaktoren verwendet. Im beschriebenen Programm zum Entwurf von Ambitextrous-Tauchformen erfolgt die Generierung des Gieß- und des Grünmaßmodells durch Variantenbildung aus dem Fertigteil anhand von Technologie-Parametern, die für jedes Maß individuell festgelegt sind. Mit seiner Erfahrung ergänzt und korrigiert der Konstrukteur Einflußgrößen wie Fingerneigung, Handneigung und Handflächenversatz zum Ausgleich des Brandverzugs. Das Ergebnis dieser Operationen kann dann in ein noch zu implementierendes Variantenmodul für Gießformen übertragen werden. Der Vorteil des Rechneinsatzes ist, daß im Gegensatz zur manuellen Arbeitsweise alle Parameter dokumentiert sind und eine leichtere Kontrolle des Entwicklungsgangs möglich ist.

Wegen der vielfältigen Einflußgrößen ist die Aufstellung eines allgemein anwendbaren mathematischen Schwindungsmodells bisher nicht gelungen. Als Ansatz für einen breiter anwendbaren rechnergestützten Technologieprozessor mit einer Minimierung interaktiver Vorgänge ist daher eine Kombination aus mehreren Ansätzen erforderlich:

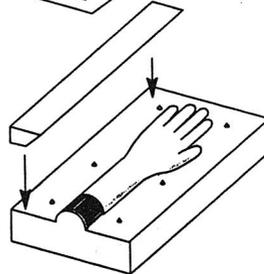
- * numerische Schwindungsrechnung gemäß den in Kapitel 3.1 beschriebenen Grundlagen; eventuell kombiniert mit Finite-Element-Methoden
- * Rückgriff auf empirisch ermittelte, gestaltspezifische Korrekturtabellen
- * wissensbasierte Komponenten (Expertensysteme), mit denen nicht quantifizier- und algorithmierbare Informationen - also die Erfahrung des Modelleurs - in Regeln gefaßt und so zugänglich gemacht werden können.



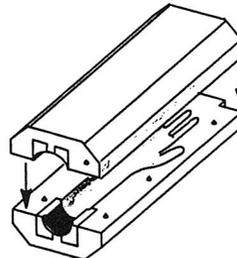
Urmodell



Hauptform



Einrichtung



Arbeitsform

Weil die Informationsbasis in den Tabellen bzw. Wissensregeln von der Implementierung des Technologieprozessors unabhängig vorliegen, werden Verwaltung und Pflege dieser Daten wesentlich erleichtert [152]. Die Realisierung eines derartig komplexen Systems hätte jedoch den Rahmen der vorliegenden Arbeit bei weitem gesprengt.

Bild 99: Arbeitsgangfolge Modell- und Formenbau (vereinfacht)

Wegen der auf wenige Dutzend Abgüsse beschränkten Lebensdauer der Gießformen werden hiervon bei größeren Aufträgen erhebliche Stückzahlen benötigt. Daher wird zunächst von dem Urmodell ein aus zwei Hälften bestehendes Negativmodell (die *Hauptform*) abgegossen (Bild 99). Hierbei erfolgt auch bereits die Berücksichtigung gießtechnischer Belange, insbesondere die Festlegung der Teilfuge und der für das Sicherstellen der Aushebbarkeit erforderlichen Maßnahmen (zum Beispiel Keilschieber an Hinterschneidungen). Von den beiden Hälften der Hauptform angefertigte Positiv-Abgüsse, die sogenannten *Einrichtungen*, dienen dann zum Gießen der eigentlichen Arbeitsformen für die Produktion.

Um Kosten und Durchlaufzeit zu minimieren muß man bestrebt sein, möglichst viele der bisherigen Arbeitsschritte im Formenbau zu vermeiden und mit der CAD/CAM-Kette so nahe wie möglich an der eigentlichen Tauchform-Produktion anzusetzen. Je nach Komplexität des Modells bietet es sich an, entweder die Hauptform oder direkt die Einrichtungen herzustellen. Hierzu ist ein CAD-System erforderlich, das über BOOLEsche Operationen verfügt, um aus dem Modellpositiv durch Subtraktion eine Negativform zu generieren (Bild 100).

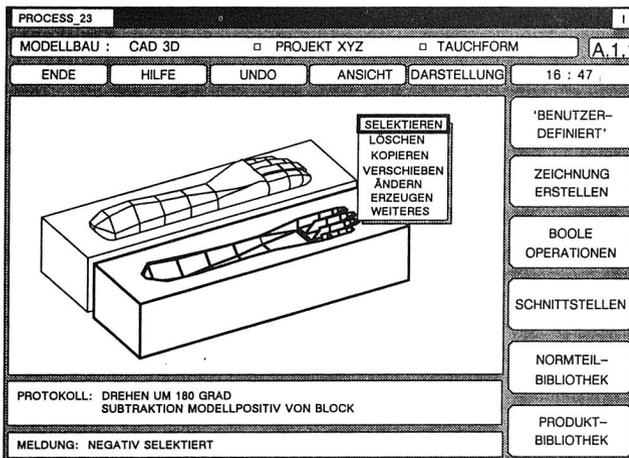


Bild 100: Generieren einer Hauptform aus Positiv-Halbmodell

7.3.2 Programmierung von Verputzrobotern

Der Einsatz von Robotern zum Entgraten und Verputzen von Keramikerzeugnissen stellt hohe Anforderungen an die eingesetzten Programmierverfahren. Neben komplexen Geometrieinformationen sind in den RC-Programmen auch technologische Parameter und koordinierende Steuersignale zu verarbeiten (Bild 101). Durch den häufigen Wechsel von Varianten werden laufend neue Programme benötigt.

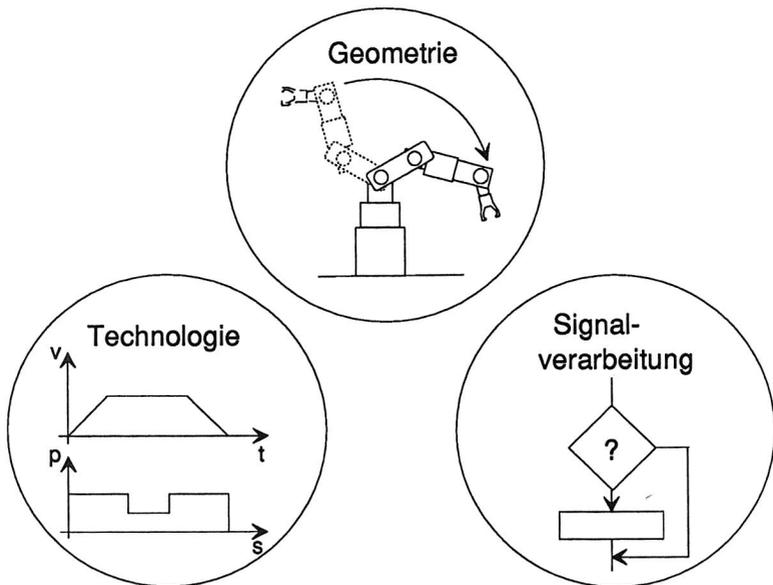


Bild 101: Informationen in Roboterprogrammen

Die heute bekannten Verfahren zur Programmierung von Handhabungsgeräten lassen sich grob in vier Gruppen einteilen. Üblicherweise beruhen sie auf einer expliziten Beschreibung der Handhabungsaufgabe, entweder mit direkter Aufnahme der Geometrieinformationen durch das Handhabungsgerät (Lernverfahren), oder durch textuelle bzw. graphisch-interaktive Eingabe des Programms. Implizite Programmier-

verfahren, bei denen das Roboterprogramm im Idealfall allein aufgrund der Aufgabenbeschreibung unter Zugriff auf eine rechnerinterne Modellbeschreibung automatisch erstellt wird [14, 154, 155], sind wegen der erforderlichen umfangreichen Datenvorverarbeitung noch nicht einsatzfähig.

Lernverfahren sind anschaulich und beziehen die im System auftretenden Toleranzen implizit mit ein. Wegen der komplizierten Bahnen mit vielen Stützpunkten ist beim Verputzen aber auch die heute übliche hybride textuelle Programmierung mit Einlernen der Stützpunkte wenig effektiv. Durch zusätzliche Maßnahmen kann jedoch eine Verkürzung der Programmierzeit erreicht werden. Hierzu gehört zunächst die Erstellung des Programmgerüsts an einem separaten Programmierplatz, an dem auch die syntaktische und logische Prüfung des Programms erfolgen kann. Zweiter Schritt ist die Einführung von sensortechnischen Maßnahmen zur Bahnadaption, mit denen die Zahl der zu programmierenden Stützpunkte deutlich kleiner wird (Kapitel 6.4.3). Drittens schließlich kann durch verbesserte Techniken zur Handsteuerung von Handhabungsgeräten der Wirkungsgrad in der Teach-In-Phase gesteigert werden. Dazu gehören insbesondere am Roboter montierte oder separat an günstiger Stelle aufgestellte Proportional-Steuergriffe mit mehreren Freiheitsgraden [156, 157].

Als Sonderform der Lernverfahren sind Methoden anzusehen, Sensorinformationen über Gestalt und Lage des Werkstücks zur Vereinfachung und Automatisierung der Bewegungsprogrammerstellung heranzuziehen. Die meisten dieser Verfahren verwenden vom Handhabungsgerät geführte Meßaufnehmer, deren Signale nach entsprechender Auswertung als Bahnvorgabe aufgezeichnet werden. Sie benötigen zur Programmierung zwar den Roboter und in der Regel auch eine grob vorgegebene Stützbahn, verkürzen aber die Programmier- und Rüstzeit zum Teil beträchtlich [58, 60, 126, 128, 158]. Wegen des begrenzten Informationsgehalts der Sensorsignale kann die sensorgestützte Programmierung andere Konzepte meist nur ergänzen, jedoch nicht vollständig ersetzen.

7.3.3 Offline-Programmierung

Da die Programmierung durch Lernverfahren lange Rüstzeiten erfordert, drängt sich die Forderung nach einer Offline-Programmierung auf, bei der die Programmerstellung vom Ausführungsgerät weg in die Arbeitsvorbereitung verlegt ist. Dies trägt zur Verbesserung des Nutzungsgrades des Fertigungssystems bei, weil während der Programmierzeiten weiterproduziert werden kann. Außerdem werden die Voraussetzungen zur Verwendung von Werkstückinformationen aus bereits vorliegenden Datenbeständen verbessert, denn die von den Verputzwerkzeugen anzufahrenden Positionen können aus dem vom Technologieprozessor ermittelten 3D-Grünmaßmodell extrahiert werden (Bild 102).

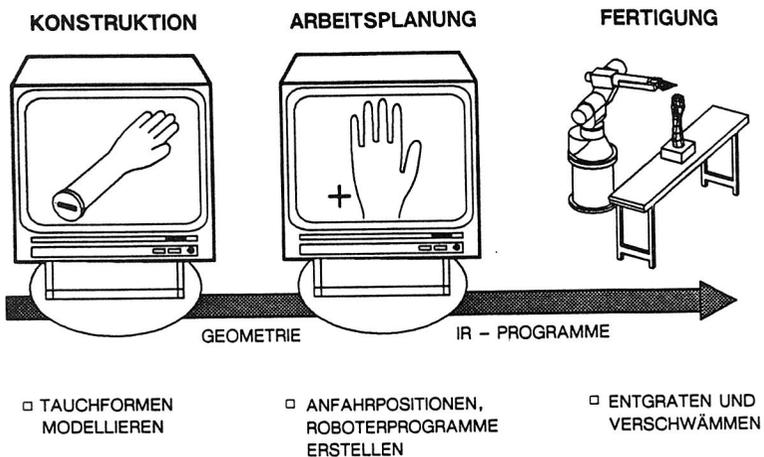


Bild 102: Verfahrenskette zum Entgraten und Verschwämmen

Bei reiner Variantenprogrammierung ist es möglich, Geometrieinformationen des zu entgratenden Keramikteils als Variablenliste direkt in ein einmal erstelltes und getestetes, parametrisiertes Basisprogramm der Roboterzelle zu übertragen. Abweichungen der Modellwelt, in der programmiert wird, von der realen Welt, in der das Pro-

gramm ausgeführt werden soll, können durch die Kombination aus nachgiebigen Werkzeugen und Sensorunterstützung so weit ausgeglichen werden, daß ein manuelles Nachprogrammieren am Roboter nicht nötig ist.

Die Koordinaten der Fuß- und Scheitelpunkte der Werkzeugbahn können nach Multiplikation mit dem für die jeweilige Richtung zutreffenden Schwindungsfaktor direkt aus den Bestelldaten gemäß Bild 88 in die korrespondierenden Bahnpunkte des Roboterprogramms übertragen werden. Die dazwischen liegenden Stützpunkte ergeben sich dann über Ähnlichkeitstransformationen aus vorgegebenen Referenzkoordinaten.

Diese Methode hat bei variantenreicher Fertigung ihre Grenzen in dem hohen Programmier- und Testaufwand für die Basisprogramme, der mit zunehmender Komplexität der Werkstücke rasch anwächst. Während sie für Ambitextrous-Tauchformen gut geeignet erscheint, dürfte sie für anatomische Tauchformen oder für räumlich gekrümmte sowie mehrkanalige Portliner weniger in Frage kommen. Interaktive Programmierkonzepte mit graphischer Simulation [61, 159, 160, 161] ermöglichen bereits in der Offline-Phase eine weitgehende Optimierung des Programms, was die Online-Testphase entscheidend verkürzt [99]. Die Bewegungen des Handhabungsgerätes können am Bildschirm genau verfolgt, der logische Ablauf getestet, Kollisions- und Erreichbarkeitsstudien durchgeführt, die Werkzeugorientierung festgelegt und die Vorgabezeiten ermittelt werden. Zusätzlich bietet es sich an, mit einem solchen Werkzeug auch die Layoutplanung der Zelle vorzunehmen [162].

Bei Ambitextrous-Tauchformen entspricht die durch das Konstruktionsmodul definierte Umrißkontur der Hand (Bild 97) dem Gratverlauf und kann nach Durchführung der Schwindungsrechnung unmittelbar in eine Folge von Bahnstützpunkten für den Entgratroboter überführt werden. Bei anderen Werkstücken ergibt sich der Gratverlauf erst aus der im Technologiemodul "Gießen" festgelegten Teilfuge der Gießform.

Zur Definition der Werkzeugbahn bei Systemen ohne Sensorführung ist die Gratkontur mit einem statischen Toleranzband der Breite $2 \cdot f_k$ zu umgeben (f_k ist die in Kapitel 5.6 angegebene größte zulässige Abweichung der programmierten Bahn vom

Gratverlauf) [126]. Die Bahnstützpunkte sind nun so festzulegen, daß ihre gemäß der gewählten Interpolationsbedingung ermittelte Verbindungslinie das Toleranzband an keiner Stelle überschreitet (Bild 103). Zum Verschwämmen ist auf ähnliche Weise auch das Querprofil in Programmanweisungen zu übersetzen.

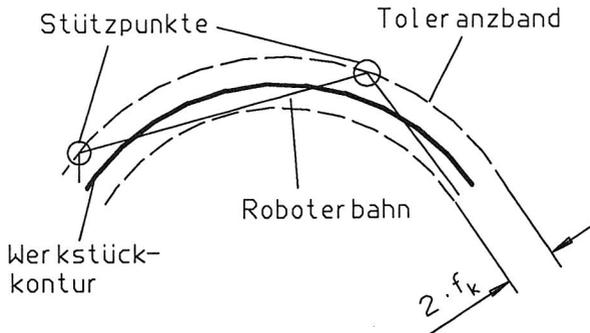


Bild 103: Festlegung von Bahnstützpunkten durch statische Toleranzbänder am Beispiel der Linearinterpolation

Bei sensorgeführten Systemen folgt die Stützpunktanordnung aus dem Reaktionsweg gemäß Gleichung (6.1). Verschiebt man eine parallel zur Startrichtung der Stützbahn orientierte Referenzstrecke der Länge s , entlang des Grates, so liefert die Hüllkurve dieser Strecke die Grenze des Bereiches, innerhalb dem keine rechtzeitige Reaktion auf das Sensorsignal erfolgt (Bild 104). Der Schnittpunkt dieser dynamischen Reaktionszone mit dem statischen Toleranzband entspricht dem spätesten Ort des nächsten Bahnstützpunktes.

Die Werkzeugorientierung ergibt sich aus der Oberflächennormale im jeweiligen Bahnpunkt, wobei zusätzlich die Einhaltung von Lagegrenzwerten zu überprüfen ist. Dreht der Normalenvektor über die Richtung der Werkstück-Längsachse hinweg, so hat eine Invertierung seiner Richtung zu erfolgen, damit das Werkzeug nicht über Kopf geschwenkt werden muß. Überschreitet der Neigungswinkel des Schwammwerkzeugs einen voreingestellten Betrag, dann muß es in der ursprünglichen Position verbleiben, damit nicht das Wasser aus dem Gehäuse läuft.

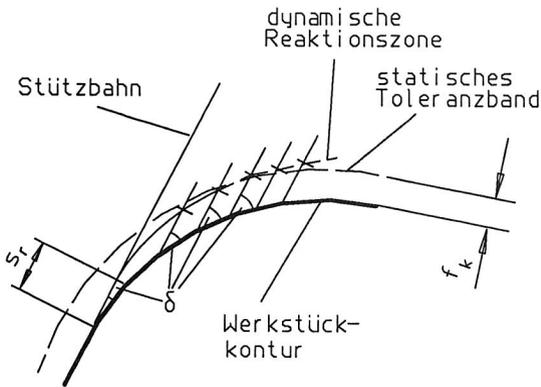


Bild 104: Festlegung von Bahnstützpunkten durch Überlagerung des statischen Toleranzbandes mit der dynamischen Reaktionszone

Mit dem an der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelten Planungs- und Programmiersystem CARo [159] wurde die Methode der Offline-Programmierung am Beispiel von Tauchformen erprobt (Bild 105). Zur Sicherstellung einer befriedigenden Systemperformance müssen zuvor die Freiformflächengeometrien in Drahtmodelle übertragen werden. Hierdurch können nicht unbedeutende Ungenauigkeiten der Anfahrpositionen entstehen. Weitere Positionsabweichungen folgen aufgrund unterschiedlicher Abmessungen von Modellzelle und realer Roboterzelle. Auch die Genauigkeit der Lagemessung des Handhabungsgerätes und dynamische Einflüsse beim Fahren mit höheren Geschwindigkeiten verursachen beträchtliche Bahnabweichungen bei der Ausführung des offline erstellten Roboterprogrammes [163]. Die Adaptionsfähigkeit der Werkzeuge allein reicht hierfür nicht mehr aus. Will man aufwendiges Nachteachen vermeiden, so kann daher auch hier auf eine Sensorunterstützung nicht verzichtet werden.

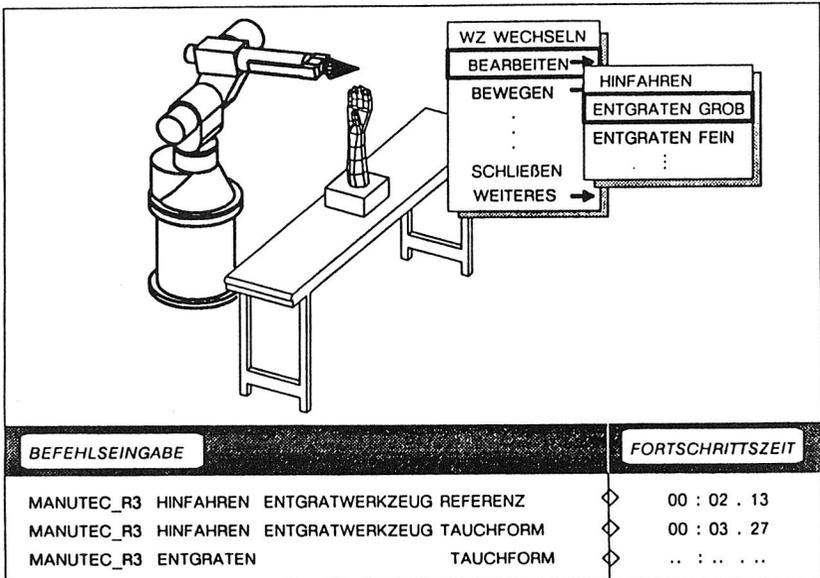


Bild 105: Entgratungssimulation mit CARo (aus [159])

7.3.4 Zusammenfassende Bewertung

In Bild 106 werden die verschiedenen Verfahren zum Programmieren von Industrierobotern unter dem Gesichtspunkt ihrer Eignung bei Entgratanwendungen bewertet. Beim derzeitigen Stand der Entwicklung ist das sensorgestützte Programmieren wegen der beschriebenen Probleme mit Sensoren zur Konturabtastung von Keramik-Werkstücken nicht realisierbar. Demgegenüber stellt die graphische Offline-Simulation einen bereits erprobten, erfolgversprechenden Weg dar, insbesondere wenn man die hohe Adaptionfähigkeit des Fertigungssystems bedenkt. Für diese Technik werden allerdings leistungsfähige Rechner und komplexe Software benötigt, außerdem ist ein gewisser Aufwand für die Modellierung der zu simulierenden Roboterzelle erforderlich. Bei Teilefamilien geringer Varianz kann daher die parametergesteuerte

Programmierung wirtschaftlicher sein. Teach-In-Verfahren und hybride textuelle Programmierung sind nur für große Serien oder als Notbehelf geeignet.

Verfahren \ Kriterien	Teach-In	Textuell-explizit	Mit CAD/CAM-Kopplung	Graphische Simulation	Implizit	Sensor-gestützt
Programmierzeit	○	○	●	●	●	●
Rüstzeit-anteil	○	●	●	●	●	●
Anforderungen an Programmierer	●	○	○	●	●	●
Aufwand an Programmierhilfsmitteln	●	●	●	○	○	●
Arbeits-sicherheit	○	●	●	●	●	●
erforderliche Datenschnittstellen	●	●	●	○	○	●

● günstig ● mittel ○ ungünstig

Bild 106: Bewertung der Verfahren zur Programmierung von Verputzrobotern

8 Anwendungsbeispiele

Zur Abgrenzung der Einsatzfelder von Handhabungsgeräten wird üblicherweise eine erste grobe Unterteilung nach der Art des zu handhabenden Gegenstands bzw. dem Ziel des Handhabungsvorgangs vorgenommen. Bei der *Werkstückhandhabung* steht als Aufgabe der Handhabungseinrichtung eine Orts- oder Lageveränderung des Werkstücks im Vordergrund. Bei der *Werkzeughandhabung* übernimmt das Handhabungsgerät selbst einen Produktionsvorgang durch Handhabung eines hierfür geeigneten Werkzeugs. Obwohl das Verputzen mit Industrierobotern technologisch der Gruppe "Werkzeughandhabung" zugeordnet wird, sind viele Applikationen mit fest angeordnetem Werkzeug realisiert. Für die Weichbearbeitung von Keramik bietet ein solches Konzept einige Vorteile. Vor allem können Entgraten und Verschwämmen vom selben Handhabungsgerät vorgenommen werden, ohne daß ein Werkzeugwechselsystem notwendig wird. Außerdem entfallen separate Handhabungseinrichtungen für das Bereitstellen und Entsorgen der Werkstücke, sofern die Teile handhabungsgerecht bereitgestellt werden und für ein automatisches Aufspannen geeignet sind.

Andererseits sprechen auch einige Argumente für ein Konzept mit Werkzeughandhabung: Es können ohne Umrüsten von Greifern Werkstücke beliebiger Form und Größe bei hoher Variantenflexibilität bearbeitet werden. Die Werkstücke erfahren keine zusätzliche Beanspruchung durch dynamische Kräfte oder durch Biegemomente aufgrund ihres Eigengewichts. Das Auf- und Abspannen der Werkstücke kann während der Hauptzeit des Handhabungsgeräts erfolgen. Die Programmierung ist einfacher, weil sich der TCP immer im Wirkpunkt des Werkzeugs befindet. Außerdem lassen sich zusätzlich notwendige manuelle Vorrichtungen leichter integrieren.

Andere Argumente, die in der Literatur zugunsten der einen oder anderen Alternative genannt werden [14, 54], greifen im vorliegenden Fall insbesondere wegen des Entfalls schnellaufender Spindeln nicht.

8.1 Verputzen von Tauchformen

In einem Bearbeitungssystem zum Verputzen von Tauchformen sind folgende Vorrichtungen vorzunehmen:

1. Zuführen von Rohteilen
2. Planbearbeiten des Sockels und Ausfräsen des Aufspannlochs
3. Entgraten
4. Verschwämmen
5. Qualitätskontrolle und Nacharbeit
6. Ablegen und Speichern von Fertigteilen

Bei anatomisch geformten Typen mit Oberflächenrelief muß außerdem nach dem Entgraten der zur Gewährleistung der Aushebbarkeit separat gegossene Daumen angarniert werden.

Bild 107 zeigt den Grundriß eines Systems zur Weichbearbeitung von Ambitextrous-Tauchformen, bei dem alle erforderlichen Verrichtungen einschließlich der spanenden Vorbearbeitung der Aufspannfläche am Sockel in einer Fertigungszelle integriert worden sind. Um eine möglichst hohe Produktionsleistung zu erzielen, ist für jede Teilverrichtung eine spezialisierte Systemkomponente vorgesehen. Da das Verschwämmen ungefähr gleich lange wie das Entgraten dauert, wurde je ein Handhabungsgerät zum Entgraten und zum Verschwämmen angeordnet, die über ein Bandsystem verbunden sind. Das Bandsystem ist als Stauband ausgeführt und entkoppelt so gleichzeitig die Arbeitsstationen voneinander. Nachdem bei den hohen Anforderungen an die Oberflächengüte von Tauchformen auf eine visuelle Qualitätskontrolle mit manueller Nacharbeit nicht verzichtet werden kann, bietet es sich an, der damit beauftragten Arbeitsperson auch die Beschickung und Entsorgung der Werkstücke an Fräsmaschine und Verputzanlage zu übertragen. Als Spannvorrichtung dient eine Sonderkonstruktion mit federbelasteten Kipphebelspannern. Anstatt der gezeigten Werkstückbereitstellung mit Paletten wäre auch eine unmittelbare Ankopplung an eine Trockenstrecke möglich.

Ein wesentliches Kennzeichen von Ambitextrous-Formen ist der zweidimensionale Gratverlauf. Zum Entgraten genügt daher ein Handhabungsgerät mit zwei linearen Bewegungsachsen in kartesischer Anordnung. Für das Verschwämmen sind hingegen räumliche Bewegungen erforderlich, daher ist hierfür ein sechsachsiger Knickarm-Roboter vorgesehen. Wegen der begrenzten Lebensdauer der Schwämme benötigt dieses Gerät ein Werkzeugwechselsystem, damit bei Bedarf ohne Bediener eingriff ein Ersatz-Werkzeug aufgenommen werden kann. Das Erneuern der Schwambänder ist auf diese Weise außerhalb des Arbeitsbereiches des Roboters möglich. Von einem selbsttätigen Schwammwechsel durch den Roboter selbst - wie bei einzelnen Metall-Entgratzellen mit Bandschleifern ausgeführt - wurde Abstand genommen, da dieser Vorgang sehr lange Nebenzeiten beanspruchen würde.

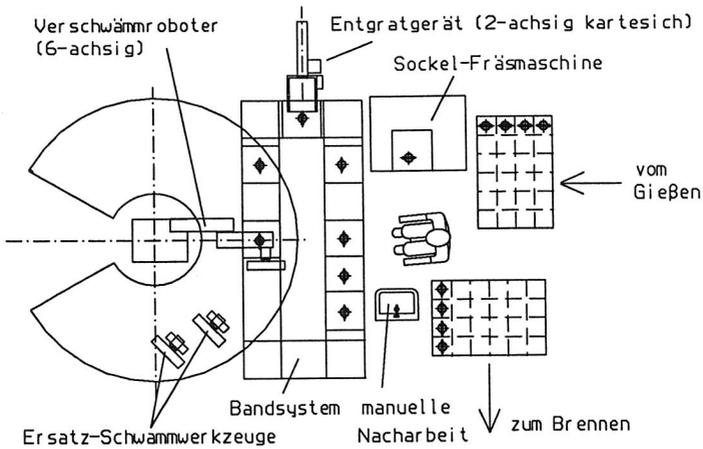


Bild 107: Integriertes Weichbearbeitungssystem für Ambitextrous-Tauchformen

Das Steuerungskonzept des Systems wird in Bild 108 wiedergegeben. Zur Steuerung der Fräsmaschine und des Materialflusssystems sowie zur Koordination mit den Handhabungsgeräten dient eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) als Master. Ein Zellenrechner stellt die Verbindung zum übergeordneten Fabrikleitsystem

her, verwaltet die eingegangenen Aufträge und Programme, stößt die Auftragsausführung an, überträgt die am Entgratplatz gemessenen Werkstücklage-Korrekturwerte zur Verschwämmeinheit und übernimmt Diagnose- sowie BDE-Funktionen. Ferner kann er bei Bedarf auch als lokales RC-Programmiersystem eingesetzt werden.

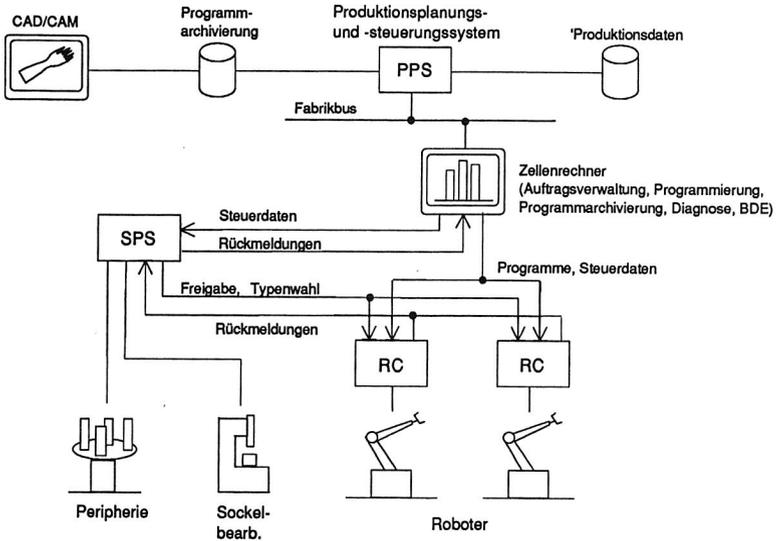


Bild 108: Steuerungsstruktur des Verputzsystems für Tauchformen

Das dargestellte System erreicht eine Taktzeit von ungefähr 45 Sekunden. Gegenüber der bisherigen Handarbeit errechnete sich damit eine Verringerung der Stückkosten für das Verputzen um fast 40 %.

8.2 Entgraten von Bauteilen für Verbrennungsmotoren

Das Verputzen von Portlinern umfaßt folgende Teilaufgaben:

1. Zuführen der Werkstücke
2. Entgraten

3. Herstellerkennzeichnung durch Stempelaufdruck
4. Ablegen und Weitergeben der verputzten Formlinge

Die Qualitätskontrolle kann sich bei den günstigen technologischen Voraussetzungen auf Stichproben beschränken. Verschwämmen ist nicht erforderlich. Es bietet sich jedoch an, den auf das Verputzen folgenden Glasiervorgang als zusätzlichen Arbeitsschritt in den automatisierten Fertigungsprozeß mit einzubeziehen.

Da sich der noch junge Markt für Portliner noch nicht stabilisiert hat, wurde bei der Planung des Verputzsystems Wert auf eine hohe Flexibilität bei möglichst geringen Investitionskosten gelegt. Wegen des geringen Stückpreises von Portlinern waren Rationalisierungserfolge nur bei vollautomatischen Konzepten zu erwarten. Unter diesen Bedingungen bot sich eine Konfiguration mit Werkstück-Handhabung an, wie sie in Bild 109 gezeigt ist.

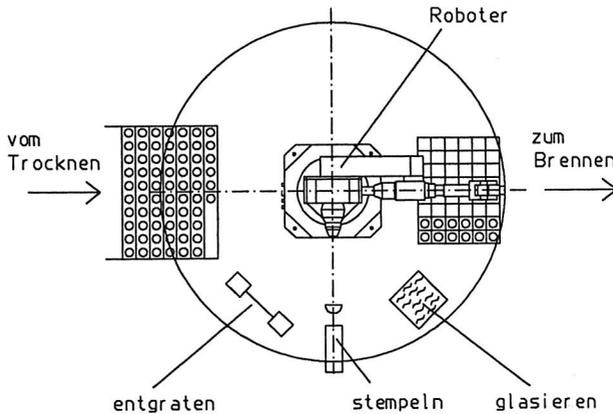


Bild 109: Flexible Weichbearbeitungszelle für Portliner mit Werkstück-Handhabung

Der Entgratroboter entnimmt die Portliner direkt vom Band des Trockenofens, führt sie über alle Bearbeitungsstationen und legt sie dann am Entnahmeplatz ab. Zuerst wird das Werkstück vom Roboter an einem fest montierten Werkzeug entgratet,

anschließend gegen einen Stempel gedrückt und danach in ein Glasurbad getaucht. Die Taktzeit ist wegen der langen Nebenzeiten (Greifvorgänge, Trocknen der Glasur) relativ lang. Der Vorteil dieser Lösung liegt daher eher in ihrer Einfachheit und hohen Flexibilität. Dennoch errechnet sich damit bereits eine Verringerung der Putzkosten um 30 %.

Bild 110 zeigt ein unter Produktivitätsgesichtspunkten optimiertes Konzept, dem das Prinzip der Werkzeug-Handhabung zugrunde liegt. Die Arbeitsstationen sind um einen Rundscharltisch mit mehreren Werkstückaufnahmen angeordnet. Bei der ersten Station wird von einem Palettierportal mit Doppelgreifer das fertig bearbeitete Werkstück durch ein neues ersetzt. In der zweiten Station entgratet ein zweiter Roboter den Portliner. Beim nächsten Takt erfolgt das Stempeln durch einen pneumatisch betätigten Stößel. Zum Glasieren wird an der vierten Station die Aufspannvorrichtung um 180° gekippt, so daß der Portliner in das Glasurbad eintaucht. Dieses Konzept gestattet wegen der Parallelisierung vieler Vorgänge Taktzeiten um 10 Sekunden. Je nach Auslastung der Zelle sind damit Kostenreduzierungen zwischen 30 und 60 % möglich. Bei Zweischichtbetrieb wird sich die Investition bereits nach zwei Jahren amortisiert haben.

Ein Beispiel für die Integration einer derartigen Weichbearbeitungszelle in die Fertigung ist in Bild 111 dargestellt. Das Palettiergerät entnimmt die Formlinge direkt aus dem Trockenofen, der wiederum die Verbindung zum Entformplatz an der Gießlinie herstellt. Die fertig glasierten Teile werden in einen schienengeführten Wagen gestellt, der gleichzeitig als Puffer und als Transportmittel zum Brennofen dient. Nach dem Brennen werden die Portliner auf diesen Wagen direkt zu einem Rundtaktautomaten für die Hartbearbeitung gefahren.

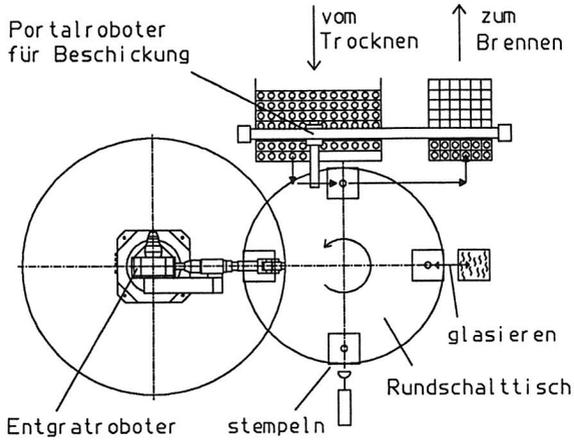


Bild 110: Zelle zum Entgraten von Portlinern mit Werkzeug-Handhabung

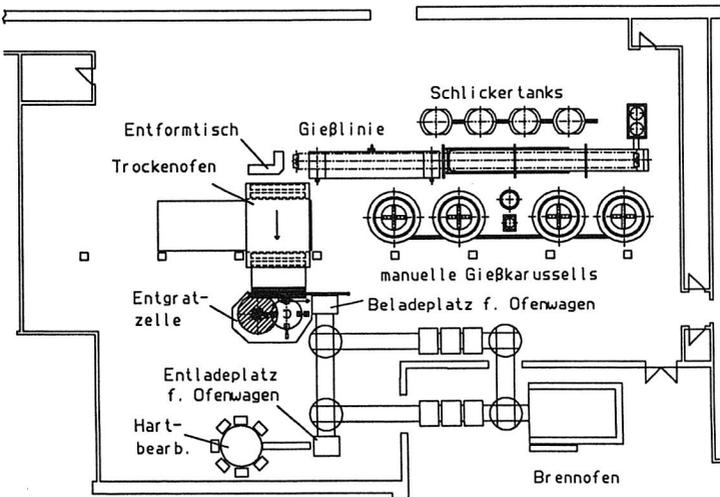


Bild 111: Grundriß einer Portlinerfertigung

9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Schlickergießen ist ein wichtiges Verfahren zur Herstellung von Freiformteilen aus Keramik. Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung von Verfahren, die sich für das Verputzen von Schlickergußteilen für technische Anwendungen mit Industrierobotern eignen, sowie der hierfür notwendigen sensortechnischen Maßnahmen. Ferner sollten Ansätze zur Realisierung technologiespezifischer durchgehender Verfahrensketten mit Rechnerunterstützung aufgezeigt werden.

Zunächst wurden die werkstoff- und verfahrenstechnischen Besonderheiten der Schlickergußproduktion zusammengestellt. Hier ist neben der geringen Festigkeit ungebrannter Keramik insbesondere der mehrstufige Produktionsprozeß zu nennen, der durch wiederholte Zustandsänderungen des Werkstoffs und damit verbundene anisotrope Schwindungs- und Verzugsvorgänge gekennzeichnet ist.

Eine Analyse des Mengenspektrums zeigte, daß mit nur drei Produktgruppen der weit überwiegende Teil des Umsatzes von Schlickergußteilen in der Ingenieurkeramik erwirtschaftet wird. Die auftretenden Form- und Maßtoleranzen sind erheblich. Schwindungsbedingte stochastische Einflüsse treten hierbei deutlich gegenüber den handhabungsbedingten Deformationen zurück. Diese lassen sich durch die Vermessung einiger weniger Punkte an den Werkstücken gut bestimmen.

Das Verputzen von Schlickerguß besteht aus zwei Verfahrensschritten: dem Entgraten und dem sogenannten Verschwämmen, einer Oberflächenbehandlung unter Wassereinwirkung. Die in der keramischen Industrie gebräuchlichen Putzverfahren und Maschinen sind für die Ingenieurkeramik nicht geeignet. Aufgrund der speziellen werkstofftechnischen Eigenschaften ungebrannter Keramik können auch die für andere Werkstoffe entwickelten Entgratkonzepte nicht übertragen werden.

Vergleichende experimentelle Untersuchungen von Entgratverfahren zeigten, daß das Schaben, speziell in der neu entwickelten Sonderform des Drahtschabens, den gestellten Anforderungen am besten gerecht wird. Es besitzt ein sehr gutes immanentes Anpassungsvermögen an unterschiedliche Werkstückkonturen und weist als

einziges Verfahren eine gratselbektive Abtragwirkung auf. Diese Eigenschaften liegen in dem elastisch-spröden Zerspanungsvorgang und der mit zunehmender Spannbreite exponentiell abnehmenden Flächenpressung zwischen Schneide und Werkstück begründet. Aus den Versuchsergebnissen mit verschiedenen Keramiken ließen sich Anhaltswerte für die optimalen technologischen Parameter sowie ihre Grenzen herleiten.

Ein Vergleich alternativer Verschwämmkonzepte mit unterschiedlicher Kinematik des Wirkorgans führte zu einer Lösung mit umlaufendem, endlosem Schwammband. Dieses Prinzip erfüllt alle Anforderungen sowohl an die Zugänglichkeit zum Werkstück wie auch an die Adaptionfähigkeit und an die Fertigungsqualität.

Eine Online-Verfolgung des Gratverlaufs schlickergegossener Formlinge läßt sich beim derzeitigen Stand der Technik nicht verwirklichen. Daher wurde zur Toleranzkompensation ein mehrstufiges Sensorkonzept unter Ausnutzung der werkzeugimmanenten Nachgiebigkeiten entwickelt, welches aus einer intermittierenden Werkstück-Vorvermessung zur Erfassung globaler Lageabweichungen und einer prozeßbegleitenden Messung der Werkzeugauslenkung mit Rückführung in den Lageregelkreis des Handhabungsgeräts zur lokalen Bahnanpassung besteht. Damit können gleichzeitig die Anforderungen an Zahl und Genauigkeit der zu programmierenden Bahnstützpunkte deutlich reduziert werden.

Erster Schritt bei der Schaffung einer rechnergestützten Verfahrenskette für die Schlickergußfertigung ist die Verlagerung der Produktgestaltung vom handwerklichen Modellbau zu einem 3D-Freiformflächen-CAD-System. Dies wurde exemplarisch in Form eines interaktiven Variantenprogramms für Ambitextrous-Tauchformen realisiert, welches aus parametrisierten Grundtypen neue Modelle erstellt, wobei verschiedene Ansätze zur Beschreibung von Freiformflächen verglichen wurden.

Voraussetzung für eine rechnergestützte Generierung von Arbeitsunterlagen und Steuerprogrammen für die Fertigungsmittel ist, daß im Rechner auch die Geometrien der fertigungstechnologischen Zwischenzustände des Produktes verfügbar sind. Hierfür muß die Gestalt des Endprodukts mit den bei Trocknung und Brand auftretenden Schwindungen und Verzügen beaufschlagt werden. Die hierfür realisierte Lö-

sung in Form eines werkstückspezifischen Variantenprogramms kann nur als Zwischenstufe betrachtet werden. In der Literatur werden bereits Ansätze zur Vorhersage von Schwindungsvorgängen bei Keramiken beschrieben. Ihre Weiterentwicklung und Integration zu einem Technologieprozessor unter Einbeziehung wissensbasierter Systemkomponenten wäre ein lohnender Gegenstand weiterer Forschungen.

Auf der Werkstattebene sind Fortschritte insbesondere im Bereich der Sensorik anzustreben. Durch weitere Miniaturisierung optischer Sensoren könnte eine Verfolgung des Gratverlaufs und ein Erkennen der lokalen Graddicke als wichtigem Technologieparameter realisiert werden. Eine Einführung von Bildverarbeitungssystemen zur Werkstückvorvermessung würde die Flexibilität des Verputzsystems steigern und zusätzliche Daten für die Qualitätssicherung liefern. Die derzeit laufende Entwicklung schneller Robotersteuerungen mit leistungsfähigen, flexiblen Schnittstellen ist als wesentliche Bedingung für eine Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit anzusehen.

10 Schrifttum

1. Statistisches Bundesamt (Hrsg.):
Statistisches Jahrbuch 1988 für die Bundesrepublik Deutschland.
Stuttgart, Mainz: Kohlhammer-Verlag, 1988.
2. Statistisches Bundesamt (Hrsg.):
Statistisches Jahrbuch 1990 für die Bundesrepublik Deutschland.
Stuttgart: Metzler-Poeschel Verlag, 1990.
3. VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (Hrsg.):
Literaturzusammenstellung "Robotereinsatz beim Entgraten" (3. Aufl.).
Düsseldorf: Fachinformationszentrum Technik, 1988.
4. Mittwollen, M.; Pfeifer, H.:
Literaturrecherche über die tribologischen Eigenschaften von Keramik.
In: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 5 Nr. 137.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988.
5. o. V.:
Technische Daten.
Selb: TeCe Technical Ceramics GmbH & Co. KG, o. J.
6. o. V.:
Technische Werte von Keramik-Werkstoffen. DKG-Fachausschußbericht Nr. 23.
Deutsche Keramische Gesellschaft, 1978.
7. DIN 17100:
Allgemeine Baustähle, Gütevorschriften.
Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, Ausgabe Januar 1980.
8. DIN 1691:
Gußeisen mit Lamellengraphit (Grauguß).
Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, Ausgabe August 1964.
9. DIN 1725 Teil 1:
Aluminiumlegierungen: Knetlegierungen.
Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, Ausgabe Dezember 1976.
10. Spur, G.:
Entwicklungslinien der Fertigungsautomatisierung.
In: Automatisierungstechnische Praxis 29 (1987), Sonderheft Fertigungsautomatisierung, S. 4-10.
11. Feldmann, K.:
Entwicklung und Einsatz rechnerintegrierter Produktionssysteme.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 83 (1988) H. 6, S. 290-292.

12. Neipp, G.:
Unternehmensstrategie für die Einführung von CAD/CAM/CIM.
In: VDI-Berichte Nr. 570.1.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985.
13. Boley, D.; Stolz, A.:
Entgraten mit Roboter, eine Chance zur Automatisierung weiterer arbeitsintensiver Arbeitsgänge.
In: IPA-Technologie-Forum 1987.
Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, 1987.
14. Schulz, M.:
Beitrag zum Einsatz von Industrierobotern beim Entgraten von Aluminiumguß.
In: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 153.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988.
15. Hennicke, H. W.:
Zum Begriff Keramik und zur Einteilung keramischer Werkstoffe.
In: Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 44 (1967), S. 209-211.
16. Willmann, G.:
Terminologie der technischen Keramik.
In: Jahrbuch Technische Keramik, Ausgabe 1.
Essen: Vulkan-Verlag, 1988.
17. Kriegesmann, J. (Hrsg.):
Technische Keramische Werkstoffe.
Köln: Deutscher Wirtschaftsdienst, 1989.
18. Willmann, G.:
Konstruieren mit Keramik - Werkstoffkennwerte.
In: Sprechsaal für Keramik, Glas, Baustoffe, Aufbereitung, Produktion 117 (1984) Nr. 10, S. 914-923.
19. Hennicke, H. W.:
Werkstoffsystematik keramischer Werkstoffe.
In: Jahrbuch Technische Keramik, Ausgabe 1.
Essen: Vulkan-Verlag, 1988.
20. Schüller, K. H.; Hennicke, H. W.:
Zur Systematik der keramischen Werkstoffe.
In: Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 62 (1985), S. 259-263.
21. Willmann, G.:
Konstruieren mit Keramik - Bearbeitung von Bauteilen.
In: Sprechsaal für Keramik, Glas, Baustoffe, Aufbereitung, Produktion 118 (1985) Nr. 10, S. 990-993.
22. Schäfer, F.:
Entgraten.
Mainz: Krausskopf-Verlag, 1985.

23. Brunhuber, E.:
Gießerei-Lexikon.
Berlin: Fachverlag Schiele & Schön, 1972.
24. Salmang, H.; Scholze, H.:
Keramik (6. Aufl.). Teil 2: Keramische Werkstoffe.
Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1983.
25. Kraus, P.:
Industrieroboter in der keramischen Industrie.
In: Keramische Zeitschrift 37 (1985) Nr. 8, S. 391-393.
26. Kraus, P.:
Automatisches Glasieren mit Robotern.
In: Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 64 (1987) H. 3/4, S. 109-112.
27. Siegling, H.; et al.:
Technologische Linie zum Entgraten feinkeramischer Formlinge.
In: Silikattechnik 37 (1986) H. 10, S. 335-336.
28. Binkert, B.:
Schwindungsgeregeltes Sintern von Al_2O_3 - und Porzellanmassen mit einem Laser-Absolutdilatometer.
Diss. TU Clausthal, 1982.
29. Exner, H. E.:
Sintern.
In: Jahrbuch Technische Keramik, Ausgabe 1.
Essen: Vulkan-Verlag, 1988.
30. Spur, G.; et al.:
Keramikbearbeitung.
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1989.
31. Spur, G.; Sabotka, I.; Tio, T. H.; Wunsch, E.:
Überblick über trennende Fertigungsverfahren zur Hartbearbeitung von Keramiken.
In: Jahrbuch Technische Keramik, Ausgabe 1.
Essen: Vulkan-Verlag, 1988.
32. Meyer, H.-R.; Klocke, F.; Sauren, J.; Haag, M.:
Schleifen keramischer Werkstoffe.
In: Feinbearbeitung nichtmetallischer Werkstoffe.
Essen: Vulkan-Verlag, 1987.
33. Petrofes, N. F.; Gadalla, A. M.:
Electrical Discharge Machining of Advanced Ceramics.
In: American Ceramic Society Bulletin 67 (1988) No. 6, S. 1048-1052.

34. Haas, R.:
Ultraschall-Erosion. Verfahren zur dreidimensionalen Bearbeitung keramischer Werkstoffe.
Sonderdruck aus FBM 1/88.
Stuttgart: Hahn & Kolb KG, 1988.
35. Jennings, M.:
Economic machining of engineering ceramics.
In: British Ceramics Revue 76 (1988) H. 1, S. 44-45.
36. Clayton, C. G. A.:
Der Einsatz von CAD/CAM zum Entwurf und zur Fertigung von Formen für keramische Produkte.
In: Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 63 (1979), S. 216-220.
37. Rooney, J.; Steadman, P. (Hrsg.):
CAD. Grundlagen von Computer Aided Design.
München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1990.
38. Norton, F. H.:
Fine Ceramics.
New York: Verlag McGraw-Hill, 1970.
39. Chiari, B. Freiherr von:
Trocknungsverhalten plastischer keramischer Massen unter besonderer Berücksichtigung des Schwindungsverhaltens und der Verformbarkeit.
Diss. TU Clausthal, 1981.
40. Hlavac, J.:
The Technology of Glass and Ceramics.
Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier Verlag, 1983.
41. Eversheim, W.; Schütt, J. M.; Zepf, R.:
Fünffachsiges Simultanfräsen von Freiformflächen.
In: VDI-Z 131 (1989) Nr. 2, S. 14-17.
42. Derge, K. F.:
Licht formt Modelle.
In: Fertigung (1989) Nr. 3, S. 24-28.
43. Ruud, N. A.:
CAD-System and stereolithography technique means rapid prototyping - experiences with a new technology.
In: VDI-Berichte Nr. 861.2, S. 183-198.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.
44. Gehring, V.; Becker, M.; Camacho, J. H.:
Entwicklungstendenzen im Werkzeug- und Formenbau.
In: VDI-Z 132 (1990) Nr. 8, S. 12-16.

45. Schmidt, W.; et al.:
Bearbeitung von Freiformflächen.
In: VDI-Z 133 (1991) Nr. 1, S. 47-57.
46. Distler, H.:
Spline-Programmierung als Lösung für komplexe Bearbeitungsaufgaben.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 84 (1989) Nr. 3, S. 114-117.
47. Glantschnig, F.:
Zukunft und Wirtschaftlichkeit für Konstruktion und Herstellung komplexer
Formen und Werkzeuge durch CAD-CNC-Kopplung.
In: Werkstatt und Betrieb 123 (1990) Nr. 7, S. 557-563.
48. Sturz, W.:
Werkstückorientierte Verfahrensauswahl zum Gußputzen mit Industrierobotern.
In: IPA Forschung und Praxis, Nr. 92.
Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1986.
49. Rogos, J.; Anders, M.; Sikora, R.:
Automatisierung beim Gußputzen.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 85 (1990) Nr. 9, S. 484-487.
50. Kluge, P.:
Entgraten von Faserverbundstoffen mit Industrieroboter.
München: Gesellschaft für digitale Automation, o. J.
51. Seidel, M.:
Grat ab. Roboterentgraten von Kunststoffformteilen.
In: Roboter (1990) Nr. 4, S. 34-40.
52. Schramm, L.:
Entgraten mit Industrierobotern.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 85 (1990) Nr. 9, S. 492-495.
53. Klumpp, W.; Zanke, H.:
Entgraten mit Industrierobotern.
In: Werkstattstechnik 77 (1987) Nr. 7, S. 383-387.
54. Abele, E.:
Gußputzen mit sensorgeführten, programmierbaren Handhabungsgeräten.
In: IPA Forschung und Praxis, Nr. 72.
Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1983.
55. Schmid, D.; Michalak, E.; Zobel, R.:
Autonom sensorgeführter Roboter zur Schleifbearbeitung von Behältersegmenten.
In: Robotersysteme 6 (1990) Nr. 2, S. 99-102.
56. Fürbaß, J.-P.:
Flexibles Gußputzen mit sensorgeführten Werkzeugmaschinen.
In: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Nr. 137.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1987.

57. Grube, G.:
Freiformflächen mit Industrierobotern schleifen.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 85 (1990) Nr. 4, S. 220-223.
58. Boley, D.:
Sensorunterstütztes Programmierverfahren für das Entgraten mit Industrierobotern.
In: IPA Forschung und Praxis, Nr. 127.
Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1988.
59. Bastert, R.:
Off-line-Programmiersystem für das Entgraten von Leichtmetallteilen mit Industrierobotern.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 84 (1989) Nr. 1, S. 43-46.
60. Kuntze, H.-B.; et al.:
Sensorgestützte Programmierung und Steuerung von Industrierobotern.
In: Robotersysteme 4 (1988), S. 43-52.
61. Häfele, H.-K.:
Industrieroboter off line programmieren.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 85 (1990) Nr. 11, S. 589-592.
62. Krischer, O.; Kast, W.:
Trocknungstechnik. Band 1: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik (3. Aufl.).
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1978.
63. Mostetzky, H.:
Trocknung keramischer Rohlinge. Teil 1: Eine Einführung in die physikalischen Grundlagen.
In: Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 56 (1979), S. 119-122.
64. Schober, G.:
Die Charakterisierung der Verarbeitbarkeit palstischer tonkeramischer Massen und deren Beeinflussung durch die Einwirkung von Mikroorganismen.
Diss. TU Clausthal, 1990.
65. Hofmann, U.:
Oberflächenladung und Rheologie der Tonminerale.
In: Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 41 (1964), S. 680-685.
66. Teuchert, K.:
Keramische Gießschlicker.
In: Keramische Zeitschrift 31 (1979) Nr. 2, S. 50-55.
67. Hecht, A.:
Elektrokeramik (2. Aufl.).
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1976.

68. Chandler, M.:
Keramische Werkstoffe.
Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1971.
69. Autorenkollektiv:
Technologie der Feinkeramik.
Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1968.
70. Weinstein, J. G.; Greenhut, V. A.; Phelps, G. W.:
Dynamic sag test for measuring in-situ fired warpage of ceramic bodies.
In: American Society Bulletin 64 (1985) Nr. 10, S. 1378-1381.
71. Krause, E.; et al.:
Technologie der Keramik. Band 1: Verfahren - Rohstoffe - Erzeugnisse (2. Aufl.).
Berlin: Verlag für Bauwesen, 1985.
72. Röttenbacher, R.:
Mechanische Eigenschaften von Konstruktionskeramik.
In: Jahrbuch Technische Keramik, Ausgabe 1.
Essen: Vulkan-Verlag, 1988.
73. Willmann, G.:
Zähigkeit und Verformbarkeit bei keramischen Werkstoffen.
In: VDI-Z 129 (1987), Special "Neue Werkstoffe", S. 18-25.
74. Ziegler, G.:
Keramische Konstruktionswerkstoffe - Stand der Technik.
In: Hochfeste Ingenieurkeramik.
Essen: Vulkan-Verlag, 1987.
75. Wobker, H. G.:
Schleifen keramischer Werkstoffe, Teil 1.
In: Magazin für Neue Werkstoffe (1990) Nr. 1, S. 8-10.
76. Munz, D.; et al.:
Bruchverhalten keramischer Werkstoffe - Methoden und Ergebnisse.
In: Fortschritt-Berichte VDI-Z Reihe 18, Nr. 11.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1981.
77. Brugger, N.:
Zum Verhalten von Rissen in keramischen Werkstoffen unter statischer, langsam ansteigender und schwingender Belastung.
Diss. TH Karlsruhe, 1986.
78. Haug, T. H.:
Der Einfluß einer Glasphase in einer Al_2O_3 -Keramik auf die langsame Rißausbreitung bei Raumtemperatur und im Hochtemperaturbereich.
Diss. Universität Stuttgart, 1985.

79. Lishing Li:
Bestimmung kritischer und unterkritischer Reißausbreitung keramischer Werkstoffe bei Raum- und Hochtemperatur.
Diss. Universität Stuttgart, 1980.
80. Hennicke, H. W.:
Grundelemente der Festigkeit und des Bruchverhaltens keramischer Werkstoffe.
In: Handbuch der Keramik.
Freiburg: Schmid-Verlag, 1974.
81. Schulz, P.:
Einfluß der Formgebung auf das Gefüge des ungebrannten keramischen Formkörpers.
Diss. RWTH Aachen, 1981.
82. Rivera-Perez, P.:
Ursache und statistische Auswertung der Streuung von Festigkeitskennwerten bei technischem Porzellan.
Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, 1990.
83. Willmann, G.; Wielage, B.:
Technische Keramik in Elektronik, Motorenbau, Chemie/Verfahrenstechnik, Maschinenbau.
Essen: Vulkan-Verlag, 1988.
84. Willmann, G.:
Basis für die konstruktive Gestaltung keramischer Bauteile.
In: Hochfeste Ingenieurkeramik.
Essen: Vulkan-Verlag, 1987.
85. Hartmann, J.; Gugel, E.; Wiedenhorn, G.:
Untersuchungen zum Gedächtnis keramischer Massen.
In: Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 43 (1966), S. 595-599.
86. Williamson, W. O.:
Oriented Aggregation, Differential Drying-shrinkage and Recovery from Deformation of a Kaolinite-Illite Clay.
In: Transactions of the British Ceramic Society 54 (1955), S. 413-442.
87. Schüller, K.-H.; Leipold, W.; Ächtner, R.:
Einfluß der Versuchsbedingungen auf die Ergebnisse von Bestimmungen der Trockenbiegefestigkeit.
In: Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 56 (1979), S. 187-191.
88. Mattyasovszky-Zolnay, T.:
Der Einfluß der Trocknungsgeschwindigkeit auf die Eigenschaften von getrockneten Formlingen.
In: Tonindustrie-Zeitung 101 (1977), S. 111/112.

89. Hofmann, U.; et al.:
Die Trockenbiegefestigkeit von Kaolinen und Tonen.
In: Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft 44 (1967), S. 131-140.
90. McColm, I. J.; Clark, N. J.:
Forming, Shaping and Working of High-Performance Ceramics.
Glasgow, London: Blackie Publ., 1988.
91. Haug, T.:
Festigkeit keramischer Werkstoffe.
In: Jahrbuch Technische Keramik, Ausgabe 1.
Essen: Vulkan-Verlag, 1988.
92. Schmid, J.:
Verputzen von keramischen Gußstücken mit Industrierobotern.
In: Proceedings of MECHATRONINFO 90, Kecskemét (Ungarn), 13.-
15.11.1990.
93. Dworak, U.:
Einsatz keramischer Werkstoffe im Motorenbau.
In: Jahrbuch Technische Keramik, Ausgabe 1.
Essen: Vulkan-Verlag, 1988.
94. Körkemeier, H.:
Erfahrungen mit Portlinern im Pkw-Ottomotor.
In: Jahrbuch Technische Keramik, Ausgabe 1.
Essen: Vulkan-Verlag, 1988
95. Vycudilik, P.:
Charakteristik einiger Oberflächenfehler an gegossener Ware.
In: Silikattechnik 27 (1976) Nr. 11, S. 363-366.
96. DIN 40680 Teil 1:
Keramische Werkstücke in der Elektrotechnik. Allgemeintoleranzen für Maße.
Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, Ausgabe August 1983.
97. DIN 40680 Teil 2:
Keramische Werkstücke in der Elektrotechnik. Allgemeintoleranzen für Form.
Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, Ausgabe August 1983.
98. Reckziegel, A.; Willmann, G.:
Konstruieren mit Keramik - Herstellung und Maßhaltigkeit ohne Nachbearbeitung.
In: Sprechsaal für Keramik, Glas, Baustoffe, Aufbereitung, Produktion 118
(1985) Nr. 4, S. 332-338.
99. Schmid, J.:
Automatisiertes Verputzen von keramischen Gußstücken.
In: Produktion (1991) Nr. 14, S. 24.

100. Emmelmann, C.:
Laserschneiden von Keramik.
In: Laser und Optoelektronik 21 (1989) Nr. 3, S. 116-123.
101. Tönshoff, H. K.; Gedrat, O.:
Removal process of ceramic materials with excimer laser radiation.
Hannover: Laser-Zentrum, 1988.
102. Bouché, Ch.; et al.:
Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau (13. Aufl., berechtigter Neudruck).
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1974.
103. Lurje, A. I.:
Räumliche Probleme der Elastizitätstheorie.
Berlin: Akademie-Verlag, 1963.
104. Blake, P.; et al.:
Precision Machining of Ceramic Materials.
In: American Ceramic Society Bulletin 67 (1988) Nr. 6, S. 1038-1044.
105. Kleinevoß, R.:
Machining of New Materials.
Vortrag auf der CIRP-Tagung Berlin 1990.
106. Bifano, T.; Dow, T.; Scattergood, R.:
Ductile Regime Grinding of Brittle Materials.
Raleigh (USA): Precision Engineering Center, North Carolina State University,
o. J.
107. Busch, D. M.:
Ritz- und Verschleißuntersuchungen an spröden Werkstoffen mit einzelkornbe-
stückten Hartstoffwerkzeugen.
Diss. TH Hannover, 1968.
108. Tio, T.-H.:
Pendelplanschleifen nichtoxidischer Keramiken.
In: Produktionstechnik - Berlin, Nr. 80.
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1990.
109. Griffioen, J. A.; Bair, S.; Winer, W. O.:
Infrared surface temperature measurements in a sliding ceramic-ceramic
contact.
In: Proceedings of the Leeds-Lyon Symposium, September 1985, Lyon.
London: IPC Science and Technology Press Ltd., 1985.
110. König, W.; Wagemann, A.; Mayrose, H.-G.:
Laserunterstütztes Drehen von heißgepreßtem Siliziumnitrid.
In: Industrie-Anzeiger 111 (1989) Nr. 1, S. 34-36.

111. Evans, A. G.:
Abrasive Wear in Ceramics. An Assessment.
In: The Science of Ceramic Machining and Surface Finishing II.
Washington D.C. (USA): National Bureau of Standards, 1979.
112. Vieregge, G.:
Zerspanung der Eisenwerkstoffe.
Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1970.
113. Spur, G.; Stöferle, Th. (Hrsg.):
Handbuch der Fertigungstechnik. Band 3: Spanen, Teil 1.
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1979.
114. o. V.:
Schwammgummi-Laufbänder.
Wiesbaden: Fa. Manfred Brösel, o. J.
115. Hsieh, L.-H.:
Aufgabenorientierte Planung und Integration einer sensorgestützten Gußputz-
zelle.
In: Rogos, J. (Hrsg.): Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik.
Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1989.
116. Kempkens, K.; et al.:
Regelung von Roboterbewegungen aufgrund optischer Abstandsmessung.
In: VDI-Berichte Nr. 598.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.
117. Baum, G.:
Sensoreinsatz beim Gußputzen.
In: Rogos, J. (Hrsg.): Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik.
Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1989.
118. Mollath, G.; Nickolay, B.:
Systeme zur mehrdimensionalen Kraft- und Momentenmessung.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 82 (1987) Nr. 6, S. 352 - 357.
Gleichlautend in: Rogos, J. (Hrsg.): Intelligente Sensorsysteme in der
Fertigungstechnik.
Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1989.
119. Ahrens, U.; Drunk, G.; Langen, A.:
Sensorschnittstellen für Robotersteuerungen.
In: Robotersysteme 2 (1986) Nr. 2, S. 37-45.
120. Ruoff, W.:
Optische Sensorsysteme zur On-line-Führung von Industrierobotern.
In: ISW Forschung und Praxis Nr. 81.
Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1989.

121. Dlabka, M.; et al.:
Konturfolgen durch vorlaufende Sensoren.
In: Rogos, J. (Hrsg.): Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik.
Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1989.
122. Zhao, W.:
Sensorgeführte Industrieroboter zur Bahnverfolgung.
In: Produktionstechnik - Berlin, Band 79.
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1990.
123. Hirzinger, G.:
Adaptiv sensorgeführter Roboter mit besonderer Berücksichtigung der Kraft-
Momenten-Rückkopplung.
In: Robotersysteme 1 (1985), S. 161-171.
124. Hirzinger, G.; Landzettel, K.:
Sensory Feedback for Robots with Supervised Learning.
In: Proc. of the IEEE Conference on Industrial Robots, St. Louis (USA), März
1985.
125. Schmid, D.; Hardter, H.; Sichler, K.:
Zusatzachsen verbessern die Sensorführung.
In: Robotersysteme 5 (1989) H. 4, S. 247-251.
126. Classe, D.:
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch
Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte.
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1988.
127. Doll, T. J.:
Nichttaktile Sensoren für Roboter und Sensoreinsatzplanung.
In: Robotersysteme 2 (1986), Nr. 3, S. 55-62.
128. Pritschow, G.; Gruhler, G.:
Selbstprogrammierung von Industrierobotern durch Führung im geschlossenen
Sensorregelkreis.
In: VDI-Berichte Nr. 598, S. 119-131.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.
129. Weck, M.; Fürbaß, J.-P.:
Sensorsysteme für das automatische Gußputzen.
In: VDI-Z 128 (1986) Nr. 22, S. 879-883.
130. Molitor, M.:
Berührungslose optoelektronische Meßautomaten für die Geometrierfassung
an Werkstücken.
In: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Nr. 173.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988.

131. Thieme, W.:
Konturvermessung mit Lasern.
In: Laser-Magazin (1987) Nr. 4, S. 6-8.
132. Wörn, H.; Sedlmair, N.:
Sensoren für den industriellen Einsatz.
In: Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik (Hrsg.: Rogos, J.).
Berlin u. a.: Springer-Verlag, 1989.
133. Kroth, E.:
Robotersysteme mit integrierter Bildverarbeitung.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 83 (1988) Nr. 4.
134. Lardelli, A.:
3D-Messungen an großen Objekten mit mobilen Systemen.
In: Sensortechnische Zeitschrift (1988) Nr. 20, S. 10-14.
135. Baur, Ch.; Beer, S.:
Bildanalyse mit Hilfe von CAD-Oberflächenmodellen.
In: Robotersysteme 5 (1989) Nr. 4, S. 105-110.
136. Niemann, H.:
Wissensbasierte Verarbeitung industrieller Szenen.
In: Band zur Fachtagung "Rechnerintegrierte Produktionssysteme", Erlangen,
27./28.10.1987.
137. Jugenack, D. (Hrsg.):
Handbuch der Sensortechnik.
Landsberg: Verlag Moderne Industrie, 1989.
138. Kuntze, H.-B.; et al.:
Kraft- und Positionsregelung eines Industrieroboters zur Bearbeitung komplexer
Werkstücke.
In: VDI-Berichte Nr. 598, S. 97-117.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.
139. Wendt, W.:
Bahnregelung von Handhabungsgeräten und Werkzeugmaschinen.
In: Produktionstechnik - Berlin, Nr. 58.
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1987.
140. Schwarze, H.; Holzgrefe, H.-W.:
Computereinsatz beim Regeln und Steuern.
Stuttgart: J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung/B. G. Teubner, 1987.
141. Föllinger, O.:
Regelungstechnik (3. Aufl.).
Berlin, Frankfurt (M.): AEG-Telefunken AG, 1980.

142. Kleineidam, G.; Schmid, J.:
CAD/CAM-Verfahrenskette in der Keramikproduktion.
In: VDI-Z 132 (1990) Nr. 8, S. 42-47.
143. Meerkamm, H.; Finkenwirth, K.; Räse, U.:
Fertigungsgerecht Konstruieren mit CAD-Systemen.
In: Konstruktion 42 (1990) H. 10, S. 293-298.
144. Feldmann, K.; Geyer, G.; Eisele, R.:
Wissensbasierte Ansätze zur Montageplanung.
In: Tagungsband zur Fachtagung "CIM-Komponenten zur Planung und Steuerung", München, 14.-15.6.1988.
145. Berns, St.; Andrich, B.; Koller, R.:
Entwicklung eines allgemeinen wissensbasierten Systems für die Konstruktion, erläutert am Beispiel des schweißgerechten Gestaltens.
In: VDI-Berichte Nr. 861.2, S. 63-84.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.
146. Moritzen, K.:
Montagegerechtes Entwerfen mit wissensbasierten Systemen.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 85 (1990) H. 5, S. 248-251.
147. Müller, G.:
Rechnerorientierte Darstellung beliebig geformter Bauteile.
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1980.
148. Bartels, R. H.; Beatty, J. C.; Barsky, B. A.:
An Introduction to Splines for use in Computer Graphics & Geometric Modelling.
Los Altos (USA): Morgan Kaufmann Publishers, 1987.
149. Encarnacao, J.; Schlechtendahl, E. G. (Hrsg.):
Computer Aided Design.
Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag, 1983.
150. Abeln, O.:
CAD-Systeme der 90er Jahre - Vision und Realität.
In: VDI-Berichte 861.1, S. 85-101.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.
151. Grabowski, H.; Benz, T.:
Lösungsfindung und Wissensverarbeitung in CAD-Systemen mit integrierten Produktmodellen.
In: VDI-Berichte Nr. 775.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.
152. Finkenwirth, K.-W.:
Fertigungsgerecht Konstruieren mit CAD - Konzept eines Konstruktionssystems zur Informationsverarbeitung mit CAD-Systemen.
Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, 1990.

153. Schäfer, G.:
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung.
In: Fertigungstechnik - Erlangen, Nr. 19.
München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1991.
154. Zülke, D.:
Offline-Programmierung numerisch gesteuerter Industrieroboter.
Diss. RWTH Aachen, 1983.
155. Kleineidam, G.; Eisele, R.:
Neue Sprachregelung: Entwicklungsschritte auf dem Weg zur aufgabenorientierten (impliziten) Roboterprogrammierung.
In: Moderne Fertigung (1988) H. 8, S. 47-50; H. 9, S. 97-100.
156. Pritschow, G.; Tuffentsammer, K.:
A New Procedure for the Economic Programming of Tooling Robots in the Case of Small Batches.
In: Annals of the CIRP Vol. 36/1/1987, S. 339-342.
157. o. V.:
Bewegungssteuerung mit sechsdimensionalem Joystick.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 84 (1989) Nr. 3, S. 117.
158. Balling, G.; Fuehrer, D.:
Einfache Programmerstellung für Roboter durch sensorgesteuerte Raumpunktgenerierung.
In: Energie und Automation 9 (1987) Nr. 4, S. 12-14.
159. Kleineidam, G.:
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung.
In: Fertigungstechnik - Erlangen, Nr. 12.
München, Wien: Hanser-Verlag, 1990.
160. Angermüller, G.; Kolbenschlag, P.:
Schnelle Simulation.
In: Roboter (1990) Nr. 9, S. 20-22.
161. Niehaus, Th.:
Rechnergestützte Anwendungsprogramm-Entwicklung für Industrieroboter und flexible Automatisierungsgeräte. Programmiermethoden und ihre Anwendung in der Produktionstechnik.
In: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Nr. 138.
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1987.
162. Feldmann, K.; Eisele, R.; Kleineidam, G.:
Verfahrenskette zur Planung und Programmierung von Montagezellen.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 82 (1987) Nr. 7, S. 521-527.
163. Duelen, G.; Schröer, K.:
Praktische Resultate der Roboter-Kalibration.
In: Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung 85 (1990) Nr. 2, S. 113-116.

Lebenslauf

Persönliches:

Name: Joachim Schmid
Geburtsdatum: 21. Mai 1960
Geburtsort: Ulm
Staatsangehörigkeit: deutsch
Eltern: Horst Schmid
Sieglinde Schmid, geb. Hahn
Familienstand: verheiratet mit Kerstin Schmid, geb. Anton

Schulbildung:

1966 - 1970 Grundschule in Ulm
1970 - 1979 Gymnasium "2. Ulmer Modell"
19.6.1979 Abitur

Studium:

1979 - 1985 Maschinenwesen an der Universität Stuttgart
11.7.1985 Diplom-Hauptprüfung

Berufstätigkeit:

1979 - 1984 Praktikantentätigkeiten in verschiedenen Industrieunternehmen
1981 - 1982 Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre der Universität Stuttgart
1985 - 1986 Konstruktionsingenieur bei Holtschmidt Entwicklungen KG, Augsburg
1986 - 1991 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg
seit 1.7.1991 Gruppenleiter in der Konstruktion der Liebherr-Verzahntechnik GmbH, Kempten

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektlernung von Montagesystemen

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeler

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

- Band 10
Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 11
Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 12
Gerhard Kleineidam
CAD/CAP : Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 13
Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 14
Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂ - Hochleistungslasern
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 15
Uwe Geißler
Material- und Datenfluß In einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 16
Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 17
Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 18
Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 19
Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
157 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 20
Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.